

REGULACIJA REKA

Radovi i građevine

Miodrag B. Jovanović



Univerzitet u Beogradu = Građevinski fakultet

UNIVERZITET U BEOGRADU

Miodrag B. Jovanović

REGULACIJA REKA

Radovi i građevine



Građevinski fakultet
Beograd, 2022.

Miodrag B. Jovanović
REGULACIJA REKA
Radovi i građevine

Izdavač

Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet, Beograd, 2022.

Za izdavača

Prof. dr Vladan Kuzmanović, dekan

Recenzenti

Prof. dr Slobodan Đorđević, Univerzitet u Ekseteru
Prof. dr Ljubodrag Savić, Univerzitet u Beogradu

Knjiga je odobrena za štampu odlukom Nastavno-naučnog veća
Građevinskog fakulteta u Beogradu 20.10.2022. god.

Prelom teksta, crteži i korice

Autor

©2022 Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
Sva prava zadržava izdavač i autor.

ISBN 978-86-7518-216-0

Uspomeni na moje roditelje

Predgovor

Ova knjiga je prvenstveno namenjena inženjerima hidrotehnike koji se bave uređenjem vodotoka. Po obimu i detaljnosti, ona prevazilazi nivo studentskog udžbenika, što ne znači da je ne mogu koristiti i studenti građevinskih fakulteta. Sa autorovom prethodnom knjigom „Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija”, ova knjiga čini celinu i zaokružuje tematiku uređenja vodotoka na način na koji je ovu zanimljivu oblast autor dugo predavao na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

Za praćenje i razumevanje sadržane materije neophodno je solidno predznanje iz hidraulike, a u dobroj meri i nekih drugih oblasti (hidrologije, statistike, geotehnike i hidrotehničkih konstrukcija). U ovoj knjizi se referenciraju brojni sadržaji iz prve knjige (oblast rečne hidraulike i morfologije), uz pomoć šifarnika čije se objašnjenje daje u nastavku.

Prikaz projektnih principa u regulaciji reka praćen je nizom ilustrativnih računskih primera (spisak u Dodatku D11). Iskustvo pokazuje da ovakvi primeri nailaze na dobar prijem kod čitalaca, jer ne samo da doprinose lakšem razumevanju materije, već inženjerima služe kao „mustre” u njihovoj svakodnevnoj praksi. Imajući to u vidu, u tekstu su uokvirene one formule koje su važne za inženjerske proračune.

U današnjim uslovima, pojmovi „uređenje vodotoka” i „regulacija reka” imaju mnogo šire značenje nego u prošlosti. Sa sve izraženijim problemima kvantiteta i kvaliteta voda, sa neizvesnostima koje nose klimatske promene, sa uplivom ekologije i društvenih odnosa, uređenje vodotoka postaje disciplina koja zahteva objedinjavanje znanja iz hidrotehnike i „neinženjerskih” oblasti, kao što su bioinženjerstvo, ekologija, sociologija i dr. Imajući ovo u vidu, čitaocima je ponuđen širi pogled na uređenje vodotoka, obuhvatajući i teme van klasične regulacije reka, kao što su: biohemijski procesi i ekološka održivost, numerički i fizički modeli, kartiranje rizika i uloga osiguranja u zaštiti od poplava itd.

U pisanju ovako tematski heterogenog štiva, mnogo je teže obrazložiti *filozofiju* projektovanja nego opisati neku konkretnu metodu proračuna ili izvođenja radova. U našoj univerzitetskoj nastavi i stručnoj literaturi mnogo je više toga „kako”, nego onoga „zašto”. Autor se trudio da „kako” i „zašto” budu ravnopravno zastupljeni, mada nije siguran koliko je u tome zaista i uspeo.

Izvesno je da se svi aspekti uređenja vodotoka ne mogu obuhvatiti i podjednako obraditi u jednoj knjizi. Srećom, ono što nedostaje, ili je ostalo nedorečeno, može se naći u velikom broju izvora na internetu (uz evidentan problem filtriranja prevelikog obima informacija). U tom kontekstu, da li će knjiga poput ove izdržati test vremena, tri su merila: koliko su ponuđene informacije za struku relevantne; koliko su te informacije razumljivo interpretirane i da li je ta interpretacija dovoljno uverljiva (zasnovana na sopstvenom iskustvu).

U pisanju svake knjige postoji psihološko ograničenje: „Opširna knjiga je veliko zlo” je izreka još iz antičkih vremena (aleksandrijski pesnik Kalimah). U današnje vreme interneta, ova izreka je aktuelnija nego ikad. I kod ove knjige je najveći problem bio kako redukovati ogromnu količinu raspoložive tehničke građe na ono što je za praksu uređenja vodotoka najpotrebnije. Od principa redukcije se ponegde svesno odstupilo, u cilju da se predoče *pravci razvoja struke*. To se odnosi na primenu probablističkih metoda koje sve više potiskuju tradicionalne determinističke postupke (empirijske obrasce), kao i na korišćenje 2D i 3D numeričkih modela, koji su nekad smatrani istraživačkom ekskluzivom, a danas su deo svakodnevnne prakse.

Konačno, treba priznati da pisanje ovakve knjige nije moguće bez značajnog „inostranog zajma” – strane literature (ovde uglavnom na engleskom jeziku). Trud je uložan da taj „zajam” bude: (i) razumljivo prezentiran i kroz numeričke primere proveren i (ii) doziran u meri koja neće načiniti knjigu pukom eklektičkom kompilacijom stranih izvora, već će dozvoliti da autorski rukopis bude prepoznat kroz knjigu u celosti.

Velika zahvalnost na pažljivoj redakciji teksta pripada recenzentima – profesorima Slobodanu Đorđeviću i Ljubodragu Saviću, kao i autorovim dugogodišnjim kolegama Dragutinu Pavloviću i Radomiru Kaporu. Zahvalnost dugujem i svim čitaocima koji mi budu skrenuli pažnu na propuste i ukazali na greške¹.

Beograd, decembar 2021.

Autor

¹mjovanov@grf.bg.ac.rs; mjovanov@sbb.rs

Konvencija pozivanja na Knjigu I:
„REGULACIJA REKA – rečna hidraulika i morfologija”, 2008.

<https://grafar.grf.bg.ac.rs/>
<https://www.grf.bg.ac.rs/~mjovanovic/>

Šifarnik

Knjiga I:	KI
Poglavlje-tačka:	KI-poglavlje.tačka Primer: KI-3.1 Knjiga I, poglavlje 3, tačka 1
Jednačine:	KI-poglavlje.tačka-(broj jednačine) Primer: KI-3.1-(3.5) Knjiga I, poglavlje 3, tačka 1, jednačina (3.5)
Slike:	KI-poglavlje.tačka-šifra slike Sl:broj slike Primer: KI-5.5.4.1-Sl:5.21 Knjiga I, poglavlje 5, tačka 5.4.1, Slika 5.21
Tabele:	KI-poglavlje.tačka-šifra tabele Tab:broj tabele Primer: KI-12.2.2.2-Tab:12.6 Knjiga I, poglavlje 12, tačka 2.2.2, Tabela 12.6
Dodaci:	KI-dodatak D:oznaka dodatka Primer: KI-D:C Knjiga I, Dodatak C

Sadržaj

Spisak oznaka

1	Regulacija reka kao hidrotehnička disciplina	1
1.1	Motivi uređenja vodotoka	1
1.2	Integralni pristup u regulaciji reka	4
1.3	Neizvesnosti i donošenje odluka	4
1.4	Planiranje u regulaciji reka	6
1.5	Izazovi i pravci razvoja	7
2	Projektovanje regulisanih reka	9
2.1	Uvodna razmatranja	9
2.2	Podloge	12
2.2.1	Hidrološke podloge	12
2.2.2	Topografske podloge	14
2.2.3	Hidrauličke podloge	22
2.2.4	Psamološke podloge	24
2.2.5	Geološko-geomehaničke podloge	36
2.2.6	Ekološke podloge	39
2.2.7	Ostale podloge	40
2.3	Regulacioni elementi	42
2.3.1	Izbor projektnog protoka	42

2.3.2	Uzdužni profil regulisanog korita	43
2.3.3	Poprečni profil regulisanog korita	47
2.3.4	Regulacione građevine	48
2.3.5	Trasa regulisanog korita	53
2.4	Provera stabilnosti korita	66
2.4.1	Procena pokretljivosti nanosa na dnu korita	66
2.4.2	Prognoza opšte deformacija korita	68
2.4.3	Prognoza lokalne deformacija korita	70
2.5	Višefazni projektni pristup	71
2.5.1	Niži (početni) nivo projektovanja	71
2.5.2	Standardni nivo projektovanja	73
2.5.3	Viši nivo projektovanja	76
2.6	Projektna dokumentacija	83
3	Regulacione građevine	89
3.1	Uvodna razmatranja	89
3.2	Materijali u regulaciji reka	89
3.2.1	Prirodni materijali	90
3.2.2	Veštački materijali	95
3.3	Obaloutvrde	101
3.3.1	Stabilnost obala	101
3.3.2	Konstruktivni elementi obaloutvrda	103
3.3.3	Obaloutvrde od kamena	104
3.3.4	Obaloutvrde od slaganih elemenata	138
3.3.5	Uticao talasa izazvanih vetrom	152
3.3.6	Uticao talasa izazvanih kretanjem brodova	159
3.3.7	Uticao leda	159
3.4	Prave paralelne građevine (PPG)	165

3.5	Naperi	167
3.5.1	Tipovi, položaj i funkcija napera	167
3.5.2	Dužina, visina i razmak napera	169
3.5.3	Naperi od kamena	173
3.5.4	Naperi od gabiona	176
3.5.5	Uticaj napera na strujno polje i stabilnost korita	176
3.6	Pregrade	192
3.6.1	Konstruktivni elementi pregrada	192
3.6.2	Hidraulički proračun	192
3.7	Kaskade	198
3.7.1	Visina i broj kaskada	198
3.7.2	Kaskade od gabiona	200
3.7.3	Tipске betonske kaskade	204
3.7.4	Stepenaste kaskade	206
3.8	Pragovi	208
3.8.1	Konstruktivni elementi pragova	209
3.8.2	Hidraulički proračun pragova	211
3.9	Specijalne građevine	216
3.10	Nasipi	220
3.10.1	Tipovi i funkcije nasipa	220
3.10.2	Trasa i razmak glavnih nasipa	222
3.10.3	Konstruktivni elementi nasipa	224
3.10.4	Analiza uticajnih fizičkih procesa	227
3.10.5	Nasip: hidrotehnički ili geotehnički objekat?	253
4	Regulacioni radovi	255
4.1	Uvodne napomene	255
4.2	Izgradnja i održavanje građevina	256

4.2.1	Obaloutvrde	256
4.2.2	Prave paralelne građevine	260
4.2.3	Naperi	261
4.2.4	Pregrade i kaskade	262
4.2.5	Pragovi	262
4.2.6	Nasipi	264
4.3	Biotehnički radovi	268
4.3.1	Uticaoaj biotehničkih radova	270
4.3.2	Zaštita obala	272
4.3.3	Zaštita inundacija i nasipa	273
4.4	Prosecanje krivina	275
4.5	Pregrađivanje i skretanje vodotoka	293
4.6	Uređenje ušća	297
4.7	Zaštita saobraćajnica	301
4.7.1	Lokalna erozija korita u zoni mostova	301
4.7.2	Osiguranje korita oko mostovskih stubova i oporaca	321
4.7.3	Osiguranje propusta	325
4.7.4	Zadržavanje nanosa pomoću taložnika	330
4.8	Bagerovanje	331
4.8.1	Pripremni radovi	331
4.8.2	Oprema i tehnologija rada	332
4.8.3	Odlaganje izbagerovanog materijala	338
5	Naturalno uređenje vodotoka	341
5.1	Rečni ekosistemi	342
5.1.1	Biljne i životinjske zajednice	343
5.1.2	Rečni biohemijski procesi	345
5.1.3	Uticaoaj režima voda	349

5.1.4	Uticaj regulacionih radova	350
5.2	Projektovanje i tehnička rešenja	351
5.2.1	Osnovna načela	351
5.2.2	Regulacione građevine	355
5.2.3	Kontrola uzdužnog nagiba dna korita	356
5.2.4	Riblje staze	361
5.3	Ekološki značaj inundacija	372
5.3.1	Upravljanje vodnim režimom	373
5.3.2	Očuvanje ekosistema	373
5.3.3	Ekonomsko-socijalni aspekti	373
5.3.4	Obnova inundacija	374
6	Zaštita od poplava	381
6.1	Uvodne napomene	381
6.2	Hidrološka neizvesnost velikih voda	383
6.3	Tipologija poplava	390
6.4	Investicione mere zaštite od poplava	392
6.4.1	Pasivna zaštita od poplava	393
6.4.2	Aktivna zaštita od poplava	416
6.4.3	Zaštita od poplava urbanih područja	423
6.4.4	Odbrana od ledenih poplava	427
6.5	Neinvesticione mere zaštite od poplava	430
6.5.1	Kartiranje rizika od poplava	431
6.5.2	Sistemi za ranu najavu poplava	449
6.5.3	Osiguranje od poplava	453
6.5.4	Upravljanje rizikom od poplava	457

7 Uređenje vodotoka u Srbiji	463
7.1 Pregled izvedenih regulacionih radova	463
7.2 Veliki hidrotehnički sistemi	466
Bibliografija	475
Dodaci	493
Registar pojmova	511

Spisak oznaka

<i>A</i>	konstanta, funkcija standardne normalne raspodele
<i>A</i>	površina poprečnog preseka [m ²]
	parametar brzine [-], godišnje izdvajanje [din/god]
<i>A_g</i>	površina geotekstila [m ²]
<i>A_r</i>	stepen suženja korita usled napera [-]
<i>a</i>	koeficijent
<i>B</i>	širina vodenog ogledala/korita [m], koeficejnt geotekstila
<i>BL</i>	razmak nasipa [m]
<i>B_T</i>	širina taložnika [m]
<i>BOD</i>	indikator biohemijskog kiseonika [mg/L]
<i>B_b</i>	širina bankine [m], širina bučnice [m]
<i>B_n</i>	širina nožice u dnu [m]
<i>B_p</i>	širina pravougaonog preлива [m]
<i>B_r</i>	regulaciona širina [m]
<i>B_s</i>	širina slapišta [m]
<i>b</i>	koeficijent, širina u dnu trapeznog preseka [m], dužina sante [m], debljina vodonosnog sloja [m]
<i>b_h</i>	širina otvora hvatača za vučeni nanos [m]
<i>b_n</i>	širina nožice u kruni [m]
<i>b_p</i>	prelivna širina na pločastom delu kamenog praga [m]
<i>b_s</i>	širina mostovskog stuba [m], dimenzija skretača [m]
<i>b_{kp}</i>	prelivna širina preko kamenih blokova na pragu [m]
<i>C</i>	Šezijev koeficijent [m ^{1/2} /s]
<i>C</i>	zapreminska koncentracija [-], parametar, centar krivine
<i>C_A</i>	parametar mostovskih oporaca [-]
<i>C_D, C_d</i>	koeficijent sile otpora [-]
<i>C_I, C_H</i>	korekcionni faktori kod propusta [-]
<i>C_L</i>	koeficijent uzgona [-]
<i>C_Q</i>	koeficijent protoka [-]
<i>C_V</i>	koeficijent brzine [-]
<i>COD</i>	indikator hemijskog kiseonika [mg/L]
<i>C_e</i>	koeficijent erozije [s/m]
<i>C_m</i>	masena koncentracija [kg/m ³]
<i>C_s, C_v, C_T</i>	parametri u obrascu Majnorda i dr.
<i>C*</i>	koncentracija određena standardnim hvatačem
<i>C_τ</i>	koeficijent tangencijalnog napona [-]
<i>Cov</i>	kovarijansa
<i>c</i>	konstanta, kohezija [Pa], brzina prostiranja talasa [m/s]
<i>D</i>	prečnik cilindričnog stuba [m], dubina bučnice [m] prečnik cevastog propusta [m]

D_s	prečnik stabla [m]
d	prečnik zrna [mm]
d_c	kritična krupnoća zrna za pokretanje nanosa [mm]
d_p	krupnoća zrna zastupljenosti p (10, 15, 60, 85, 90%) [mm]
d_{50}	srednja krupnoća zrna [mm]
E	kota energije [mnm], modul elastičnosti [Pa]
E_c	relativna greška merenja suspendovanog nanosa
e	osnova prirodnih logaritama
e	greška merenja
e_s	sistemska greška merenja
e_r	slučajna greška merenja
F	funkcija (raspodele, kumulativne frekvencije)
Fr	Frudov broj [-]
F	intenzitet hidrodinamičke sile [N], sila na nožicu [N/m]
FS, KS	faktor sigurnosti, koeficijent sigurnosti [-]
F_D	reaktivna sila konture na fluid [N]
F_L	Frudov broj bagerovanja [-]
F_a	dužina zaleta vetra [m], atheziona sila leda [N/m]
F_{ae}	efektivna dužina zaleta vetra [m]
F_d	sila ledenih santi [N]
F_x	komponenta sile u pravcu toka [N]
F_z	komponenta sile u vertikalnom pravcu [N]
f	funkcija frekvencije (gustine raspodele)
f	funkcija, frakcija granulometrijskog sastava, koeficijent trenja u suvom [-]
f'	koeficijent trenja pod vodom [-]
G	težina [N]
G_k	težina kamene obloge [kN/m]
G_n	težina nožice [kN/m]
G_x, G_z	komponente težine u horizontalnom i vertikalnom pravcu [N]
g	gravitaciono ubrzanje [m/s ²]
H	srednja profilska dubina [m], visina talasa [m] visina prelivnog mlaza [m]
H_n	visina nožice [m]
H_s	računski „značajna” visina talasa [m] visina skretača [m]
h	dubina toka [m]
h_d	visina kamenog bloka [m]
h_k	kritična dubina [m]
h_n	normalna dubina [m]
h_o	početna dubina, dubina neporemećenog toka [m] dubina nizvodno od propusta [m]
h_p	dubina na prelivu [m]
h_s	dubina erozije jame [m]

h_{cc}	karakteristična dubina stepenastog preliva [m]
h_{dv}	dubina donje vode kod propusta [m]
h_{ke}	eroziona dubina u krivini [m]
h_{se}	terminalna dubina erozije jame [m]
h_{max}	maksimalna dubina toka [m]
I	inercijalna sila [N]
I_d	uzdužni nagib dna po talvegu [-]
I_e	uzdužni nagib linije energije [-]
I_{em}	nagib linije energije u slučaju mešavine [-]
I_{esr}	osrednjeni nagib linije energije na pravolinijskoj deonici [-]
I_{dr}	regulacioni uzdužni nagib dna korita [-]
I_k	kritični uzdužni nagib dna [-]
I_r	regulacioni uzdužni nagib dna kod kaskada [-]
I_{Π}	uzdužni nagib linije nivoa [-]
i	indeks
j	indeks
K	faktor oblika kod mostovskih oporaca [-]
K_a	parametar u obrascu Majnorda i dr.
K_h	kalibracioni faktor hvatača vučenog nanosa
K_g	koeficijent filtracije u ravni geotekstila [m/s]
K_n	koeficijent filtracije kroz ravan geotekstila [m/s]
K_v, K_z	korekcionni faktori u proračunu talasa usled vetra
K_x, K_z	filtracioni koeficijenti u horizontalnom i vertikalnom pravcu [m/s]
k	apsolutna rapavost [m]
k_s	ekvivalentna peščana rapavost [m]
k_{vh}	parametar koncentracije nanosa
k_2	faktor nagiba obale [-]
L	dužina deonice [m], dimenzija sante leda [m] sadašnja vrednost gubitka za osiguranje [din]
L'	diskontovana nadoknada osiguranja [din]
L_T	dužina taložnika [m]
L_b	dužina bučnice [m]
L_e	dužina erozije jame [m]
L_k	dužina krila napera [m]
L_n	dužina napera [m]
L_o	dužina ukorenjenja građevine [m]
L_p	dužina prepusta temelja građevine [m]
L_r	dužina rampe [m]
L_s	dužina dostizanja ravnotežnog stanja, dužina slapišta [m], dužina mostovskog stuba [m], dužina skretača [m]
l	dužina deonice po talvegu, dužina sečice, razmak kaskada [m] dužina stepenice kod stepenastog preliva [m], dužina preseka [m]
M	broj mernih vertikalna, broj korenih vlakana

M^K	faktor oblika kamenog komada
M_s	masa suvog uzorka vučenog nanosa [kg]
m	eksponent, koeficijent nagiba kosine (ctg α_s), masa [kg], koeficijent protoka na prelivu [-]
m_g	jedinična masa geotekstila [kg/m ²]
N	broj: mernih podataka, uzoraka, godina
N_P	parametar u obrascu Randa
N_s	broj površinskih skretača
n	Maningov koeficijent otpora [m ^{-1/3} s]
n_r	Maningov koeficijent apsolutne rapavosti [m ^{-1/3} s]
O	okvašeni obim [m]
O_{95}	karakteristična veličina pora geotekstila [mm]
P	funkcija raspodele - verovatnoća, visina kaskade/pregrade [m]
p	sila hidrostatičkog pritiska [N], premija osiguranja [din] pritisak u tački [Pa], zastupljenost, stepen zagušenja visina praga/bloka u slapištu [m]
p_v	porni pritisak [Pa]
Q	protok vode [m ³ /s]
Q_k	protok u kineti [m ³ /s]
Q_p	protok na prelivu, protok u prosečenom koritu [m ³ /s]
Q_r	redukovani protok vode [m ³ /s]
Q_{st}	protok u starom koritu (posle prosecanja) [m ³ /s]
Q_{mv}, Q_{sv}, Q_{vv}	protok male, srednje i velike vode [m ³ /s]
Q_{max}	vršni protok poplavnog talasa [m ³ /s]
Q_v, Q_{vm}	pronos vučenog nanosa u profilu: <i>zapreminski</i> [m ³ /s], <i>maseni</i> [kg/s]
$Q_{v,max}$	maksimalni pronos vučenog nanosa [m ³ /s; kg/s; N/s]
$Q_{v,ul}/Q_{v,iz}$	ulazni/izlazni pronos vučenog nanosa
Q_s, Q_{sm}	pronos suspendovanog nanosa u profilu: <i>zapreminski</i> [m ³ /s], <i>maseni</i> [kg/s]
q	jedinični protok vode [m ³ /(s m)]
q_v, q_{vm}	jedinični pronos vučenog nanosa: <i>zapreminski</i> [m ³ /(s m)], <i>maseni</i> [kg/(s m)]
q_s, q_{sm}	jedinični pronos suspendovanog nanosa: <i>zapreminski</i> [m ³ /(s m)], <i>maseni</i> [kg/(s m)]
q_g	jedinični protok u ravni geotekstila [m ² /s]
q_n	jedinični protok kroz ravan geotekstila [m ² /s]
R	hidraulički radijus [m], rezultanta sila koje deluju na zrno [N] izdizanje nivoa usled vetra [m], rizik
R_k	poluprečnik krivine [m]
R_n	izdizanje talasa usled vetra po glatkoj površi
R_{ko}	projektni poluprečnik krivine [m]
RSE	relativna standardna greška
r	kamatna stopa [-]

r_k	zakrivljenost ($1/R_k$) [m^{-1}]
r_n, r_β, r_b	parametri u proračunu talasa usled vetra
S	indeks meandriranja, razmak naper [m], koeficijent akumulisanja snaga pumpe [kW], šteta [din]
SE	standardna greška
S_u	koeficijent uniformnosti tla [-]
S_{max}	maksimalna (totalna) šteta [din]
s	standardna devijacija, razmak cevastih šipova [m] visina stepenice kod stepenastog preliva [m]
T	povratni period [god], troškovi [din], intenzitet sile trenja [N] dužina tangente [m], transmisivnost porozne sredine [m^2/s]
T_E	parametar efikasnosti taložnika [-]
TI	parametar u obrascu Escarameia i Mej
TOC	indikator ukupnog organskog ugljenika [mg/L]
T_n	sila trenja na dnu nožice po jedinici dužine [N/m]
t	vreme [s]
U	neizvesnost
U_{cr}	kritična brzina filtracionog toka [m/s]
u	lokalna brzina u pravcu toka [m/s]
u_d	lokalna brzina toka na visini zrna na dnu [m/s]
u_{dc}	kritična lokalna brzina pokretanja zrna [m/s]
u_*	lokalna smičuća brzina u pravcu toka [m/s]
u_{*c}	kritična smičuća brzina [m/s]
\tilde{u}	srednja brzina po dubini u pravcu toka [m/s]
V	srednja profilska brzina toka [m/s] vrednost materijalnih dobara [din]
V_a	brzina vetra [m/s], brzina merodavna za armirajući sloj [m/s]
V_c	kritična brzina za pokretanje zrna [m/s]
V_m	brzina tečenja mešavine [m/s]
V_n	brzina toka koji deluje na naper [m/s]
V_r	relativna brzina [m/s]
V_*	srednja profilska smičuća brzina [m/s]
v	lokalna brzina u y pravcu [m/s], filtraciona brzina [m/s]
v_b	brzina pri dnu u proračunu gabiona [m/s]
v_{bc}	kritična brzina pri dnu u proračunu gabiona [m/s]
v_f	brzina filtracije [m/s]
\dot{W}	brzina tonjenja zrna [m/s]
wL	granica tečenja tla
x	koordinatni pravac glavnog toka, broj realizacije događaja
y	koordinatni pravac u ravni poprečnog preseka
z	vertikalni koordinatni pravac
z	promenljiva standardne normalne raspodele [-]
z_d	kota dna [mm]
Z	kota slobodne površine [mm]

Z_{mv}, Z_{sv}, Z_{vv}	kota male, srednje, velike vode [mm]
Z_n	kota krune nasipa [mm]
Z_p	kota krune preliva [mm]

Grčki simboli:

α	ugao [$^\circ$], faktor štete [-]
α_d	ugao koji linija dna zaklapa sa horizontalom [$^\circ$]
α_s	ugao koji kosina obale zaklapa sa horizontalom [$^\circ$]
α_t	koeficijent intenziteta turbulencije [-]
β	centralni ugao kružnog luka [$^\circ$], parametar Veibulove raspodele, napadni ugao vetra, ugao sistema skretača sa osovinom toka [$^\circ$]
γ_v	ugao [$^\circ$]
Δ	priraštaj, relativna gustina nanosa [-]
Δp	priraštaj verovatnoće
Δt	vremenski korak [s]
δ	ugao [$^\circ$], debljina geotekstila [m], debljina ledenih santi [m] prečnik cevastog šipa [m]
ε_s	jedinični maseni pronos erodiranog materijala [kg/(s m ²)]
φ	napadni ugao toka na stub pravougaone osnove [$^\circ$]
η	parametar u proračunu napera [-], koef. korisnog dejstva pumpe [-]
Θ	bezdimenzioni tangencijalni napon (Šildsov broj)
Θ_c	kritični Šildsov broj [-]
Θ'_c	korigovani kritični Šildsov broj [-]
Θ_{rel}	relativni Šildsov broj [-]
Θ_g	transmisivnost geotekstila [m ²]
$\Theta_{o,e}$	efektivni Šildsov broj na rečnom dnu
$\Theta_{s,e}$	efektivni Šildsov broj na kosini obale
θ	inklinacioni ugao napera [$^\circ$]
κ	fon Karmanova konstanta [-]
Λ	talasna dužina [m]
λ	Darsi-Vajsbahov koeficijent [-]
λ_g	poroznost geotekstila [-]
λ_o	poroznost tla [-]
μ	koeficijent viskoznosti [Ns/m ²], eksponent rasporeda brzine
ν	kinematički koeficijent viskoznosti [m ² /s]
Π	pijezometarska visina [m]
ξ	koeficijent lokalnog gubitka [-]
ξ_p	parametar talasnog prelamanja [-]
ρ	gustina vode [kg/m ³]
ρ_a	gustina vazduha [kg/m ³]
ρ_m	gustina mešavine vode i nanosa [kg/m ³]

ρ_s	gustina nanosa [kg/m ³]
σ	standardna devijacija, korekcionni faktor, faktor ovazdušenja koeficijent potpoljenosti preлива
σ_g	geometrijska standardna devijacija
σ_f	čvrstoća na zatezanje leđa [Pa]
σ_n	normalni napon [Pa]
τ	lokalni tangencijalni napon [Pa]
τ_c	kritični tangencijalni napon za eroziju [Pa]
τ_o	tangencijalni napon na dnu [Pa]
τ'_o	redukovani tangencijalni napon na dnu [Pa]
τ_{oc}	kritični tangencijalni napon na dnu [Pa]
$\tau_{o,r}$	tangencijalni napon u ravnotežnim uslovima [Pa]
$\tau_{o,doz}$	smičuća nosivost podloge za travu [Pa]
τ_s	tangencijalni napon na kosini obale [Pa]
τ_{sc}	kritični tangencijalni napon na kosini [Pa]
Φ	funkcija hidrauličkog skoka
Φ_p	koeficijent ugradnje (pakovanja) kamena [-]
Φ_T	faktor stabilnosti kamena pri udaru talasa
ϕ	ugao unutrašnjeg trenja [°]
ϕ'	efektivni ugao unutrašnjeg trenja [°]
Ψ_g	permitivnost geotekstila [s ⁻¹]
Ω	površina u planu [m ²]

Specijalni simboli:

∇	zapremina [m ³]
∇_a	zapremina talasa zadržanog u akumulaciji [m ³]
∇_n	zapremina kamene nožice [m ³ /m]
∇_r	zapremina retenzije [m ³]
∇_s	zapremina uzorka vučenog nanosa [m ³]
-	osrednjavanje po vremenu, osrednjavanje po dužini vodotoka, aritmetička sredina, poznata vrednost
~	osrednjavanje po dubini toka
~	osrednjavanje po poprečnom preseku
^	naznaka težišnog odstojanja
*	razmera

Glava 1

Regulacija reka kao hidrotehnička disciplina

Regulacija reka (uređenje vodotoka) je hidrotehnička disciplina koja obuhvata: izučavanje reka, projektovanje i sprovođenje tehničkih i drugih mera u cilju stabilizacije rečnog korita, zaštite priobalja od poplava i očuvanja rečnih ekosistema. Kao grana vodoprivrede, regulacija reka podrazumeva organizovano delanje na vodama u cilju intenzivnog, planskog i regionalnog upravljanja vodnim resursima.

1.1 Motivi uređenja vodotoka

Uređenjem vodotoka stižu se uslovi za razvoj niza vodoprivrednih oblasti, kao što su: plovidba, hidroenergetika, vodosnabdevanje, navodnjavanje i odvodnjavanje. Iz integralnog pristupa u realizaciji vodoprivrednih ciljeva, proizilaze motivi i načini regulacije reka:

1. stabilizacija korita i povećanje njegove propusne moći za vodu, led i nanos;
2. zaštita od poplava;
3. plovidba;
4. zaštita infrastrukturnih i drugih objekata;
5. uređenje obala u urbanim sredinama;
6. snabdevanje vodom;
7. hidrotehničke melioracije (odvodnjavanje i navodnjavanje);
8. očuvanje rečnih ekosistema i stvaranje uslova za turizam i rekreaciju.

Stabilizacija korita i povećanje njegove propusne moći za vodu, led i nanos. Stabilizacija korita podrazumeva mere za sprečavanje erozije/zasipanja dna i zaštitu obala od erozije. Tu spada i uređenje rečnih ušća. Povećanje propusne moći korita za vodu, led i nanos, podrazumeva korekciju trase rečnog korita, njegovog uzdužnog nagiba dna i dimenzija poprečnog preseka. Navedene korekcije se postižu zemljanim radovima i izgradnjom regulacionih građevina. Uspešnost radova zavisi od njihovog sistematskog izvođenja, a funkcionalnost građevina, od dobrog projektovanja i redovnog održavanja. Sporadični i lokalni zahvati (diktirani nedostatkom finansijskih sredstava), po pravilu ne daju željene efekte.

Zaštita od poplava. Reč je o najčešćem i najvažnijem motivu regulacije reka, koji je, direktno ili indirektno, uključen u sve ostale motive. Mogu se primeniti pasivne i aktivne mera zaštite, od kojih se prve odnose na izgradnju nasipa, a druge, na izgradnju akumulacija i retenzija za prihvatanje viška velikih voda.

Ekonomski i socijalni razlozi za ovu vrstu regulacionih radova proizilaze iz potrebe smanjenja šteta izazvanih poplavama. Polazeći od hidrološke studije slivnog područja i hidrauličke studije predmetne rečne deonice, kao i tehničko-ekonomskih analiza, usvaja se optimalni stepen zaštite od poplava za unapred usvojene projektno velike vode. Optimizacija se zasniva na upoređenju cene uređenja vodotoka sa dobitima koje čini odsustvo ili smanjenje štete od plavljenja. Pri tome se uzimaju u obzir određena ograničenja (prostorna, finansijska, ekološka i dr.).

Plovidba. Uređenje vodotoka za potrebe plovidbe podrazumeva obezbeđenje: (a) kontinuiteta plovidbe u toku navigacionog perioda u pogledu neophodne dubine i širine plovnog puta, (b) sigurnosti plovidbe sa stanovišta trase i obeležavanja plovnog puta i (c) optimalne brzine plovidbe sa stanovišta eksploatacionih troškova flote¹.

Za dokazivanje opravdanosti uređenja reka za potrebe plovidbe koriste se studije gravitacionog područja (robnih tokova i količina tereta), komplementarnosti sa suvozemnim vidovima saobraćaja, kao i raznih netehničkih aspekata projekta. Na osnovu varijantnih rešenja, traži se ekonomski optimalno rešenje unutar zacrtane strategije razvoja plovnog puta. Kako se sa povećanjem robnog prometa i gabarita plovnih sredstava, plovidbeni uslovi menjaju tokom vremena, regulacioni radovi se moraju fazno realizovati. Pri tome su na raspolaganju dve mogućnosti: regulacija reke u njenom prirodnom režimu (uglavnom bagerovanjem) ili kanalisanje reke izgradnjom brana, čime se ona dovodi u veštački (dirigovani) režim protoka i nivoa.

Regulacija plovne reke u poprečnom preseku i planu je uslovljena hidrološkim i morfološkim uslovima: opsegom zagwarantovanih plovih protoka i kota nivoa, kao i minimalnim poluprečnikom krivine za merodavna plovila. Održivost radova i građevina se dokumentuje hidrauličkim, psamološkim i morfološkim proračunima.

Zaštita infrastrukturnih i drugih objekata. Regulacione radove u zoni ukrštanja vodotoka sa suvozemnim saobraćajnicama – prugama i putevima, karakteriše lokalni karakter. Radi se najčešće o zaštiti kosine i nožice nasipa saobraćajnice od erozionog dejstva toka, kao i o zaštiti mostovskih stubova od potkopavanja.

Specifično je uređenje kanalisanih vodotoka, pregrađenih sistemom brana, sa hidroelektranama i pratećim objektima. Kao posledica formiranja uspora, uzvodno od

¹Dobar primer je reka Dunav - međunarodni plovni put o kome se stara Dunavska Komisija sa sedištem u Budimpešti. Ovo telo je na osnovu detaljnih tehničko-ekonomskih analiza propisalo plovni gabarit u odnosu na usvojene kote „niskog plovnog nivoa”: minimalnu dubinu 2,5 m, minimalnu širinu 180 m i minimalni poluprečnik krivine 800 m. Na našem sektoru Dunava, u većem delu godine mogu da plove barže nosivosti 1500 t, dužine 77 m, širine 11 m i najveće dubine gaza 2,63 m.

svake brane se javlja zasipanje korita nanosom, pa se regulacioni radovi sastoje od bagerovanja. Nizvodno od brane se javlja dubinska erozija korita usled velike brzine vode koja se ispušta kroz turbine, temeljni ispušt ili preko preliva, pa se regulacioni radovi sastoje od oblaganja korita i obala kamenom (nizvodno od slapišta). Po potrebi se može pristupiti produbljenu korita bagerovanjem, u cilju povećanja denivelacije i instalisane snage agregata, ili poboljšanja plovidbenih uslova.

Uređenje obala u urbanim sredinama. Pored tehničko-ekonomskih uslova pri izboru regulacionih elemenata (trase, oblika i dimenzija poprečnog preseka), kod ovog vida regulacije se uzimaju u obzir i estetski kriterijumi u pogledu izbora materijala za oblaganje obala.

Za razliku od ruralnih područja, gde je stepen zaštite od plavljenja tipično do kote 100-godišnje velike vode, u naseljima se, zbog visine potencijalne štete, predviđa mnogo veći stepen zaštite, do kota nivoa tipičnih povratnih perioda 500, 1000, pa čak i 10000 godina.

Snabdevanje vodom. U ovom slučaju, regulacija vodotoka ima lokalni karakter i uglavnom se svodi na izgradnju vodozahvata iz koga se rečna voda otprema do korisnika. Vodozahvat se obično nalazi na obali, dok se u koritu mogu naći pomoćne građevine za skretanje i koncentrisanje toka, ili lokalno povećanje dubine (pragovi, skretači i dr.) Projektovanje vodozahvata se mora zasnivati na analizi dugoročnih promena korita – položaja krivina i kota dna, kao se ne bi desilo da, usled produbljenja ili migracije korita, vodozahvat ostane na „suvom”.

Hidrotehničke melioracije (odvodnjavanje i navodnjavanje). Reka je recipijent u koga voda, direktno ili indirektno (pomoću mreže za odvodnjavanje), dospeva sa određenog područja. U zavisnosti od kote nivoa vode u reci, odvodnjavanje može biti gravitaciono ili pumpanjem. Gravitaciono odvodnjavanje često zahteva sniženje postojeće kote nivoa (dubine) u reci. To se postiže prosecanjem krivina² (povećanjem uzdužnog nagiba dna korita), povećanjem veličine poprečnog preseka (bagerovanjem) i uklanjanjem vegetacije iz korita (smanjenjem otpora).

Očuvanje rečnih ekosistema, turizam i rekreacija. U novije vreme se jako vodi računa da uređenje vodotoka ne naruši prirodni ambijent i vodenu floru i faunu. Time se stvaraju uslovi za razvoj turizma i rekreacije, pri čemu se sve to usklađuje sa drugim motivima regulacije reka (vodosnabdevanje, poboljšanje kvaliteta vode, zaštita od poplava itd.). Iako se očuvanje rečnih ekosistema i rekreacija teško mogu novčano kvantifikovati, ovi aspekti regulacije reka su bitni za unapređenje kvaliteta života³.

²Prosecanjem krivina na Velikoj Moravi je skraćena trasa za oko 30%, čime su poboljšani uslovi za odvodnjavanje i evakuaciju velikih voda, ali je izazvana i nepovoljna regresivna dubinska erozija korita.

³Primeri kod nas su pregrađeni rukavci u cilju formiranja rekreativnih površina na vodi – jezero kod Ade Ciganlije na Savi u Beogradu i Srebrno jezero na Dunavu kod Velikog Gradišta.

1.2 Integralni pristup u regulaciji reka

Tradicionalni pristup je tretirao regulaciju neke rečne deonice kao izolovanu hidrotehničku aktivnost, preduzetu za račun određenog investitora na lokalnom nivou. Savremeni pristup nalaže *integralno* uređenje vodotoka, sa rešenjem koje treba istovremeno da zadovolji potrebe više vodoprivrednih korisnika na širem slivnom području, uz ispunjenje ekoloških i socioloških zahteva. To nužno povlači za sobom učešće i nekih inženjerskih disciplina (biologije, ekologije, sociologije), što regulaciji reka daje interdisciplinarni karakter i nalaže uključenje stručnjaka raznih profila.

U tehničkom smislu, integralno uređenje vodotoka garantuje da su na optimalan način pomireni interesi svih potencijalnih korisnika, a u ekonomskom, da se troškovi izgradnje mogu raspodeliti na pojedine vodoprivredne grane u skladu sa njihovim investicionim potencijalom i očekivanom dobiti od korišćenja regulisanog vodotoka.

Očuvanje ekološkog diverziteta je postalo veoma važan element integralnog uređenja vodotoka. Na duži rok, ekološka zaštita je pitanje opstanka u globalnim razmerama. To nameće nove ciljeve na planu zaštite voda i upravljanja vodnim režimom, pa se inženjerska rešenja sada obavezno valorizuju i sa stanovišta ekološke održivosti. Zahtevi očuvanja flore i faune usmeravaju klasičnu regulaciju malih vodotoka u pravcu „naturalnog uređenja”. Kasnije će se videti da osnovni principi ovakvog uređenja obuhvataju: očuvanje krivolinijske trase regulisanog korita, napuštanje tradicionalnih trapezних poprečnih profila i materijala kao što su beton i čelik, dopuštanje periodičnog plavljenja inundacija kao dragocenih biljnih i životinjskih staništa itd.

1.3 Neizvesnosti i donošenje odluka

Složenost bavljenja regulacijom reka proizilazi iz brojnih neizvesnosti vezanih za poznavanje prirodnih fluvijalnih procesa, obim i kvalitet prikupljenih podloga, pouzdanost primenjenih računskih postupaka i mogućnost procene posledica (morfoloških, ekoloških, socijalnih) razmatranog projektnog rešenja.

Regulacija reka je suočena sa brojnim neizvesnostima koje proističu iz slučajnog karaktera hidrauličkih, psamoloških i morfoloških procesa koji istovremeno utiču na formiranje rečnog korita. Uvek je prisutno pitanje u kojoj meri je reprezentativnost, obim i kvalitet podloga (hidroloških, psamoloških i drugih) u stanju da omogući dovoljno pouzdanu izučenost tako složenih prirodnih procesa.

Za opisivanje oblika rečnog korita mogu se primeniti jednostavne statističke metode (KI-14.3) ili složene morfodinamičke analize (KI-12.2). Statistički pristup ne ulazi u fiziku pojave, već se korelacijom geometrijskih parametara korita (srednje dubine, širine, poluprečnika krivine itd.) dolazi do trendova u razvoju korita, što pomaže u identifikaciji nestabilnih deonica i izboru regulacionih mera. Statističke analize nemaju svrhu ako je rečno korito prethodim radovima (npr. prosecanjem krivina)

već izmenjeno, ili ako je prirodni režim vodotoka (hidraulički i psamološki), bitno izmenjen kanalisanjem (pregrađivanjem) vodotoka. U tom slučaju se u projektovanju moraju koristiti računski ili fizički modeli.

Pouzdanu numeričku ili laboratorijsku simulaciju psamološko-morfološkog režima nije lako ostvariti. Pronos vučenog nanosa se može računati pomoću velikog broja empirijskih obrazaca, zasnovanih na merenjima u laboratorijskim kanalima pod kontrolisanim, jednostavnim konturnim uslovima (KI-10.3). Ti obrasci, koji daju „transportni kapacitet” vodotoka za nanos (KI-10.2) u tzv. „ravnotežnim uslovima” (kada nema deformacije korita), nemaju univerzalnu upotrebljivost i zahtevaju kalibraciju. Ona se zasniva na skupim merenjima na terenu, koje nije moguće obaviti u periodima velikih voda kada je pronos nanosa najveći. Ekstrapolacija pronosa nanosa nije mnogo pouzdana i predstavlja izvor dodatne neizvesnosti.

Mehanizmi kretanja suspendovanog nanosa su relativno dobro izučeni, tako da se raspored koncentracije nanosa po dubini toka može relativno pouzdano utvrditi (KI-11.3). Međutim, za proračun transportnog kapaciteta vodotoka za suspendovani nanos, praksa se, kao kod vučenog nanosa, oslanja na empirijske obrasce (KI-11.5).

Imajući u vidu da proračune pronosa nanosa komplikuje mnoštvo uticajnih faktora (neprizmatičnost korita, neuniformnost krupnoće nanosa, sekundarna strujanja itd.), jasno je da su rezultati tih proračuna upotrebljivi u kvalitativnom smislu, ali da ne predstavljaju apsolutno sigurne vrednosti.

Neizvesnosti nisu samo prisutne u pogledu ponašanja rečnog sistema, već i u sferi teško predvidljivih socijalno-ekonomskih odnosa. Kako je u pitanju velika investiciona vrednost radova, donošenje odluka treba utemeljiti na detaljnim analizama i studijama, na kojima se ne sme štedeti. Problem je utoliko složeniji što su rešenja uslovljena nekim zahtevanim stepenom sigurnosti, a prirodni procesu su toliko složeni da je čak teško i proceniti koji je stepen sigurnosti neophodan da kompenzuje neizvesnosti ili manjkavost projektnih podloga.

U takvim okolnostima postavlja se pitanje kako da postupi inženjer koji se bavi regulacijom reka? Da li je dovoljno da razmotri dominantne uticaje i koristi jednostavnije računске postupke sa raspoloživim fondom ulaznih podataka, ili da koristi složenije računске modele, koji bolje simuliraju ponašanje sistema, ali uz rizik da obim i kvalitet ulaznih podataka kompromituje verodostojnost rezultata? Drugim rečima, postavlja se pitanje gde je prihvatljiva mera usložnjavanja problema sa stanovišta pouzdanosti projektnog rešenja?

Razmotrimo ovo na primeru zaštite od poplava. Kada se uređenje vodotoka koncipira isključivo na hidrološkim informacijama (povratni period, merodavna velika voda), domet projekta je relativno ograničen. Kada se analiza proširi i na eroziju korita usled poplava, neophodni su dodatni podaci o karakteristikama i pronosu

nanosa, nanosnim formacijama i aluvijanim otporima itd. Ako se nivo projekta dodatno usmeri u pravcu socijalno-ekonomskih posledica poplava, onda se moraju uzeti u obzir i štete od poplava, odnosno moraju se uvesti relevantni ulazni podaci: namena površina, cena useva, cena sanacije stambenih i infrastrukturnih objekata itd. Još viši nivo analize obuhvata ekološke uticaje, kao i druge faktore, kao što su: planiranje urbanog i ruralnog razvoja, očuvanje ambijentalnih vrednosti itd. Sve to nije jednostavno, jer se mnogi uticajni faktori teško mogu kvantifikovati.

Izloženo pokazuje da se inicijalno jednostavan projekat odbrane od poplava, zasnovan na izboru merodavnog povratnog perioda, može postepeno širiti u mnogim pravcima životne realnosti, sa bezbroj neizvesnosti. Stoga je u težnji ka što sveobuhvatnijem uređenju vodotoka, treba iznaći pravu meru racionalnosti, kako se ne bi otišlo u krajnost i došlo u situaciju da, usled prevelikih neizvesnosti, nijedno projektno rešenje ne bude dovoljno pouzdano.

1.4 Planiranje u regulaciji reka

Kao u drugim inženjerskim oblastima, planiranje u regulaciji reka zahteva prikupljanje mnoštva ulaznih podataka na nivou slivnog područja, hidrografske mreže i vodotoka koji je predmet regulacije.

Na nivou sliva, neophodni su podaci o klimatsko-hidrološkom režimu i geotehničkim karakteristikama. Na nivou vodotoka, neophodni podaci obuhvataju karakteristike korita (uzdužni nagib dna, zakrivljenost, obraslost obala i dr.). Prikupljanje i obrada ulaznih podataka (podloga) je bazična delatnost u planiranju regulacionih radova.

Specifikacija regulacionih radova je naredni korak u planiranju. Karakter ovih radova zavisi od motiva uređenja vodotoka. U optičaju je čitav kompleks radova, kao što su: fiksiranje uzdužnog nagiba dna, zaštita obala od erozije, prosecanje krivina, izgradnja nasipa, retenzionih bazena i rasteretnih kanala, bagerovanje itd.

Planiranje je bitno i kod rešavanja lokalnih problema, kao što su na primer: sprečavanje erozije obala u krivinama, otklanjanje uskih grla za evakuaciju velikih voda (posebno ledenih barijera), lokalno nadvišenje nasipa, uređenje ušća, zaštita mostovskih stubova i oporaca od potkopavanja itd. Složenost linijskih i lokalnih problema iziskuje razmatranje varijantnih rešenja, a put do optimalnog rešenja prikazan je na Slici 1.1.

Već je ukazano na to da zaštita životne sredine postaje neodvojiva od planiranja tehničkih zahvata. Polazi se od postulata da je održivo uređenje vodotoka ono koje predviđa najmanju promenu prirodnog rečnog sistema. Čak se predviđa i mogućnost odustajanja od regulacionih mera ako je to u interesu očuvanja prirode za buduće generacije. Step en ekološke očuvanosti meri se uticajem na stanovništvo, biljne i životinjske vrste, tlo, vodu i pejzaž. Tome se pridodaje i zaštita istorijsko-kulturnog nasleđa.



Slika 1.1: *Put do izbora optimalne regulacione građevine, čija su zahtevana tehnička svojstva: stabilnost, dugotrajnost, sigurnost, ekonomska opravdanost, ekološka i socijalna prihvatljivost* [199].

Planiranje regulacionih radova se ne može zamisliti bez ekonomskog vrednovanja. U analizi se koriste rezultati diskontnog računa [295], a radni vek regulacionih građevina se razmatra za sistem u celini.

1.5 Izazovi i pravci razvoja

U prošlosti se regulacija reka uglavnom oslanjala na iskustvene preporuke, a danas je to napredna inženjerska disciplina, teorijski zasnovana na rečnoj hidraulici i morfologiji [117, 133]. U izučavanju kretanja vode i nanosa, kao i morfodinamike rečnog korita, koriste se napredne tehnike merenja na terenu, složeni računski modeli i laboratorijska ispitivanja. Ubrzan razvoj računarskih resursa zadnjih decenija je praćen širokom dostupnošću komercijalnog softvera. Danas je nemoguće zamisliti inženjera koji u svom svakodnevnom radu ne koristi mnoštvo softverskih alata.

U projektima regulacije reka se tradicionalno koriste modeli linijskog tečenja, ali je sve više prisutno korišćenje i višedimenzionih (2D i 3D) modela, kao moćnih alata podrške pri odlučivanju. Značajan je i napredak u ekperimentalnim tehnikama i razvoju merne opreme. Geodetske podloge se danas standardno formiraju pomoću sredstava daljinske detekcije (laserskim snimanjem iz vazduha), a snimanje korita se obavlja pomoću višezračne („multibeam”) ehografije i akustične dopler (ADCP) tehnologije. Ova tehnika se koristi i za snimanje polja brzine i koncentracije suspendovanog nanosa, a u velosimetriji je sve prisutnija i digitalna obrada video zapisa. O svemu ovome, detaljnije će se govoriti u narednim poglavljima.

U povratnoj sprezi, novi uređaji i tehnologije utiču na promenu ciljeva istraživanja i projektovanja. Javljaju se novi zahtevi u pogledu podloga za projektovanje. Na primer, za rečnu hidrauliku je aktuelno istraživanje otpora vegetacije i difuzionih koeficijenata za količinu kretanja, toplotu i koncentraciju suspendovanog nanosa, što zahteva složena terenska merenja. Ekološka i socijalna dimenzija savremenog uređenja vodotoka zahteva biološke, sociološke i druge vrste (do sada nedovoljno istraženih i korišćenih) podloga. Raznovrsnost ciljeva čini da metode projektovanja postaju sve složenije, a uređenje vodotoka, u celini, sve zahtevnije.

Zahvaljujući novim materijalima i tehnologijama, izgradnja regulacionih objekata takođe doživljava veliki napredak. Na primer, primena sintetičkih materijala, posebno geotekstila, veoma olakšava i ubrzava regulacione radove. Primena gabiona kao gradivnih elemenata za razne tipove regulacionih građevina, može značajno smanjiti troškove. Građevine od prirodnih materijala (kamena i drveta) u kombinaciji sa priobalnom vegetacijom čine osnovu tzv. „bioloških mera” zaštite obala od erozije, u skladu sa ekološko-estetskim zahtevima uređenja malih vodotoka. Takav pristup ima i ekonomske prednosti u odnosu na konvencionalna rešenja u vidu obaloutvrda od kamena ili betona.

U urbanim područjima se sve više uvode razni mobilni sistemi zaštite od poplava. Najzad, tu je i osavremenjavanje radova na plovnim rekama; na primer, popunjavanje proloka i stabilizaciju korita olakšava i ubrzava nova, ekonomičnija tehnologija koja se sastoji u potapanju plastičnih vreća punjenih peskom pomoću hidrociklona na plovilu. Novi plovni bageri velikog kapaciteta imaju ključnu ulogu u održavanju plovnih gabarita, a deponovanje izbagerovanog materijala je uslovljeno ispunjavanjem strogih uslova zaštite životne okoline. O svemu tome će se detaljnije govoriti u narednim poglavljima.

Glava 2

Projektovanje regulisanih reka

2.1 Uvodna razmatranja

Regulacija reka kao inženjerska disciplina suočena je sa problemom različitih vremenskih razmera u kojima se odvijaju prirodni procesi. Vremenska razmera hidroloških i hidrauličkih pojava je relativno kratka i meri se danima, nedeljama i mesecima. Ona je isuviše kratka u odnosu na vremensku razmeru rečnih geomorfoloških promena, koja se meri desetinama i stotinama godina. Zato se u projektovanju regulacionih radova mora imati u vidu da postoji značajan vremensko razilaženje između hidrološko-hidrauličkih uzroka i morfoloških posledica. U rekama se odvija više paralelnih procesa započetih u raznim periodima, a kako je zavisnost između brzine toka i kretanja nanosa izrazito nelinearna, ti procesi su povezani na veoma komplikovan način. Mnogi su i nedovoljno istraženi¹.

Regulacija reke može imati *lokalni* karakter – na kratkom potezu – kada se morfološke posledice regulacionih radova ne osećaju uzvodno i nizvodno od mesta intervencije, ili *opšti* karakter, kada morfološke posledice pogađaju vodotok na velikoj dužini. Bez obzira na prostornu razmeru, neophodno je da se intervencijama pristupi oprezno i da se tokom realizacije projekta (a i kasnije) prate efekti izvedenih radova. Kada je u pitanju vremenska razmera, morfološke promene mogu biti:

- (i) *kratkoročne*, oko nekog ravnotežnog stanja (KI-11.8, KI-12.2.2.2, KI-14.2), kada deformacija korita prati trenutne varijacije protoka; reč je o sezonskim promenama neprizmatičnosti korita i njegovog uzdužnog nagiba dna;
- (ii) *dugoročne* (i jednosmerne), ka uspostavljanju potpuno novog ravnotežnog stanja rečnog korita, kao odgovor reke na ljudskom delatnošću izazvanu promenu hidrauličkog režima.

¹U širem kontekstu, može se reći da je numerička reprezentacija fizičkog polja sila (gravitacione, elektromagnetne i dr.), samo aproksimacija stvarnosti, jer su osnovnim jednačinama računskog modela obuhvaćene samo sile koje znamo ili koje su dominantne, a po strani ostaju uticaji kojih nismo svesni ili koji su u datom problemu od sekundarnog značaja.

Projektne aktivnosti. U regulaciji reka, projektovanje obuhvata:

1. proračun i analizu hidrauličko-psamološkog režima i morfologije vodotoka pre regulacionih radova;
2. projektovanje regulacionih elemenata novog korita (trase, uzdužnog i poprečnog profila) shodno postavljenim ciljevima, poštujući određene tehničke i netehničke kriterijume, standarde i ograničenja;
3. projektovanje regulacionih građevina, uključujući njihove dimenzije, konstruktivne karakteristike i troškove izgradnje i održavanja;
4. proračun i analizu hidrauličko-psamološkog režima i trenda morfoloških promena posle regulacionih radova, uključujući proveru dugoročne održivosti regulisanog korita i očuvanja ekološke raznovrsnosti.

Već je rečeno da su današnje projektantske mogućenosti značajno unapređene tehnološkim razvojem. Međutim, i dalje je prisutno pitanje pouzdanosti rezultata hidrauličko-psamoloških proračuna, kao i mogućnosti predviđanja morfološkog „odgovora” reke na projektovane zahvate. Ono što je sigurno je da današnje metode i alati (matematički i fizički modeli) omogućuju sagledavanje hidrauličkih, psamoloških i morfoloških *trendova*, što i jeste najvažnije u rešavanju praktičnih problema.

Šta je preduslov uspešne regulacije reka? Od presudne važnosti je *razumevanje fluvijalnih procesa i kvalitativno sagledavanje morfoloških posledica regulacionih radova*.

U neregulisanom vodotoku vlada ravnoteža između energije toka i hidrauličkih otpora. Regulacijom vodotoka, ta ravnoteža biva narušena. Od stepena unetog poremećaja zavisi reakcija vodotoka, koji teži da kroz promenu morfologije korita uspostavi novo ravnotežno stanje. Na primer, ako se regulacionim radovima smanje hidraulički otpori, uzdužni nagib dna će se, u procesu regresivne erozije, spontano smanjivati sve do uspostavljanja nove ravnoteže između energije toka i hidrauličkih otpora. Smanjenje uzdužnog nagiba dna dovodi do produbljenja korita, što može imati dobre i loše posledice. Dobre posledice su: (i) povećanje kapaciteta korita za prijem i evakuaciju velikih voda i (ii) sniženje nivoa podzemnih voda u priobalju i isušivanje močvarnih terena. Loše posledice nastaju kada: (i) dubinska erozija premaši određenu granicu, pa počne prirodno sužavanje korita, praćeno povećanjem brzine toka i destabilizacijom obala; (ii) sniženje nivoa u reci ugrozi rad vodozahvata, a nivoa podzemnih voda, opstanak vegetacije u priobalju.

Od inženjera koji se bavi regulacijom reka očekuje se da opisane pojave predvidi, što nije lako, jer zahteva, pored solidnog teorijskog znanja i sposobnosti sinteze mnoštva podataka, višegodišnje praktično iskustvo. Procene i odluke moraju biti utemeljene na rezultatima pažljivo koncipiranih i sistematski sprovedenih istražnih radova. Na primer, od karakteristika materijala u kome je formirano korito zavisi produbljenje i suženje korita, kao i procena prihvatljive dubinske erozije sa

stanovišta dubine fundiranja regulacionih građevina u koritu (pragova, stabilizacionih pojaseva).

Treba napomenuti da je složenost rečne morfodinamike prisutna i kod branama pregrađenih – „kanalisanih” vodotoka, sa izmenjenim hidrološko-hidrauličkim režimom. Nema sumnje da upravljanje vodnim režimom kanalisanih vodotoka može da obezbedi zaštitu od poplava u periodima velikih voda, kao i prihranjivanje vodotoka u sušnim periodima. Međutim, i ovde je prisutna potreba analize nepovoljnih uticaja, kao što su na primer: zasipanje korita i opstanak vodnih organizama u malovodnim periodima.

Gde se greši? Regulacija reka (kao i svaka druga inženjerska oblast), inherentno sadrži dva pitanja: „kako” i „zašto”. Kako projektovati ili izvesti neke radove? Zašto se javio problem koga tim radovima treba rešiti?

Obrazovanje inženjera uglavnom daje iscrpne odgovore na prvo pitanje, dok ono drugo najčešće ostaje bez odgovora, ili dobija polovičan odgovor. Osnovni razlog je u tome što je na pitanje „zašto” teže odgovoriti nego na pitanje „kako”, jer se radi o prethodno pomenutom razumevanju fizičkih procesa. I u našoj praksi, razmatranje materijalne realizacije projekta („kako”) prednjači u odnosu na razmatranje koncepcijske opravdanosti („zašto”). Što je najgore, postoji sklonost da se „gotova” projektna rešenja rutinski kopiraju sa jednog rečnog lokaliteta na drugi, pa čak i sa jednog vodotoka na drugi! Naravno da je kopiranje projektnih rešenja nedopustivo, jer je svaka reka jedinstveno „živo biće”. Nepromišljeno, ili nedovoljno proučavano nametanje regulacionih elemenata (trase, uzdužnih i poprečnih profila, građevina), može izazvati neočekivane neželjene efekte (uz nepotrebne troškove). Evo nekih primera.

(1) Kod nas se tradicionalno razlikuje „gradski” (urbani) i „poljski” (ruralni) tip regulacije reka. Prvi podrazumeva konstantan uzdužni nagib dna i geometrijski pravilan oblik poprečnog preseka regulisanog korita (najčešće dvogubo trapezno korito sa kamenom obloženim kosinama). Drugi – „poljski” tip regulacije podrazumeva manja ulaganja, tako što se obaloutvrdama štite konkavne obale samo pojedinih, erozijom najugroženijih krivina.

Problem nastaje kada se po inerciji, shodno pomenutoj praksi „prenošenja” tipskih rešenja, za regulaciju u vangradskim uslovima u projektu primene elementi gradske regulacije – pravilni oblik poprečnih profila i konstantni uzdužni nagib dna. Može se pokazati da takvo rešenje bude neodrživo bez potpunog oblaganja korita, jer će u protivnom, morfološke promene korita vremenom menjati propusnu moć regulisanog korita.

(2) Greši se i kada se u okviru poljske regulacije vodotoka, odbrambeni nasipi olako projektuju (a potom i izgrade) u neposrednoj blizini glavnog korita, u želji da se uveća poljoprivredno branjeno područje. U uslovima uskog proticajnog profila za velike vode, velike brzine toka vremenom dovode do erozije obala i kosina nasipa,

pa se prividne koristi na jednoj strani brzo neutrališu štetom na drugoj strani. Uređenje vodotoka nije rutinski posao, već se mora zasnovati na višekriterijumskoj optimizaciji u cilju harmonizacije vodoprivrednih, ekoloških i drugih ciljeva.

(3) Treba ukazati i na problem parcijalne regulacije vodotoka, koja se opravdava nedostatkom sredstava. Često se regulacioni radovi sprovode na kratkim deonicama, po principu fazne gradnje. To u načelu nije pogrešno, ali u slučaju regulacije reka može biti pogubno, jer odlaganje radova može dovesti do toga da u međuvremenu morfološke promene u potpunosti obezvrede polazno projektno rešenje.

2.2 Podloge

Integralni pristup uređenju vodotoka o kome je bilo reči u prethodnom poglavlju, zahteva veći fond ulaznih podataka od onog koji je neophodan za klasičnu regulaciju reka. Podloge se prikupljaju iz raznih izvora. Za podloge u sferi tehnike i ekologije neophodni su *terenski istražni radovi*. Podloge koje se tiču prostornog planiranja i društvenih odnosa prikupljaju se posredstvom državnih institucija na lokalnom nivou.

2.2.1 Hidrološke podloge

Analiza hidrološkog režima nekog vodotoka obično se svodi na statističku obradu vremenskih serija osmotrenih nivoa i protoka. U regulaciji reka su od najvećeg interesa *velike vode*. One se opisuju karakteristikama poplavnog talasa: vršnim protokom, zapreminom, vremenom trajanja i oblikom (hidrogramom).

U zavisnosti od raspoloživih podataka, na raspolaganju su dva hidrološka pristupa: (i) statistička analiza osmotrenih nivoa/protoka na tzv. „izučenim slivovima” i (ii) analiza računskih ili osmotrenih kiša na tzv. „neizučenim slivovima” [14, 193].

Ukratko, podsetimo se statističke analize velikih voda: (i) računa se empirijska raspodela osmotrenih maksimalnih godišnjih protoka; (ii) proverava se prilagođavanje empirijske raspodele nekoj teorijskog raspodeli (Gumbel, Pearson, log-Pearson itd.); (iii) teorijska raspodela koja se najbolje prilagodila empirijskoj raspodeli, koristi se za ekstrapolaciju ekstremno velikih voda željene verovatnoće prevazilaženja ($P=0,1; 0,05; 0,02; 0,01$ itd.), odnosno povratnog perioda (prosečnog broja godina između dve pojave: $T=10$ god; 20 god; 50 god; 100 god itd.) [193]; (iv) protok *izabrane* verovatnoće usvaja se kao merodavan – *projektni protok*, ili *protok projektne velike vode*.

Izbor projektnog protoka zavisi od problema koji se rešava. Tako na primer, vršni protok računskog poplavnog talasa koji se koristi za projektovanje nasipa ne mora biti merodavan za procenu lokalne erozije oko mostovskog stuba.

Sa izborom projektnog protoka je tesno povezano pitanje prihvatljivog *rizika*, o čemu će biti reči u šestom poglavlju ove knjige.

U nekim problemima regulacije reka nije dovoljno razmatrati samo jedan (projektni) protok, već je nužno analizirati *promenu* protoka/nivoa tokom vremena, pri čemu vremenska razmera zavisi od problema koji se rešava. Ponekad je dovoljno analizirati uticaje vezane za trajanje jedne (karakteristične) poplave, a nekad, za višegodišnji period, sa mnoštvom poplava. Na primer, za analizu lokalne erozije oko mostovskog stuba, koristi se projektni poplavni talas relativno kratkog trajanja, dok je za analizu opšte erozije na dugačkoj rečnoj deonici merodavan kumulativni erozioni doprinos brojnih poplavnih talasa, u višegodišnjem periodu.

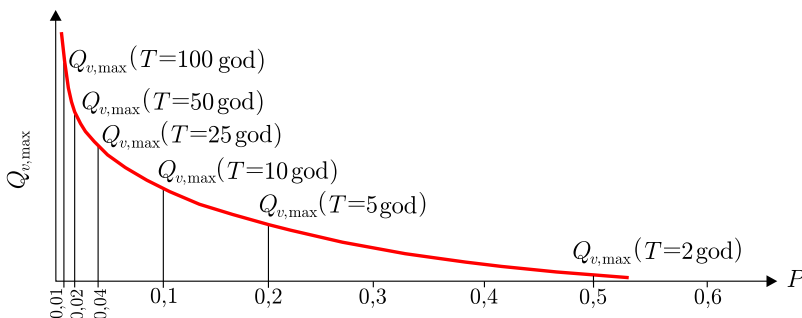
Može se zaključiti da su u regulaciji reka hidrološke podloge primarno usmerene ka morfološkim analizama kratkoročnog ili dugoročnog razvoja rečnog korita. Problem je međutim, kako obuhvatiti veliku varijabilnost vodnog režima u višegodišnjem periodu. Drugim rečima, kako usvojiti protok koji je sa stanovišta prognoze morfoloških promena merodavan.

Jedan pristup je zasnovan na konceptu „dominantnog protoka” (KI-1.2). Radi se o protoku pri *punom glavnom koritu*, povratnog perioda $2\div 5$ godina kod većih aluvijalnih reka, a $2\div 10$ godina kod manjih bujičnih (stalnih i efemernih) vodotoka. Smatra se da opšta deformacija korita (erozija/zasipanje) pri ovom protoku predstavlja *prosečnu godišnju* deformaciju.

Drugi pristup u prognozi prosečne deformacije korita zasnovan je na proceni pronosa vučenog nanosa i verovatnoći plavnih događaja. Neka je $Q_{v,\max}$ najveći lokalni maseni pronos vučenog nanosa (m^3/s) koji odgovara vrhu poplavnog talasa verovatnoće P (u bilo kojoj godini). Proizvod $Q_{v,\max} \cdot P$ predstavlja doprinos te poplave dugoročnom uprosečenju maksimalnog pronosa nanosa na godišnjem nivou:

$$\bar{Q}_{v,\max} = \int_0^1 Q_{v,\max} dP. \quad (2.1)$$

Integracijom su obuhvaćene poplave niza povratnih perioda $T = 1/P$ (Slika 2.1). Prosečnu vrednost pronosa nanosa sračunatu pomoću (2.1) uputno je uporediti sa onom koja se dobije na osnovu srednjeg godišnjeg maksimalnog protoka vode u višegodišnjem periodu.



Slika 2.1: Verovatnoća pojave maksimalnog pronosa nanosa u jednom profilu.

Na ovom mestu se može ukazati i na jednu specifičnost malih bujičnih vodotoka, a to je da 10% najvećih protoka izazove oko 90% deformacije korita [215].

Protok osrednjen u višegodišnjem periodu, merodavan je i za projektovanje regulacionih građevina u rečnom koritu. S druge strane, *sezonska raspodela* protoka je bitna za utvrđivanje ekološkog statusa vodotoka. Kriva trajanja (zastupljenosti) predstavlja grafički prikaz obezbeđenosti protoka/nivoa, u nekoj određenoj godini, ili u višegodišnjem periodu.

Krive trajanja hidroloških i psamološko-morfoloških veličina su komplementarne; na primer kriva trajanja protoka vode služi kao osnova za izradu krive trajanja pronosa vučenog nanosa u višegodišnjem periodu (KI-14.4.1).

Za projekte regulacije reka koji se bave plovidbom, kao i za uređenje malih vodotoka u kontekstu ekološke održivosti, važno je hidrološko izučavanje *malih voda*. Protok zastupljenosti 95% vremena tokom godine je jedan od često korišćenih parametara malih voda. U zavisnosti od karakteristika sliva (varijabilnosti vodnog režima, geološkog sastava, vegetacije itd.) mogu se kao merodavni razmatrati i protoci manjih zastupljenosti: 90%, 30÷50%.

Podaci o malim vodama dobijaju se standardnom statističkom analizom minimalnih dnevnih, godišnjih ili višegodišnjih protoka. Kao u slučaju velikih voda, analizom prilagođavanja empirijske raspodele osmotrenih protoka nekoj teorijskoj raspodeli, utvrđuje se najbližnja teorijska raspodela, koja se koristi za ekstrapolaciju do ekstremno malih voda željene verovatnoće pojave. U slučaju neizučениh slivova, koriste se regionalne zavisnosti specifičnog oticaja, kao i postupci transpozicije podataka sa sličnih hidrološki izučениh slivova [193].

2.2.2 Topografske podloge

Kvalitetne geodetske podloge su osnov svih projekata u građevinarstvu. U oblasti regulacije reka ovi radovi su posebno složeni, jer se snimanje rečnog korita i priobalja obavlja različitim metodama i različitom opremom. To znači da se u okviru istog projekta moraju kombinovati razne tehnike geodetskog snimanja.

Za snimanje velikih inundacionih površina koriste se metode snimanja iz vazduha. Klasično geodetsko snimanje pomoću totalnih stanica primenjuje se u gusto obraslim priobalnim pojasevima, kao i za snimanje objekata u rečnom koritu (mostovskih konstrukcija i regulacionih građevina). Geometrija glavnog (minor) korita i dalje se tradicionalno snima klasičnom „batimetrijom” (KI-10.5.1), a u novije vreme i laserskim snimanjem iz vazduha, kao što će se videti u nastavku.

2.2.2.1 Poprečni profili

Najpre treba pribaviti i proučiti postojeće geodetske podloge, da bi što više smanjio obim terenskih radova. Zatim, na osnovu *programa* geodetskih radova, na rečnoj deonici se postavlja stalni poligoni vlak, tipične dužine do desetak kilometara. Položaj poprečnih profila definiše se u odnosu na tačke poligonog vlaka.

Odlučivanje o položaju i broju poprečnih profila glavnog rečnog korita i inundacija nije rutinski posao. Broj i razmak profila varira od slučaja do slučaja, u zavisnosti od karaktera i veličine vodotoka, kao i njegove trase u odnosu na naseljena područja. Generalno, razmak profila van naselja može biti reda veličine 100 m, a u naseljima, 50 m.

Topografski podaci moraju biti georeferencirani u državnom koordinatnom sistemu. Snimanje poprečnih profila za potrebe hidrauličkih proračuna razlikuje se od onog za projektovanje puteva i drugih objekata. Za snimanje opremom koja koristi GPS zahteva se vertikalna tačnost ≤ 5 cm. Kako je za proračune veoma bitan položaj i orijentacija poprečnih profila, neophodna je tesna saradnja inženjera hidrotehničke i geodetske struke.

Dužina rečne deonice koju treba snimiti zavisi od mnogih faktora (uzdužnog nagiba korita, rapavosti glavnog korita i inundacija, oblika trase, dubine toka, prisustva objekata u rečnom koritu itd.). Zadatak hidroinženjera je da definiše onu dužinu koja će obezbediti pouzdane rezultate proračuna uz najmanje troškove terenskih snimanja.

Određivanje položaja poprečnih profila zahteva podjednako poznavanje hidrauličkih zakonitosti i načina proračuna u korišćenom softverskom paketu. Da bi se postigla neophodna ravnoteža između obima geodetskih snimanja i njihovih troškova², preporučuje se da obilazak terena pre snimanja bude zajednička obaveza projektanta i geodeta.

Za proračune kretanja poplavlanih talasa kroz major korito, razmak profila zavisi od uzdužnog nagiba dna korita. Prema raznim izvorima u literaturi, može biti u rasponu od 30÷900 m (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: *Preporučeni razmak snimljenih profila.*

Uzdužni nagib korita	< 0,001	0,001÷0,005	0,005÷0,01	> 0,01
Najveći razmak profila [m]	900	450	150	30

Generalno, rečno korito uniformne širine i blage zakrivljenosti zahteva manji broj profila od korita sa izraženim promenama trase, širine, nagiba i rapavosti. Predmetna deonica se po potrebi može podeliti na više sektora sa ujednačenim geometrijskim karakteristikama.

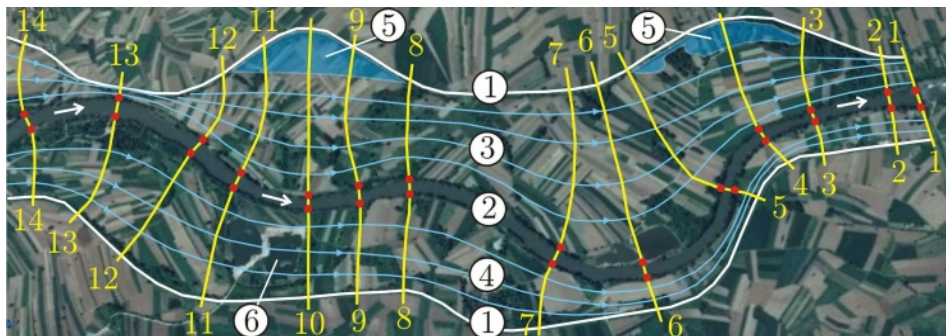
U privoj knjizi je obrazložena podela složenog poprečnog preseka na segmente kako bi linijski računski model obuhvatio delove korita sa različitim hidrauličkim svojstvima (KI-6.3).

Po definiciji, poprečni profili su površi *upravne na strujnice*. Na situaciji se prikazuju pravim linijama u glavnom koritu, a pravim (izlomljenim) ili krivim linijama u inundacijama (Slika 2.2). Linije poprečnih profila na situaciji se *ne smeju seći*.

²Sa hidrauličke tačke gledišta, što više poprečnih profila to bolje, ali *pogrešno postavljene* profili čine nepotreban „višak“ koji opterećuje troškove, a ne doprinosi kvalitetu rezultata proračuna.

U linijskim modelima tečenja poprečne profile treba postaviti:

- na mestima izražene promene širine/dubine osnovnog korita/inundacija;
- u tačkama značajnog preloma uzdužnog nagiba dna;
- na mestima promene rapavosti;
- na početku i kraju retenzionih prostora u inundacijama;
- neposredno uzvodno i nizvodno od objekata (mostova, pragova i sl.).



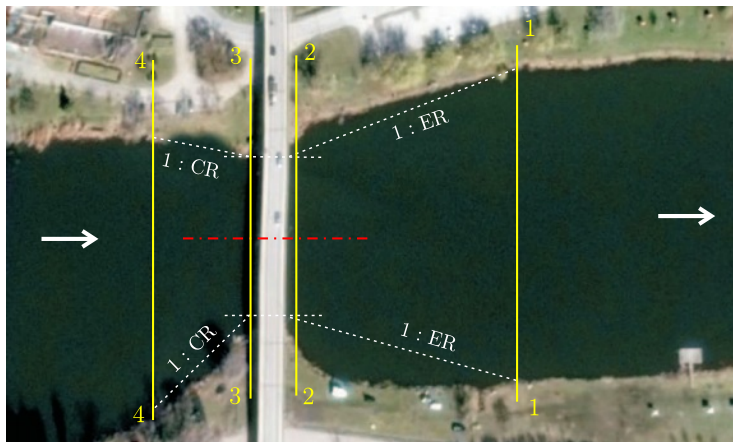
Slika 2.2: *Primer korita za veliku vodu („major” korita); 1- nasip; 2- glavno korito; 3- leva inundacija; 4- desna inundacija; 5- neaktivni retenzioni prostor; 6- oblast povećanih hidrauličkih otpora; poprečnim profilima se obuhvataju: najveće širine major korita (6-6, 10-10), najuži delovi (1-1, 13-13), „mrtve zone” (3-3 do 5-5; 8-8 do 12-12), oblasti povećane rapavosti – na desnoj inundaciji (9-9 do 11-11), počeci, krajevi i temena krivina (6-6, 13-13, ...); u profilu mosta (1-1) zadaje se nizvodni granični uslov (miran režim tečenja).*

Na Slici 2.3 prikazan je položaj najmanjeg broja računskih profila neophodnih za proračun lokalnih gubitaka energije na mestima nagle promene geometrije korita (KI 6.8-6.10). Ovaj položaj se mora unapred definisati da bi se relevantni profili snimili na terenu. Između snimljenih profila može se za potrebe proračuna uvesti veći broj interpolovanih profila, ukoliko se pokaže da je neophodno.



Slika 2.3: *Položaj poprečnih profila na mestima naglih promena geometrije korita; s leva na desno: račvanje toka oko ade zahteva dva granična profila 1-1 i 9-9 u kojima su kote energije/nivoa iste za obe grane toka; ušće se obuhvata sa 3 blisko postavljena profila; nagla proširenja i suženja zahtevaju najmanje 3 profila.*

Mostovska suženja su posebno specifična; za svaki most je potrebno snimiti 4 poprečna profila (Slika 2.4), kao i geometriju mostovskog otvora, prilaznih konstrukcija i stubova. Bitne su i kote gornje i donje ivice kolovozne konstrukcije zbog mogućeg zagušenja i prelivanja mosta. Korisno je načiniti foto dokumentaciju.



Slika 2.4: Poprečni profili u zoni mosta koje koristi program HEC-RAS [250]; proračun suženja toka uzvodno od mosta i širenja toka nizvodno od njega zahteva uvođenje lokalnih gubitaka energije, odnosno 4 računska profila, od kojih su uzvodni profil 4-4 i nizvodni profil 1-1 ograničavaju zonu poremećaja (u njima strujnice postaju paralelne), a profili 3-3 i 2-2 u neposrednoj blizini mosta predstavljaju efektivne preseke strujnog polja; zone slabo aktivnog protoka shematski su ograničene pravama u nagibu 1:CR (uzvodno suženje), odnosno 1:ER (nizvodno proširenje); empirijski je utvrđeno: $CR=0,7 \div 2,3$ ($CR \approx 1$), $ER=1 \div 4$ ($ER \approx 3$).

Rezultati snimanja se daju u grafičkom i tabelarnom obliku. Korito sa inundacijama se prikazuje na situacionom planu u odgovarajućoj razmeri. Poprečni profili se prikazuju u distordovanoj razmeri, pri čemu je razmera u vertikalnom pravcu (za visine) znatno krupnija od one u horizontalnom pravcu (za dužine), npr. 1:100/1000, 1:100/5000.

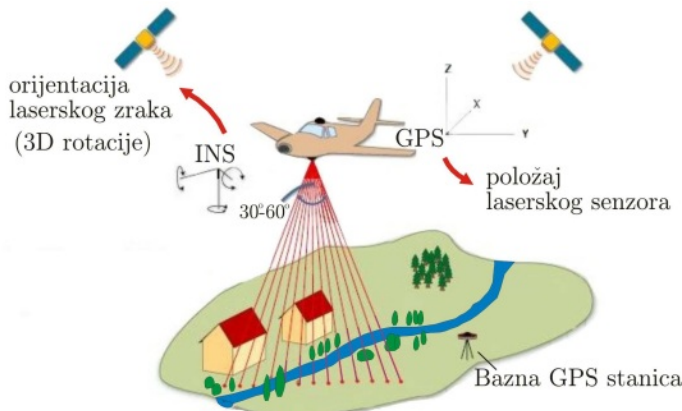
2.2.2.2 Situacioni planovi

Savremeno snimanje terena obavlja se pomoću sistema daljinske detekcije koji je poznat pod akronimom LiDAR (eng. „*Light Detection And Ranging*”). Ovaj sistem geodetskog snimanja daje u relativno kratkom vremenu veoma veliki broj podataka (koordinatnih tačaka) visoke preciznosti i tačnosti³. Kao zamena za konvencionalni premer i aerofotogrametriju, ovaj sistem nailazi na sve veću primenu u građevinarstvu, posebno u vodoprivredi. LiDAR objedinjuje nekoliko tehnologija za prikupljanje podataka: (i) Globalni Pozicioni Sistem (GPS), (ii) laserski skener, (iii) inercijalni navigacioni sistem (INS) i (iv) digitalne video i foto kamere visoke rezolucije [272, 273]. Podrazumeva se da sadrži i prateći softver neophodan za obradu podataka.

³Preciznost je mera ukupne slučajne greške i predstavlja dokaz ponovljivosti merenja, a tačnost opisuje veličinu ukupnog odstupanja mernih vrednosti od stvarne (prave) vrednosti. Mera tačnosti je standardna devijacija pojedinačnog merenja σ , koja uzima u obzir disperziju (rasejanje) odstupanja ili grešaka od prave vrednosti.

Glavni uređaj za snimanje – laserski skener, analogan je radaru, ali koristi infra-crveni segment elektromagnetnog spektra. LiDAR ima razne hardverske opcije (stacionaran, pokretan na automobilu, helikopteru, avionu), kao i razne tehnološke varijacije (sa jednim ili više uređaja za emisiju laserskih zraka).

Izbor tipa LiDAR opreme zavisi od zahtevane tačnosti, nivoa detaljnosti i oblika isporuke rezultata. Princip snimanja iz aviona ili helikoptera shematski je prikazan na Slici 2.5.



Slika 2.5: Lasersko altimetrijsko snimanje terena; emisijski uređaj u letelici šalje signal (laserski zrak) koji se jednim delom vraća ka letelici, gde ga registruje senzor-prijemnik; vremenski interval od trenutka emitovanja signala do trenutka njegovog prijema, pomnožen (konstantnom) brzinom signala daje dvostruku dužinu između letelice i tačke na tlu; položaj letelice u svakom trenutku, kao i njena trajektorija, određuju se pomoću sistema za globalno pozicioniranje (GPS) i sistema za merenje orijentacije laserskog zraka (INS); na osnovu vektora brzine, 3D rotacije, dužine zraka i ugla pod kojim je emitovan, računaju se koordinate (x, y, z) svake pogodene tačke (prema [271]).

Tipične tehničke karakteristike LiDAR sistema su: (i) skener sa rotacionim ogledalom, ugao skeniranja 60° , frekvencija lasera 150 kHz, tačnost skeniranja $\sigma=1$ cm; (ii) GPS učestalost pozicioniranja 10 kHz; (iii) operativna visina leta $5\div 400$ m; (iv) rezolucija snimaka kamerom 4000×3672 [273].

Laserska snimanja daju veoma veliki broj podataka. Na primer, sa prosečno 150000 tačaka snimljenih u sekundi, na 400 m visine leta brzinom $40\div 80$ km/h, LiDAR sistem prikupi oko 15 miliona 3D podataka/km² [273]. Iako gustina tačaka zavisi od brzine i visine leta, $20\div 70$ tačaka/m² je dovoljno za kvalitetni prikaz konfiguracije tla i linijskih entiteta (reka, kanala, dalekovoda, puteva, pruga i dr.).

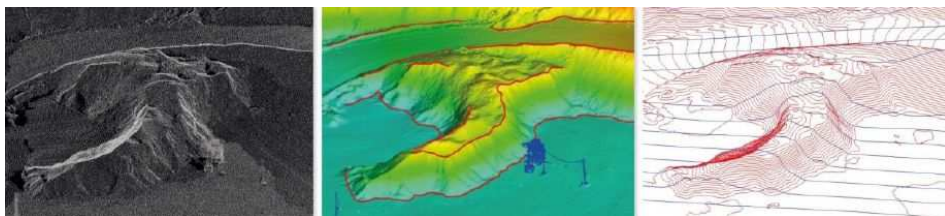
Za snimanje rečnog korita koristi se posebna, batimetrijska LiDAR oprema. Kao „nosai“ ove opreme mogu se koristiti dronovi (Slika 2.6). Opremljeni su softverom za letenje, snimanje i transfer prikupljenih podataka.

Tipične tehničke karakteristike su: visina leta $100\div 350$ m, domet: $550\div 920$ m, frekvencija laserskog pulsa $50\div 550$ kHz, tačnost snimanja 1 cm, preciznost 5 mm, gustina tačaka oko 50 tačaka/m² [272].



Slika 2.6: *Bespilotna letelica – dron sa LiDAR opremom* [272].

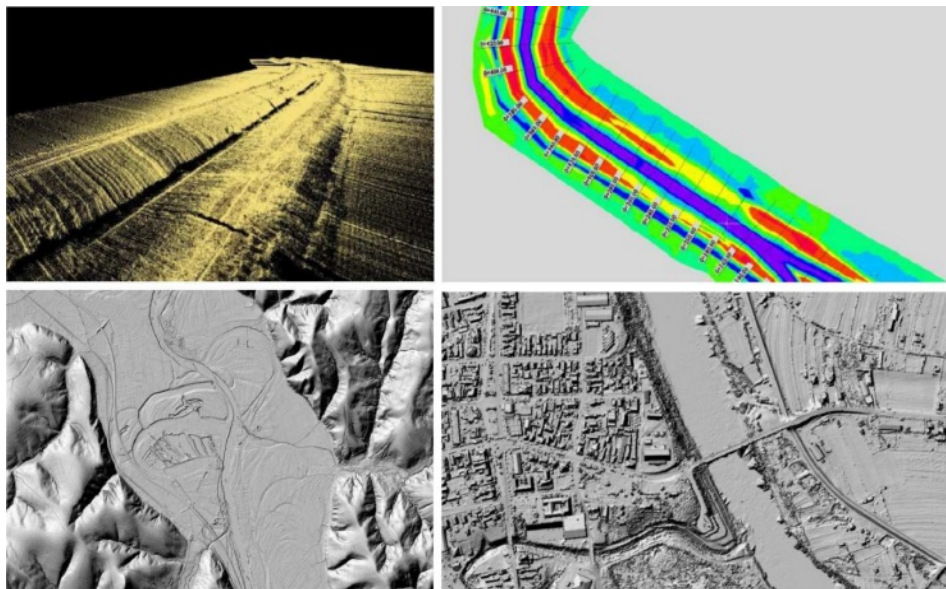
LiDAR ima široku primenu u oblasti primarne geodezije; koristi se za osnovni premer koji daje digitalni model terena (DMT), iz koga proizilaze orto planovi, a uz dopunu strukturnim linijama, karte sa izolinijama i karakterističnim presecima (Slika 2.7).



Slika 2.7: *Podaci dobijeni LiDAR tehnologijom; s leva udesno: oblak tačaka (engl. point clouds); digitalni model terena (DMT); izohipse i karakteristični preseci. Fajlovi sa obakom tačaka se redukuju filtriranjem podataka, uz uslov da se zadrži određeni nivo tačnosti. Obradjeni podaci se isporučuju u formatima koji su uobičajeni za konvencionalne metode premera* [272].

LiDAR tehnika se može koristiti u raznim oblastima vodoprivrede; na primer, za detekciju vrste, visine i rasporeda vegetacije kod namene površina, kartiranje plavnih zona i šteta od poplava, održavanje kanalskih mreža itd. (Slika 2.8). Rezultati LiDAR snimanja se mogu importovati u GIS alate i prezentirati u obliku tematskih karata.

Geodetske karte (situacioni planovi) i poprečni profili glavnog korita i korita za veliku vodu koriste se u regulaciji reka kao osnovne topografske podloge. Razmere u kojima se prikazuju situacioni planovi zavise od njihove namene (Tabela 2.2). Već je navedeno da su tipične razmere za prikaz poprečnih profila za male vodotoke 1:100/100, a za veće reke, 1:100/200 do 1:100/1000.



Slika 2.8: Primeri primene LiDAR snimanja u vodoprivredi; gore: oblak georeferenciranih tačaka i digitalni model (DTM) kanala za odvodnjavanje; dole: digitalni modeli deonice Velike Morave [272].

Tabela 2.2: Razmere situacionih planova u papirnom obliku; razmere situacionih planova u digitalnom obliku (na kojima se prikazuju rezultati proračuna) ne moraju odgovarati tradicionalnim razmerama.

Namena	Razmere		
Analize sliva	1:50 000	1:100 000	1:200 000
Trasiranje	1:2 500	1:5 000	1:10 000
Prikaz radova	1:1 000	1:2 500	1:5 000

2.2.2.3 Rečno korito

Snimanje rečnog korita (batimetrija) ima za cilj da omogući:

- izradu projektne dokumentacije za uređenje vodotoka;
- bilansiranje zapremine materijala izbagerovanog iz rečnog korira;
- uklanjanje podvodnih prepreka (potonulih plovila, ostataka građevina);
- praćenje zasipanja korita i akumulacija;
- održavanje plovnog puta;
- lokalne intervencije u zoni saobraćajnica.

U zavisnosti od veličine minor korita, primenjuje se: (a) „ručno merenje dubine”; (b) snimanje pomoću ehosondera i (c) snimanje LiDAR tehnologijom.

Ručno merenje dubine. Ovaj pristup je primenljiv: (i) kod malih, plitkih, brdskih vodotoka; (ii) u neposrednoj blizini građevina (mostovskih stubova, glava napera, brodskih prevodnica, podvodnih objekata i dr.); (iii) u plitkim retenzionim bazenima i (iv) u plavnim vlažnim staništima.

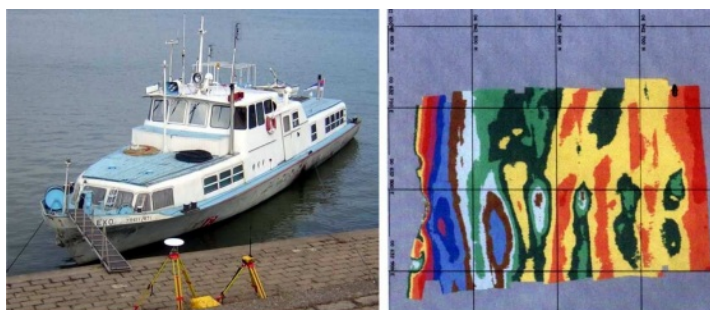
Za ručno merenje dubine koriste se graduisane sajle, lanci i letve. Čelična sajla, dužine do 15 m, ima teg mase $3\div 4$ kg, koji može biti u obliku sidra ili diska $\varnothing 15$ cm [239]. Sajla, koja je prethodno graduisana i kalibrisana (pomoću čelične metarske trake), spušta se iz čamca pomoću vitla, vodeći računa da se izbegne otklon sajle od vertikalnog pravca pod dejstvom toka.

Alternativa sajli je graduisana letva. Može biti od drveta, ili u obliku metalne (aluminijumske) šipke ili cevi. Dubina se meri u odnosu na površinu vode, čija se kota geodetski definiše. Letve su pogodne za dubine $2\div 4$ m. Kao sajle, mogu biti snabdevene tegom (kružnom papučicom $\varnothing 15$ cm). Pre merenja, letve se kalibrišu. Tačnost očitavanja je 1 cm. Glavni izvor greške je odstupanje od vertikalnog pravca i propadanje letve kroz muljeviti sloj na dnu korita.

Merenje dubine pomoću ehosondera. U prvoj knjizi je opisan višenamenski hidrometrijski brod, koji može biti opremljen jednosignalnim (eng. „*singlebeam*”) ili višesignalnim (eng. „*multibeam*”) eho uređajima za merenje dubine (KI-10.5.1). Na Slici 2.9 su prikazani ovi uređaji, a na Slici 2.10 je dat primer ehograma.



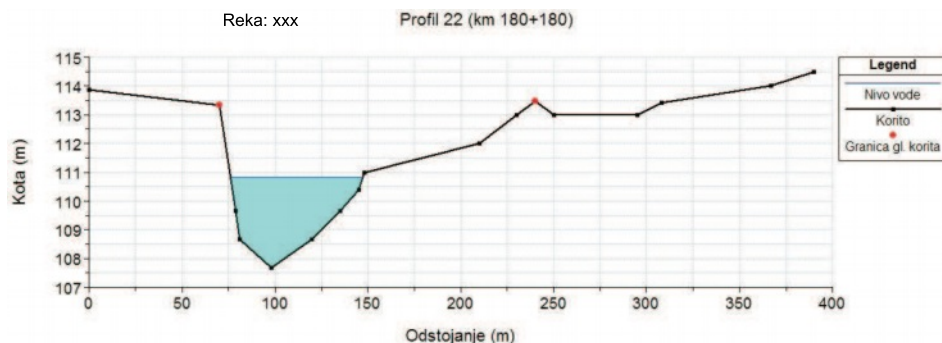
Slika 2.9: Uređaji za akustičko merenje dubine; sleva udesno: nosač *single beam* uređaja na pramcu broda; pločasti *multibeam* uređaj na trupu broda; *multibeam* uređaj sa daljinskim upravljanjem za merenje u plitkim oblastima [274].



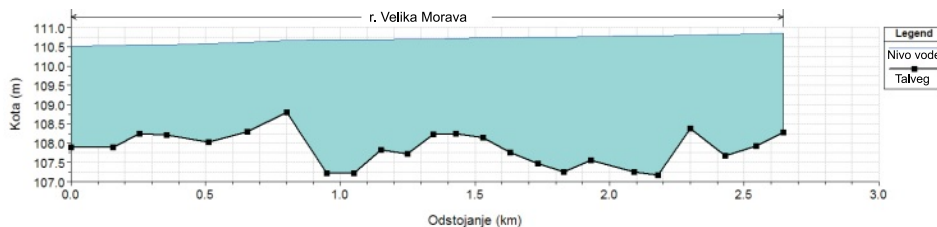
Slika 2.10: Brod „Eho” direkcije „Plovput” sa GPS baznim stanicama i ehogram ostataka stubova Trajanovog mosta na Dunavu kod Kladova (km 929+700).

Za snimanje po poprečnim preseccima koriste se singlebeam ehosonderi, čija je najveća tačnost oko 1 cm. Za snimanje po dužini korita prednost ima multibeam uređaj, koji u jednom prolazu pokriva pojas širine lepezastog snopa zvučnih talasa emitovanih sa plovila (KI-10.5.1-Sl:10.13). Multibeam uređaji rade na frekvencijama $170 \div 460$ kHz i dubinama do 100 m.

Snimljena batimetrija se prezentira u grafičkom i tabelarnom obliku. Primera radi, na Slikama 2.11 i 2.12 prikazani su primeri poprečnih i podužnih profila, dok je na Slici 2.13 prikazan tipičan situacijski plan.



Slika 2.11: *Primer poprečnog profila nacrtanog u softveru HEC-RAS [250]; horizontalno odstojanje je definisano u odnosu na proizvoljnu referentnu tačku na levoj obali; obavezno je upisivanje oznake profila i njegove stacionaže.*

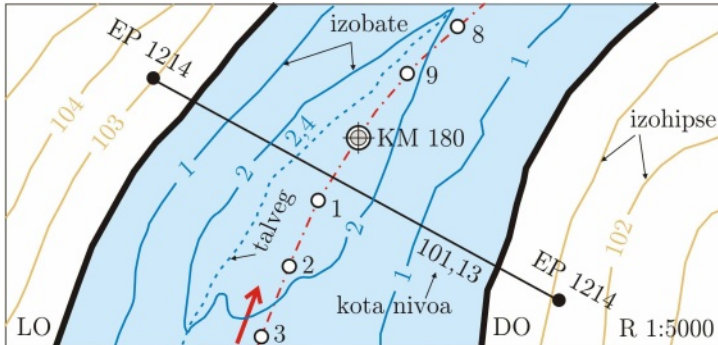


Slika 2.12: *Primer uzdužnog profila nacrtanog u softveru HEC-RAS [250]; horizontalno odstojanje je definisano u odnosu na profil nizvodnog graničnog uslova (u mirnom režimu tečenja), a stacionaža raste uzvodno; prikazane su linije talvega i nivoa vode u trenutku snimanja.*

2.2.3 Hidrauličke podloge

Ove podloge sastoje se od podataka neophodnih za procenu linijskih i lokalnih gubitaka. Određivanje vrednosti Manningovog (ili nekog drugog) koeficijenta linijskog otpora detaljno je obrađeno u prvoj knjizi (KI-3.1, 3.5) i ovde se neće ponavljati.

Hidrauličke podloge čine i podaci o rasporedu brzine toka u poprečnom preseku. Ovi podaci su neophodni za procenu protoka i kalibraciju računskih modela.



Slika 2.13: *Primer situacionog plana; elementi plana su: razmera; linije ureza nivoa vode u trenutku snimanja (LO, DO); osovina toka sa stacionažom; linija profila ispod koje je upisana trenutna kota nivoa vode; linije jedankih dubina ispod date kote nivoa vode – izobate; linije jednakih nadmorskih visina na obalama – izohipse; ukoliko postoje, ucrtavaju se regulacione građevine i upisuju kote.*

Tradicionalni način merenja polja brzine, kao i korišćenje ADCP tehnologije opisani su u prvoj knjizi (KI-10.5.2), a ovde će se samo ponoviti i dopuniti osnovne informacije u vezi sa primenom ADCP metode.

Ukratko, ADCP (eng. „*Acoustic Doppler Current Profiler*”) je uređaj koji na bazi ultrazvuka meri intenzitet sve tri lokalne komponente brzine toka, kao i batimetriju korita. Osnovni deo je sonda sa 4 senzora (Slika 2.14) za emitovanje i prijem kratkih „paketa” zvučnih signala na tipičnim frekvencijama 300, 600 i 1200 kHz, pri čemu se emituje 1÷100 paketa/s, u različitim, poznatim pravcima. Mnoštvo čestica suspendovanih u vodi, kao i rečno dno, odbijaju emitovane signale, koje uređaj registruje kao povratni eho. Usled Doplerovog efekta, odbijeni signali imaju promenjenu frekvenciju. Na osnovu poznatih frekvencija emitovanih i primljenih zvučnih talasa, kao i brzine prostiranja zvuka kroz vodu, računaju se najpre relativne brzine toka, a zatim se rotacijom (pomoću ugrađenog žirokompasa), komponente brzine iz lokalnog ADCP koordinatnog sistema prevode u globalni – zemaljski sistem i tako postaju upotrebljive za proračune (KI-10.5.2).

ADCP oprema se montira na čamcu ili je na autonomnom plovnom telu (Slika 2.14). Ima sopstveno napajanje i povezana je sa mini računarom, koji programira rad uređaja, prati merenje u realnom vremenu i arhivira podatke za dalju obradu. Kako se merenje brzine obavlja iz čamca u pokretu, brzina čamca (koju ADCP automatski registruje mereći Doplerov pomak akustičnih signala odbijenih od rečnog dna, slično klasičnom ehosonderu), mora se oduzeti od izmerene brzine toka. Pravac kretanja čamca registruje ugrađeni kompas i prati se GPS-om.

Rezultati merenja se koriste za kalibraciju računskih 2D modela (Slika 2.15). Protok u trenutku merenja se računa na osnovu rasporeda brzine po vertikalnim segmentima, uz primenu posebne ekstrapolacione sheme na površini i na dnu.



Slika 2.14: Oprema ADCP uređaja za snimanje brzine toka.

Zbog male dubine i otežanog pristupa obalama, levi i desni krajevi poprečnog profila se shematizuju trougaonim segmentima, u njima se procenjuje srednja brzina toka i šalje poruka o veličini greške. Pri merenju protoka, ADCP uređaj pravi bar 2 prolaza po poprečnom profilu, a za merenje brzine u vertikali, stoji na zadatom mestu oko desetak minuta.

Preciznost merenja pomoću ADCP uređaja opada sa porastom brzine kretanja broda. Automatski se aktiviraju korektivni mehanizmi za neutralisanje uticaja ljuljanja i naginjanja broda u toku merenja.

Neke greške su ipak neminovne; pored sistematske greške samog ADCP uređaja, slučajne greške nastaju usled fluktuacije brzine u strujnom polju i usled ekstrapolacije protoka na „neaktivnim” delovima merne oblasti (rečno dno, površina, obale). Greška u merenju protoka iznosi $1 \div 7$ % [211].

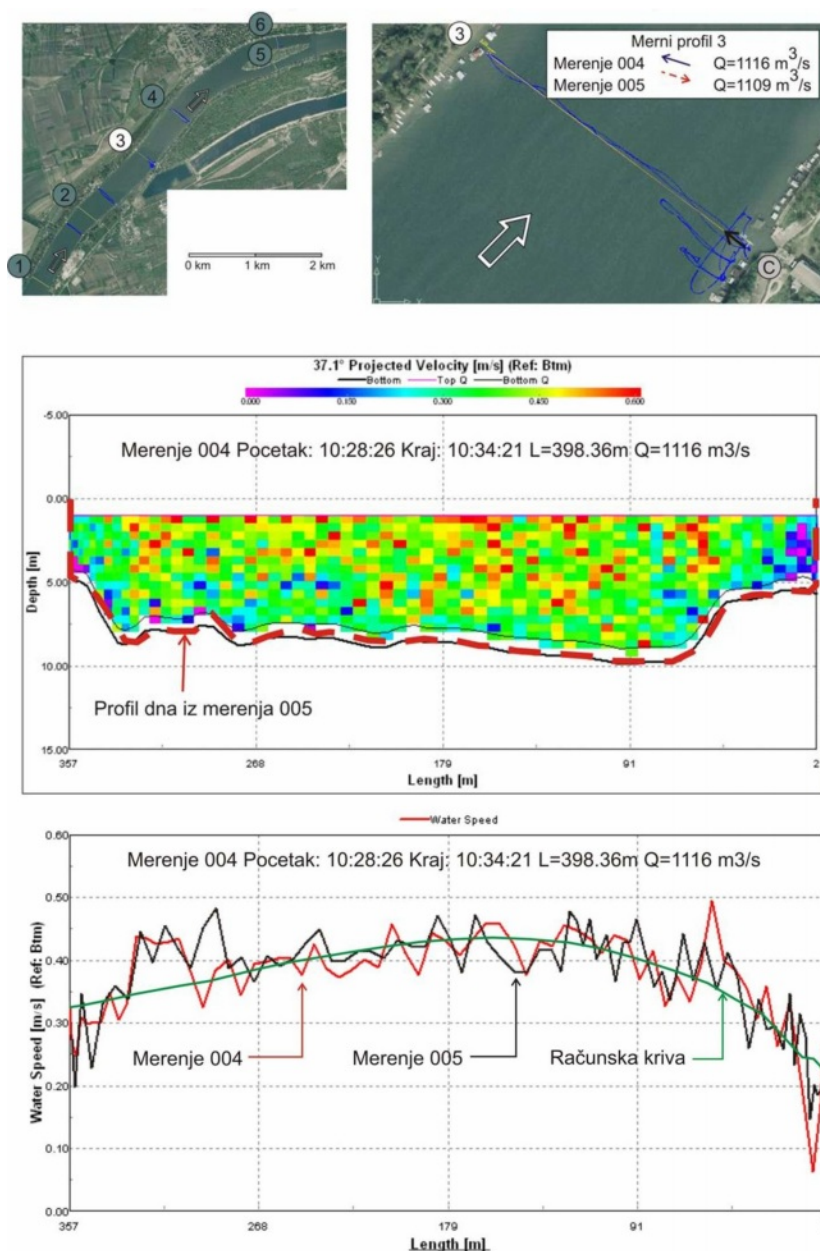
2.2.4 Psamološke podloge

Merenje nanosa na terenu je veoma specifična delatnost koja zahteva skupu opremu, znanje i iskustvo. Za prikupljanje podataka o rečnom nanosu koriste ploveće laboratorije, kao što je ona prikazana na Slici 2.16.



Slika 2.16: Istraživački brod „Argus”; sleva udesno: izgled broda; laboratorija sa mnoštvom instrumenata za ispitivanje kvaliteta vode i nanosa; uređaj za zahvatanje uzoraka vode i nanosa; grabilica za zahvatanje materijala sa rečnog dna.

Prognoza deformacije rečnog korita zasniva se na obradi uzoraka tzv. „koritofornirajućeg nanosa” koga čine *vučeni nanos* (KI-10.1-10.5) i *suspendovani nanos* (11.1-11.10). Ovde se prikaz merenja obe vrste nanosa iz prve knjige dopunjuje dodatnim informacijama.



Slika 2.15: ADCP merenja na Savi kod Makiša [120]; odozgo na dole: merni profil sa trajektorijom broda; poprečni profil sa mnoštvom kontrolnih zapremina u kojima je intenzitet brzine označen bojama; raspored vremenski osrednjene brzine u poprečnom profilu i računaska kriva za kalibraciju 2D numeričkog modela.

Nanos iz dna i vučeni nanos. Terenska merenja obuhvataju zahvatanje materijala sa rečnog dna (Slika 2.17), njegovo prosejavanje u laboratoriji i određivanje granulometrijskog sastava. Po potrebi, preduzimaju se i merenja pronosa vučenog nanosa, koji se, pri određenim brzinama toka kreće po dnu skokovito, kotrljanjem ili klizanjem (KI-10.1, 10.4).



Slika 2.17: Zahvatanje materijala sa dna reke Save spuštanjem hvatača sa specijalizovanog broda za merenja na rekama Instituta „Jaroslav Černi” [120].

Merenje pronosa vučenog nanosa može se obaviti direktno, pomoću specijalno konstruisanih hvatača (Slika 2.18), ili indirektno, nestandardnim, specifičnim metodama (bilansiranja akumulisanih naslaga tokom vremena, traserskog obeležavanja, praćenja kretanja dina (KI-10.5.3)).



Slika 2.18: Hvatači vučenog nanosa: holandski BTMA, američki Helley-Smith BLS30, kutijasti USBS, srpski IJCerni [275, 117].

Jedinični maseni pronos vučenog nanosa u jednom merenju pomoću hvatača je:

$$q_{vm} = K_h (1 - \lambda_o) \rho_s \frac{V_s}{b_h \Delta t} = \frac{M_s}{b_h \Delta t}, \quad (2.2)$$

gde je q_{vm} – maseni jedinični pronos [kg/(s m)], K_h – kalibracioni faktor („koeficijent korisnog dejstva”, KI-10.5.3.1), λ_o – poroznost (0,4), ρ_s – gustina nanosa (2650 kg/m³), V_s – zapremina uzorka [m³], M_s – masa suvog uzorka [kg], b_h – širina ulaznog otvora hvatača [m], Δt – trajanje merenja [s]. Ukupni pronos vučenog nanosa u profilu dobija se integracijom kao što je pokazano u prvoj knjizi (KI-10.5.3-Sl:10.22).

Tačnost merenja mnogo zavisi od vrednosti kalibracionog faktora (K_h), broja uzoraka i načina merenja. U idealnom slučaju, bar 20-tak uzoraka je potrebno zahvatiti na jednoj lokaciji da bi se utvrdio pronos vučenog nanosa sa slučajnom greškom (standardnom devijacijom) od oko 20% [275]. U praksi greška može biti mnogo veća (i 100%), zavisno od vrste hvatača i načina merenja.

Kod kutijastih hvatača prosečna vrednost „koeficijenta korisnog dejstva” iznosi $K_h=45\%$. Kod Heli-Smitovog hvatača ta vrednost može biti 100% kada je u pitanju peščani i sitni šljunčani materijal ($d_{50}=0,5\div 16$ mm). Efikasnost od $60\div 70\%$ je zadovoljavajuća kod pećanih nanosa, dok je kod šljunkovitih materijala ona po pravilu znatno niža.

Imajući u vidu teškoće merenja vučenog nanosa na terenu (KI-10.4, 10.5.3.1), ovde se daje nekoliko preporuka.

(1) Zahvatanje uzoraka po celom poprečnom profilu je zahtevno i dugotrajno, pa se retko primenjuje. Obično se u jednom profilu meri samo u nekoliko vertikalala u zoni talvega, tamo gde je brzina toka najveća. Iskustveno pravilo kaže da kod velikih reka razmak mernih vertikalala ne treba da je veći od 15 m, niti da je pronos između dve susedne vertikale veći od 15% ukupnog pronosa u profilu [162].

(2) Da bi se što više izbegao uticaj fluktuacija brzine toka na zahvatanje nanosa, trajanje zahvatanja treba da je što duže. Zapremina uzorka treba da bude $1/3\div 2/3$ zapremine hvatača. Kada je u pitanju peščani materijal, merenje u trajanju $3\div 5$ min se ponavlja 3 puta u svakoj vertikali [162]. Ako je pronos intenzivan, trajanje zahvatanja može biti kraće, ali ne manje od 30 s. Kod bujičnih vodotoka sa šljunkovitim nanosom, potrebno je u 5 vertikalala zahvatiti do 5 uzoraka, u ukupnom trajanju od 10 min [162].

(3) Procena pronosa vučenog nanosa nije moguća bez kalibracije hvatača – utvrđivanja vrednosti njegovog koeficijenta korisnog dejstva K_h . Direktna kalibracija hvatača na terenu je veoma teška i zametna. Najpouzdanija je kalibracija u laboratorijskim uslovima. Ako je kanal dovoljno širok i dugačak (bar $2,5\text{ m}\times 80\text{ m}$) treba koristiti stvarni hvatač. U slučaju manjih laboratorijskih kanala, mora se koristiti *model hvatača*, srazmerno manjih dimenzija u odnosu na stvarni hvatač. Tada se efikasnost hvatača koreliše sa dva bezdimenziona broja:

$$K_h = F \left(\frac{d_{50}}{b_h}, \frac{\Delta t V_*}{b_h} \right) \quad [\%], \quad (2.3)$$

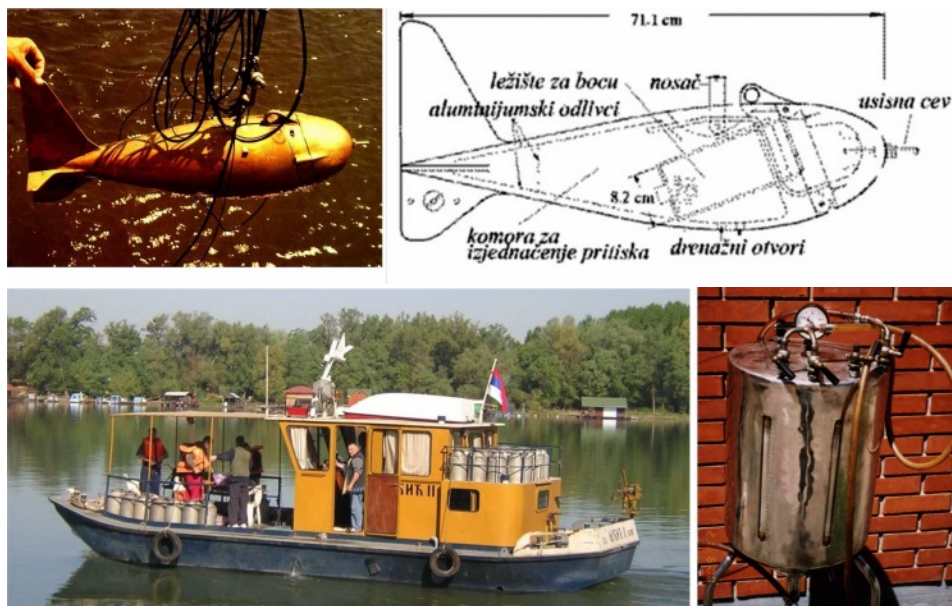
gde je V_* – smičuća brzina toka. Zbog efekata razmere (uvek prisutnih kod modelskih ispitivanja), preporučuje se kalibracija stvarnog hvatača. Pogotovo što vrednost K_h nije konstanta, već se menja u zavisnosti od brzine i dubine toka, krupnoće zrna, pronosa nanosa i lokalne konfiguracije dna.

Suspendovani nanos. Termin „suspendovani nanos” se odnosi na deo *koritiformiranjućeg nanosa* koji se kreće u vidu suspenzije, pod uticajem turbulencije toka i gravitacije⁴. Nacionalne hidrometrijske službe uzorkuju suspendovini nanos samo u određenom broju stalnih hidrometrijskih profila. Prema svetskim

⁴Termin „tranzitni nanos” se odnosi na izuzetno sitne čestice koje se takođe kreću u vidu suspenzije, ali se ne uzimaju u obzir jer, imaju procentualno malo učešće u zapremini zahvaćih uzoraka i ne utiču na deformaciju rečnog korita (KI-8.1, 11.9-SI:11.17).

standardima, procentualna zastupljenost profila sa merenjem nanosa (u odnosu na ukupni broj hidrometrijskih profila) ne sme biti manji od 15% u oblastima umerene vlažnosti, a ne manji od 30% u sušnim oblastima [162]. Drugi kriterijum je površina sliva koju „pokriva” jedna stanica za merenje nanosa: $1000 \div 2500 \text{ km}^2$ po stanici u ravničarskim predelima, $300 \div 1000 \text{ km}^2$ /stanici u planinskim predelima, a $140 \div 300 \text{ km}^2$ /stanici u malim brdskim područjima sa neravnomernim padavinama i gustom hidrografskom mrežom [162].

Uređaji za merenje suspendovanog nanosa obuvataju (KI-11.10.1): (i) hvatače za lokalno merenje koncentracije (batometre), (ii) hvatače-integratore za merenje srednje koncentracije po dubini (vertikali) i (iii) vakuumne hvatače za zahvatanje uzoraka velike zapremine (Slika 2.19).

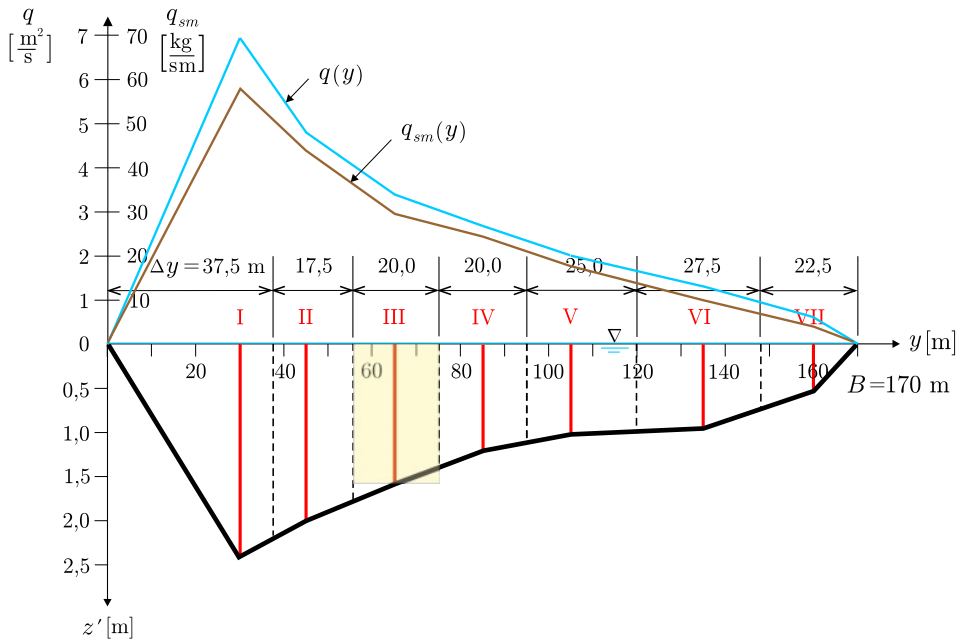


Slika 2.19: Uređaji za zahvatanje suspendovanog nanosa; gore: standardni hvatač sa bocom USP61; dole: brod sa kanisterima za prenos uzoraka vode i nanosa i vakuumski hvatač konstruisan u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi” [117].

U prvoj knjizi su razmatrani problemi zahvatanja uzoraka (KI-11.10.2), kao i način obrade rezultata merenja u nizu vertikala (KI-11.10.3). Evo ilustrativnog primera.

■ **Primer 2.1.** Na Slici 2.20 prikazan je poprečni profil sa 7 vertikala u kojima su izmerene vrednosti lokalne brzine (u) i masene koncentracije (C_m).

Na osnovu lokalnih vrednosti, sračunate su *po dubini osrednjene* vrednosti brzine (KI-2.9, 10.5.2): \tilde{u} i koncentracije \tilde{C}_m (Tabela 2.3). Sračunati protok vode, pronos suspendovanog nanosa i srednju koncentraciju u ovom profilu, pri datim hidrološkim uslovima. (Širina vodnog ogledala $B=170 \text{ m}$).



Slika 2.20: Položaj vertikalna i pripadajućih segmenata i dijagrami rasporeda jediničnog protoka vode i pronosa suspendovanog nanosa u primeru 2.1.

Tabela 2.3: Ulazni podaci u primeru 2.1 i proračun pronosa suspendovanog nanosa.

Vertikalna	I	II	III	IV	V	VI	VII
y [m]	30	45	65	85	105	135	160
Δy [m]	37,5	17,5	20,0	20,0	25,0	27,5	22,5
h [m]	2,4	2,0	1,6	1,2	1,0	0,9	0,5
\tilde{u} [m/s]	2,9	2,4	2,1	2,2	2,0	1,4	0,9
\tilde{C}_m [kg/m ³]	8,4	9,0	8,9	9,0	8,8	7,9	6,1
$q = \tilde{u} \cdot h$ [m ² /s]	6,96	4,80	3,36	2,64	2,00	1,26	0,45
$q_{sm} = q \cdot \tilde{C}_m$ [kg/(s m)]	58,46	43,20	29,90	23,76	17,60	9,95	2,75

Rešenje. Sračunate vrednosti jediničnog protoka vode (q) i masenog pronosa nanosa (q_{sm}) date su u poslednja dva reda Tabele 2.3. Vrednosti protoka vode (Q) i pronosa nanosa (Q_{sm}) u razmatranom profilu iznose (KI-10.5.2, KI-11.10.3):

$$Q = \int_0^B q(y) dy \approx \sum_{i=1}^{i=7} q_i \Delta y_i = 6,96 \cdot 37,5 + \dots + 0,45 \cdot 22,5 \approx 560 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_{sm} = \int_0^B q_{sm}(y) dy \approx \sum_{i=1}^{i=7} q_{sm,i} \Delta y_i = 58,46 \cdot 37,5 + \dots + 2,75 \cdot 22,5 \approx 4,8 \text{ t/s}.$$

Srednja koncentracija u ovom profilu iznosi (KI-11.10.3-(11.97)):

$$\tilde{C}_{sm} = \frac{Q_{sm}}{Q} = 8,57 \approx 8,6 \text{ kg/m}^3.$$

* * *

Broj mernih vertikal. Prema međunarodnim standardima [166], broj vertikala M zavisi od širine rečnog korita (Tabela 2.4).

Tabela 2.4: Broj vertikala u zavisnosti od širine vodotoka [166].

Širina korita B [m]	< 100	100÷300	300÷1000	> 1000
Broj vertikala M	15÷20	20÷25	25÷30	30÷40

Nacionalni standardi daju nešto drugačije vrednosti; na primer, prema kineskim standardima: za $B = 50 \div 1000$ m, $M = 10 \div 25$, a prema indijskim standardima za širine $B = 30$ m dovoljne su 3 vertikale, za $B = 30 \div 300$, 5 vertikala, a za $B > 300$ m, 7 vertikala [162].

Položaj mernih vertikal. U načelu postoje tri mogućnosti:

(i) *Postavljanje vertikala zasnovano na poprečnom rasporedu koncentracije.* Vertikale se grupišu na manjem međusobnom rastojanju u zonama očekivanih većih promena koncentracije. Za utvrđivanje poprečnog rasporeda koncentracije preliminarni broj vertikala ne sme biti manji od $3 \div 5$. Konačni broj vertikala se može odrediti pomoću nomograma na Slici 2.21 u kome figurišu:

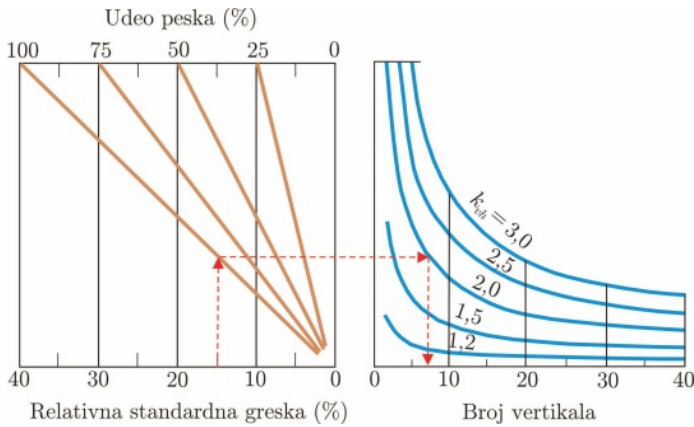
- parametar koncentracije, čija vrednost zavisi od hidrauličkih karakteristika toka:

$$k_{vh} = \frac{(\tilde{u}^2/h)_{\max}}{V^2/H} \propto \tilde{C} = \frac{q_s}{q}, \quad (2.4)$$

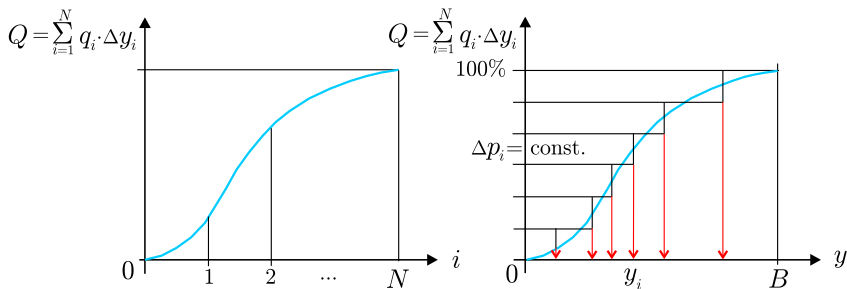
gde je: \tilde{u} – srednja brzina po vertikali, V – srednja profilska brzina, h – lokalna dubina, H – srednja dubina u poprečnom preseku, \tilde{C} – srednja koncentracija po vertikali, q – jedinični protok vode, q_s – jedinični pronos nanosa.

- relativna standardna greška RSE (videti Dodatak D9), čija se najveća vrednost usvaja kao ulazni podatak.

(ii) *Postavljanje vertikala zasnovano na jednakosti protoka.* Svakoju vertikali odgovara isti deo ukupnog protoka. Ovaj pristup zahteva da se prethodno, merenjem jediničnog protoka u nizu preliminarno izabranih N vertikala, formira kriva kumulativnog protoka i odredi ukupni protok u profilu Q (Slika 2.22-levo). Zatim se ista kriva „prenosi” na dijagram čija je apcisa odstojanje y , pri čemu širina vodnog ogleđala B odgovara ukupnom protoku Q (Slika 2.22-desno). Opseg na ordinati $0 \div Q$ se deli na jednake intervale Δp (na pr. 10%), čime se kriva „pretvara” u histogram i tako određuje položaj svake vertikale na osovini y . Postoji i iskustvena preporuka da razmak između bilo koje dve vertikale ne sme biti veći od $B/12$, niti da protok između tih vertikala premaši 10% ukupnog protoka [162].



Slika 2.21: Nomogram za određivanje najmanjeg broja vertikala u kojima se uzorkuje koncentracija suspendovanog nanosa [162].



Slika 2.22: Određivanje položaja mernih vertikala po kriterijumu jednakosti protoka; izloženi postupak ima nedostatak da merenja protoka nije moguće u vreme velikih voda kada je pronos nanosa najveći.

(iii) *Postavljanje vertikala na jednakom razmaku.* Širina vodnog ogledala B se deli na N jednakih segmenata, gde je N usvojeni broj vertikala (obično 6-10). U ovom slučaju za merenje se koriste hvatači-integratori (KI-11.10.1), sa istom brzinom kretanja duž svake vertikale („izokinetičko zahvatanje” uzoraka).

Zapremina svakog uzorka je proporcionalna protoku pripadajuće vertikale. Prosečna koncentracija u profilu jednaka je koncentraciji svih uzoraka po vertikalama.

Broj tačaka u kojima se zahvataju uzorci duž jedne vertikale može biti različit. Najmanje je 2 tačke po dubini h i to (mereno od površine vode) na: $0, 2h$ i $0, 8h$. Standardno je 5 tačaka: pri površini $(0, 0h)$, $0, 2h$, $0, 6h$, $0, 8h$ i pri dnu $(1, 0h)$:

$$\tilde{u} = (u_{0,0} + 3u_{0,2} + 3u_{0,6} + 2u_{0,8} + u_{1,0})/10; \tag{2.5}$$

$$\tilde{C} = (u_{0,0} C_{0,0} + 3u_{0,2} C_{0,2} + 3u_{0,6} C_{0,6} + 2u_{0,8} C_{0,8} + u_{1,0} C_{1,0})/\tilde{u}. \tag{2.6}$$

Prema međunarodnim standardima [166], najveći broj tačaka je 7.

Greške merenja. Za pouzdanost procene pronosa nanosa veoma je bitna analiza grešaka merenja. U Dodatku D9 ukratko su opisane vrste grešaka koje se javljaju pri merenju fizičkih veličina i uveden je pojam *neizvesnosti* merenja [44, 86, 162]. Kada je u pitanju merenje suspendovanog nanosa, ako se pretpostavi da je jedinični protok direktno merljiva veličina (pomoću ADCP uređaja), funkcija jediničnog pronosa suspendovanog nanosa je proizvod dve međusobno *zavisne* (korelisane) veličine:

$$q_{sm} = f(q, \tilde{C}_{sm}) = q \tilde{C}_{sm},$$

jer teorijski koncentracija nanosa zavisi od protoka. Ako se radi kraćeg pisanja, uvedu oznake za jedinični maseni pronos: $q_s \equiv q_{sm}$, a za osrednjenu masenu koncentraciju: $C \equiv \tilde{C}_{sm}$, kombinovana neizvesnost merenja suspendovanog nanosa po vertikalama je (Dodatak D9, [44]):

$$U^2(q_s) = \left(\frac{\partial q_s}{\partial q}\right)^2 U^2(q) + \left(\frac{\partial q_s}{\partial C}\right)^2 U^2(C) + 2r_{q,c} \left(\frac{\partial q_s}{\partial q}\right) \left(\frac{\partial q_s}{\partial C}\right) U(q) U(C). \quad (2.7)$$

U ovom izrazu neizvesnost izmerenog jediničnog protoka $U(q)$ je *brojno* jednaka standardnoj devijaciji od ukupno N izmerenih protoka, a neizvesnost koncentracije $U(C)$, standardnoj devijaciji od N izmerenih koncentracija:

$$U(q) = s_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N q_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N q_i\right)^2 / N}{N-1}} \quad (2.8)$$

$$U(C) = s_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N C_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N C_i\right)^2 / N}{N-1}}. \quad (2.9)$$

Jačina korelacione veze $q - C$ iskazana je vrednošću koeficijenta korelacije:

$$r_{q,c} = \frac{\text{Cov}(q, C)}{s_q s_c}, \quad (2.10)$$

gde je kovarijansa definisana izrazom:

$$\text{Cov}(q, C) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N q_i C_i - \left(\sum_{i=1}^N q_i \sum_{i=1}^N C_i\right) / N}{N-1}}. \quad (2.11)$$

Kada je se radi o proizvodu samo dve međusobno zavisne veličine, izraz (2.7) se može pojednostavniti (Dodatak D9, [44]):

$$U^2(q_s) = C^2 U^2(q) + q^2 U^2(C) + 2r_{q,c} C q U(q) U(C). \quad (2.12)$$

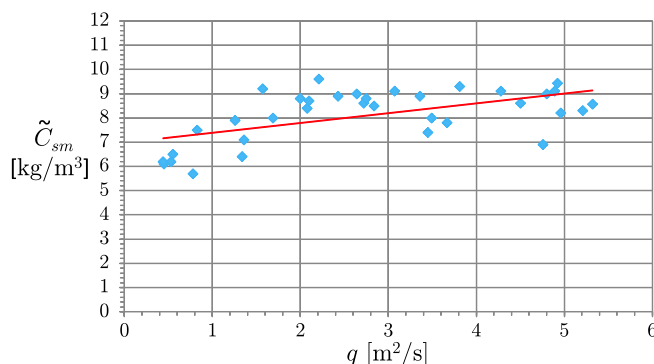
Navedeni izrazi važe isključivo za procenu neizvesnosti usled slučajnih grešaka merenja, dok su sistematske greške ovde izostavljene iz razmatranja. Primena opisane metodologije ilustruće se sledećim primerom.

■ **Primer 2.2.** U Tabeli 2.5 dati su rezultati 5 merenja jediničnog protoka vode q i srednje koncentracije suspendovanog nanosa \tilde{C}_{sm} u 7 vertikalna jednog profila. Sračunati neizvesnost merenja pronosa suspendovanog nanosa: $q_{sm} = q \tilde{C}_{sm}$.

Tabela 2.5: Rezultati merenja u primeru 2.2.

Vertikalna	I	II	III	IV	V	VI	VII
Merenje	q [m ² /s]						
1	4,96	4,80	3,36	2,64	2,00	1,26	0,45
2	4,76	4,28	3,45	2,72	2,08	1,34	0,53
3	5,21	5,32	2,84	2,21	1,57	0,83	0,78
4	3,67	4,92	3,81	3,07	2,43	1,69	0,55
5	4,50	4,89	3,49	2,75	2,10	1,36	0,44
Merenje	\tilde{C}_{sm} [kg/m ³]						
1	8,2	9,0	8,9	9,0	8,8	7,9	6,1
2	6,9	9,1	7,4	8,6	8,4	6,4	6,2
3	8,3	8,6	8,5	9,6	9,2	7,5	5,7
4	7,8	9,4	9,3	9,1	8,9	8,0	6,5
5	8,6	9,1	8,0	8,8	8,7	7,1	6,2

Rešenje. Kombinovana neizvesnost obuhvata sve slučajne greške merenja. Da bi se odredila, formiran je uzorak od ukupno $5 \times 7 = 35$ parova (q, \tilde{C}_{sm}) . Njihova korelacija prikazana je na Slici 2.23.



Slika 2.23: Korelacija jediničnog protoka i srednje masene koncentracije (linearna regresija daje vezu: $\tilde{C}_{sm} = 0,4q + 7$, ali je korelacija slaba: $r_{q,c} \approx 0,6$).

Ponovo će se koristiti skraćeno označavanje: $\tilde{C}_{sm} \equiv C$ i $q_{sm} \equiv q_s$. Statistička analiza nizova q i C daje srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse:

$$\bar{q} = 2,77 \text{ m}^2/\text{s}; s_q = U(q) = 1,56 \text{ m}^2/\text{s}; s_q^2 = U^2(q) = 2,42 \text{ (m}^2/\text{s)}^2;$$

$$\bar{C} = 8,11 \text{ kg/m}^3; s_c = U(C) = 1,10 \text{ kg/m}^3; s_c^2 = U^2(C) = 1,20 \text{ (kg/m}^3)^2.$$

Na osnovu podataka merenja, srednja vrednost jediničnog pronosa nanosa iznosi: $\bar{q}_s = 23,43 \text{ kg/(s m)}$. Primenjujući izraz za kombinovanu neizvesnost funkcije dve zavisne promenljive (2.12) dobija se: $U^2(q_s) = 162,67 + 43,71 = 206,38 \text{ (kg/s m)}$.

Prvi sabirak u datoj jednakosti predstavlja neizvesnost računatu kao da su promenljive q i C međusobno nezavisne, a drugi sabirak je „doprinos” zavisnosti (korelacije) promenljivih. Drugi sabirak je znatno manji od prvog, što potvrđuje da je u ovom slučaju korelacija razmatranih veličina relativno slaba. Sledi neizvesnost: $U(q_s) = 13,27 \text{ kg/s m}$ ($=s_{q_s}$). Standardna greška (videti Dodatak D9) jednaka je standardnoj devijaciji srednje vrednosti: $SE(q_s) = s_{q_s} / \sqrt{N} = 2,4 \text{ kg/(s m)}$. Relativna standardna greška iznosi: $RSE = SE / \bar{q}_s \times 100 = 10 \%$.

* * *

Međunarodni standard ISO 4363 [166] daje uputstva za procenu sistematske i slučajne greške pri merenju i određivanju srednje profilske koncentracije suspendovanog nanosa (Tabela 2.6).

Tabela 2.6: *Uzroci grešaka u merenju suspendovanog nanosa [166]; greške 1-4 se odnose na određivanje srednje koncentracije po dubini, a greške pod 5, na određivanje srednje profilske koncentracije.*

Uzrok greške	Vrsta i oznaka greške	
	sistematska	slučajna
1. Merni uređaj - hvatač	$e_{s,c}$	$e_{r,c}$
2. Laboratorijska obrada uzorka	$e_{s,s}$	$e_{r,s}$
3. Fluktuacije brzine pri zahvatanju	-	$e_{r,e}$
4. Ograničeni broj tačaka po vertikalima	$e_{s,p}$	$e_{r,p}$
5. Ograničeni broj mernih vertikalala	$e_{s,v}$	$e_{r,v}$

Iz Tabele 2.6 se vidi da greške „e” mogu biti *sistematske* (indeks „s”) ili slučajne (indeks „r”). Slučajne greške su neizvesnosti. Umesto statističke obrade podataka merenja, standard [166] primenjuje statističku obradu relativnih grešaka. Pri tome, *sistematska greška se računa kao srednja relativna greška, a slučajna greška (neizvesnost), kao standardna devijacija relativne greške.* Važe dva pravila:

(a) Ukupna sistematska greška jednaka je algebarskom zbiru pojedinačnih grešaka, ako je poznat znak svake od ovih grešaka. Ako znak nije poznat, sistematska greška dobija slučajni karakter i postaje „neizvesnost”.

(b) Ukupna slučajna greška (neizvesnost) jednog merenja srednje profilske koncentracije je [166]:

$$e_r = \sqrt{e_{r,v}^2 + \frac{\sum_{j=1}^M (q_j \tilde{C}_j)^2}{\left(\sum_{j=1}^M q_j \tilde{C}_j\right)^2}} (e_{r,c} + e_{r,s} + e_{r,e} + e_{r,p}) \quad (2.13)$$

gde je \tilde{C} – skraćena oznaka masene koncentracije suspendovanog nanosa, a q – oznaka jediničnog protoka vode.

Izraz (2.13) pokazuje da su greške merenja po vertikali množene jediničnim pro-nosima ($q\tilde{C}$), pri čemu se indeks $j = 1, \dots, M$ odnosi na vertikale (odnosno pri-padajuće segmente poprečnog profila).

Ako su jedinični pronosi suspendovanog nanosa približno jednaki, otpada pon-derisanje grešaka, pa izraz (2.13) prima jednostavniji oblik:

$$e_r = \sqrt{e_{r,v}^2 + (e_{r,c} + e_{r,s} + e_{r,e} + e_{r,p})/M}. \quad (2.14)$$

Način proračuna slučajnih grešaka pokazaće se na primeru mernog uređaja – hvatača. Relativna greška u i -tom merenju je:

$$E_{c,i} = \frac{C_i - C_i^*}{C_i^*}, \quad (2.15)$$

gde je C_i – masena koncentracija dobijena proizvoljno izabranim hvatačem, a C_i^* – koncentracija dobijena standardnim hvatačem USP61 („tačna” vrednost). Za kalibraciju hvatača potrebno je simulatano zahvatanje 20÷30 uzoraka pomoću oba uređaja.

Srednja relativna greška jednaka je sistematskoj grešci hvatača:

$$\bar{E}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{c,i} \equiv e_{s,c}, \quad (2.16)$$

a slučajna greška (neizvesnost) jednaka je standardnoj devijaciji:

$$s_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{c,i} - \bar{E}_c)^2}{N - 1}} \equiv e_{r,c}. \quad (2.17)$$

Način određivanja ostalih slučajnih grešaka iz Tabele 2.6 dat je u Dodatku D9.

Greške laboratorijske obrade uzoraka (KI-11.10.3) su uglavnom sistematskog karak-tera. Definišu se srednjim relativnim greškama u zavisnosti od primenjene labora-torijske metode (Tabela 2.7).

Treba naglasiti da tehnološki razvoj mernih uređaja potpuno menja i način ocene neizvesnosti merenja. Kao što je akustična ADCP tehnika već istisla hidrometrijsko krilo iz upotrebe, očekuje se da će ubrzo i merenje nanosa doživeti radikalne promene. Prelaziće se na kontinualno merenje koncentracije nanosa optičkim OBS (eng. *Optical Backscatter point Sensor*) i akustičkim ABS (eng. *Acoustic Backscatter profiling Sensor*) uređajima. Već sada, kombinovanje ADCP metode za konti-nualno merenje brzine i protoka sa klasičnim zahvatanjem uzoraka daje mogućnost pouzdanijeg korelisanja polja brzine i koncentracije, a integraciju pronosa po po-prečnom profilu čini bržom, lakšom i tačnijom nego kada se meri po vertikalama na konvencionalni način.

Tabela 2.7: Greške laboratorijske obrade uzoraka, prema [166].

Uzrok greške	Karakter greške	Veličina greške
I. Metoda isparavanja		
Očitavanje zapremine uzorka	slučajna	$E_V = \pm 0,5 \%$
Merenje mase čvrste faze	slučajna	$E_W = \pm 1 \%$
Nedovoljno dugo istaložavanje	sistematska	$E_s = -1 \%$
Prisustvo nerastvorenih materija	sistematska	$E_d = (1 \div 2) \%$
II. Metoda filtracije		
Prisustvo nerastvorenih materija u filtru	sistematska	$E_f = -1 \%$
Prolazak finih čestica kroz filtar	sistematska	$E_e = -(1 \div 2) \%$
Adsopcija vlage	sistematska	$E_a = (1 \div 2) \%$

* * *

Napomena 1: Za prikupljanje podataka o rečnom nanosu veoma je važna realizacija prethodno sačinjenog *programa terenskih merenja*, kao i analiza rezultata merenja, uključujući kvantifikovanje neizvesnosti. Sadržaj programa zavisi od namene podataka, odnosno od nivoa tehničke dokumentacije (studija/projekat) za čije potrebe se obavljaju merenja (Tabela 2.8).

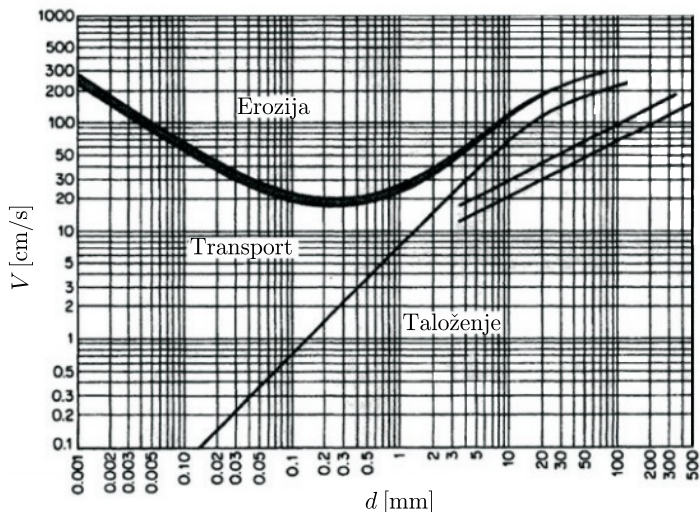
Tabela 2.8: Program merenja rečnog nanosa (prema [162]).

Cilj projekta	Snimanje korita	Vrsta merenja	Relevantne veličine
Godišnji pronos nanosa	-	Koncentracija nanosa; Pronos vuč.+susp. nanosa u mernim profilima	Protok vode Hidraulički parametri toka
Deformacija rečnog korita Zasipanje akumulacije	Periodično po deonicama i duž akumulacije; bilansiranje masa	Pronos ukupnog nanosa Pronos ukupnog nanosa na ulaznom i izlaznom mernom profilu	Granulometrijski sastav Fizička svojstva nanosa
Analiza fiz. procesa po deonicama; u zoni uspora; u akumulacijama	Periodično u profilima; aerofotogrametrija; LiDAR	Pronos koritoformirajućeg nanosa na ulaznom mernom profilu	Granulometrija Psamološki i hidraulički parametri

Napomena 2: Rezultati obrade uzoraka nanosa koriste se za prognozu deformacije rečnog korita, bilo pomoću složenih računskih modela, bilo pomoću jednostavnih empirijskih zavisnosti kao što pokazuje dijagram na Slici 2.24.

2.2.5 Geološko-geomehaničke podloge

Geotehnički istražni radovi sprovode se na terenu sa ciljem da se odredi prostorni raspored i debljina slojeva tla, kao i visina podzemnih voda. Fizička i mehanička svojstva tla, određuju se laboratorijskim ispitivanjem uzoraka. Kada je u pitanju regulacija reka, primarnu ulogu imaju *hidrogeološka* istraživanja. Na osnovu njih se izvode razne regulacione intervencije (prosecanje krivina, izrada rasteretnih kanala, rehabilitacija vlažnih staništa i dr.) kod kojih je bitna interakcija površinskih i podzemnih voda.



Slika 2.24: Kriterijum deformacije korita [62].

Terenski radovi se sprovode na osnovu *programa istražnih radova*, koji sadrži:

- Opis lokacije i ciljeva projekta, prikaz tehnologije sa grafičkim priložima;
- Regionalnu kartu područja koje istražuje i položajem svih objekata;
- Detaljnu kartu sa katastarskim parcelama, izohipsama i nivoima voda.

Uzorkovanje tla. Postupci uzorkovanja i ispitivanja tla obuhvataju:

(i) *sondažne jame*, koje se izvode mašinski ili ručno do dubina < 5 m, najčešće $1 \div 3$ m. U slučaju visokog nivoa podzemne vode, neophodno je crpljenje. Iz sondažne jame se uzimaju (ne)poremećeni uzorci tla (cilindri ili kocke), ili se određeni opiti obavljaju u samoj jami pomoću prenosive opreme.

(ii) *sondažne bunare*, sa dubinama > 5 m, uz obavezno podgrađivanje. Omogućavaju bolje sagledavanje rasporeda raznih vrsta tla i kartiranje slojevitosti. Podrazumeva se crpljenje podzemne vode, uzimanje uzoraka i/ili izvođenje nekih opita na licu mesta. Na sličan način se koriste i sondažne horizontalne galerije.

(iii) *sondažne bušotine*, koje se najčešće primenjuju, jer se relativno lako i brzo izvode, bez zastoja zbog podzemne vode. Izvode se pomoću ručne ili mašinske bušće garniture. Sondažno bušenje može biti udarno, rotaciono ili kombinovano.

Ručne bušće garniture se primenjuju za dubine od $5 \div 7$ m. Ispod nivoa podzemne vode, u peščanim ili šljunkovitim materijalima, primena ručnog sondiranja je praktično nemoguća, osim ako zidovi bušotine nisu osigurani pomoću čelične cevi, što zahteva dodatnu opremu (metalni tronožac sa vitlom). Ručnim sondiranjem se po pravilu uzimaju poremećeni uzorci.

Mašinsko bušenje se obavlja pomoću spiralnog svrdla ili pomoću tzv. sržne cevi sa krunom, do dubina koje mogu dostići $30 \div 50$ m. Svrdlom se zahvata poremećen

uzorak. Ako se na bušeću šipku montira čelični cilindar, može se sa dna bušotine uzeti neporemećeni uzorak. Sržne cevi sa krunom zahtevaju primenu nekog „bušećeg fluida” (vode, bentonitne glinene suspenzije) unutar kolone od čeličnih cevi. Pojediniosti su definisane našim tehničkim standardima za uzorkovanje tla.

Kako uzimanje neporemećenih uzoraka krupnozrnog tla (peska, šljunka) nije moguće, neki opiti za određivanje mehaničkih svojstava se preduzimaju na terenu „in situ”. To su [217]:

- standardni penetracioni opit (SPT);
- statički penetracioni opit (CPT);
- opit krilnom sondom;
- opit dilatometrom.

Detalji ovih opita se mogu naći u literaturi iz obalasti mehanike tla i geotehnike, kao i u tehničkim standardima.

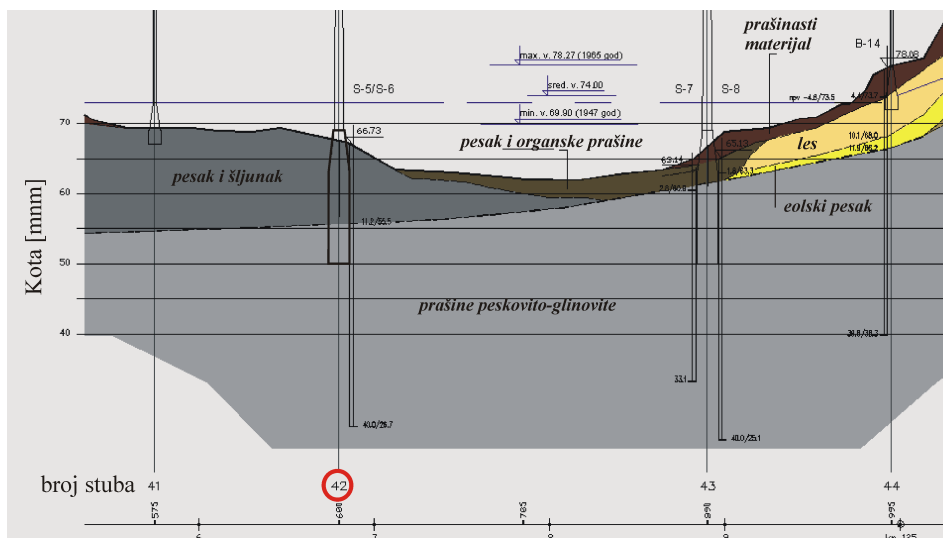
Klasifikacija tla. Za laboratorijske analize se koriste (ne)poremećeni uzorci tla. U zavisnosti od stepena poremećenosti, uzorci se klasifikuju u 3 kategorije: A, B i C, a svaka kategorija u 3 klase, u zavisnosti od mogućnosti sprovođenja određenih laboratorijskih testova [218].

Uzorak tla sadrži mešavinu zrna različitog mineraloškog sastava, raznih veličina i oblika, kao i mnoštvo intergranularnih šupljina (pora) koje mogu biti ispunjene vazduhom, vodom ili mešavinom vazduha i vode. Ovakav sastav utiče na mehanička svojstva tla. „AC klasifikacija tla”, koja je zasnovana na laboratorijskom određivanju granulometrijskog sastava, granice tečenja i indeksa plastičnosti, služi za identifikacija uzoraka tla. Osnov za klasifikaciju tla predstavlja krupnoća zrna od 0,075 mm, koja razdvaja krupnozrne od sitnozrnih materijala.

(i) *Krupnozrna tla* sadrže preko 50% zrna krupnijih od 0,075 mm. U ovu kategoriju spadaju: pesak (S), sa više od 50% zrna sitnijih od 2 mm i šljunak (G), sa više od 50% zrna krupnijih od 2 mm. Gradacija (ili graduisanost) tla je indikator zastupljenosti pojedinih frakcija granulometrijskog sastava i ukazuje na mehanička svojstva kao što su: stišljivost, otpornost na smicanje, vodopropusnost itd. Gradacija može biti dobra (W), jednolika (U) i slaba (P). Krupnozrna tla mogu imati primese prašine (F) i/ili gline (C)⁵.

(ii) *Sitnozrna tla* sadrže preko 50% čestica manjih od 0,075 mm i obuhvataju: prašinu (M), glinu (C) i organske primese (O). Karakteriše ih plastičnost, koja može biti: niska (L), sa granicom tečenja $w_L < 35\%$, srednja (I), sa $35\% < w_L < 50\%$ i visoka (H), sa $w_L > 50\%$. Na primer, ML označava prašinu niske plastičnosti, a CH – glinu visoke plastičnosti. Svojstva vezanih tla prikazana su tabelarno u Dodatku D3.

⁵U zagradi se slovima obeležavaju: vrsta tla, gradacija i primese; na primer, GW – šljunak, dobro graduisan; SUF – pesak, jednolike graduisanosti, sa primesama prašine.



Slika 2.25: Geološki poprečni profil dunavskog korita u zoni mosta kod Beške [68].

Za identifikaciju tla na terenu niz jednostavnih opita. Krupnozrni materijali se identifikuju vizuelno, uz pomoć sredstava kao što su lupa, metar, čekić. Procenjuje se: veličina i oblik zrna, tvrdoća, sadržaj CaCO_3 , gradacija. Za identifikaciju sitnozrnih materijala služe opiti trešenja, plastičnosti, konzistentnog stanja, suve čvrstoće i dr. Na kraju se sastavlja geotehnički izveštaj sa grafičkim priložima (karte sa položajem bušotina, geotehnički profili (Slika 2.25), krive granulometrijskog sastava, dijagrami plastičnosti i dr).

2.2.6 Ekološke podloge

Struka hidrotehničkog inženjera sve više zahteva znanja iz drugih oblasti. Jedna od tih oblasti je inženjerska ekologija, sa težištem na zaštiti površinskih voda i ekosistema u rečnom koritu i priobalju. Za regulaciju reka je zato važno prikupljanje podloga o ekološkom statusu vodotoka.

Kvalitet vode. Osnovni fizičko-hemijski pokazatelji kvaliteta vode su:

- temperatura;
- sadržaj kiseonika O_2 (DO);
- sadržaj ugljendioksida CO_2 ;
- kiselost/baznost pH;
- biološka i hemijska potrošnja kiseonika (BPK5 i HPK);
- ukupni organski ugljenik (TOC);
- sadržaj rastvornih mineralnih soli i električna provodljivost;
- sadržaj teških metala;
- providnost, boja, miris i ukus.

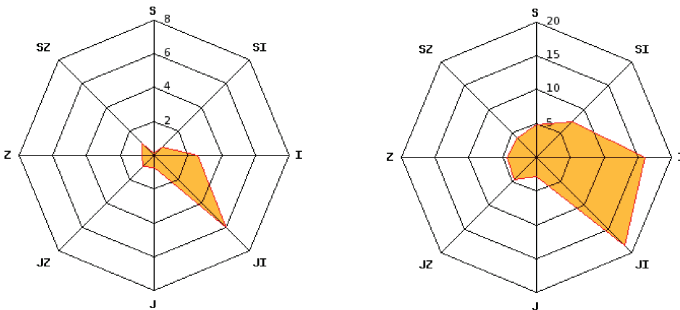
Objasnenje navedenih parametara kvaliteta vode i kako se oni koriste u definisanju ekološkog statusa površinskih voda biće dato u petom poglavlju ove knjige. Ovde se samo napominje da su režimi temperature, rastvorenog kiseonika i ugljendioksida u vodi od presudne važnosti za opstanak vodnih organizama, ali da ekološka održivost zavisi i od svih drugih parametara, kao što su: pH faktor, sadržaj mineralnih soli, teških metala i dr.

Parametri BPK5, HPK i TOC su indikatori stepena zagađenja vode, pri čemu prvi parametar kvantifikuje biološku potrošnju kiseonika na razgradnju organskih materija, drugi, hemijsku potrošnju kiseonika na oksidaciju i razgradnju organskih jedinjenja, a treći, zagađenje vode organskim materijama kroz prisustvo ugljenika iz prirodnih organskih materija (biomase, humusa, derivata amonijaka i dr.), kao i ugljenika iz veštačkih izvora (đubriva, pesticida, deterdženata i dr.).

Biološka raznovrsnost. Biološke podloge koriste se u projektima regulacije reka na dva načina. U okviru klasične regulacije reka od interesa su podaci o vegetaciji – za procenu hidrauličkih otpora i za utvrđivanje vrste i količine sirovina za izvođenje bioloških regulacionih radova. Za deo projekta koji se odnosi na uticaj regulacionih radova na životnu sredinu, neophodni su podaci o vrstama biljaka i životinja u vodotoku i priobalju, kao i njihovoj raznovrsnosti koja se uređenjem vodotoka mora u što većoj meri sačuvati.

2.2.7 Ostale podloge

Meteorološke podloge. U regulaciji reka se koriste i podaci o vetru. Brzina i usmerenje vetra (Slika 2.26) koristi se u proračunu visine talasa od vetra koji se mogu javiti na velikim rekama i jezerima. Visina talasa se uzima u obzir pri definisanju kote krune objekata za zaštitu od velikih voda (nasipa, brana i obaloutvrda). Podaci o vetru se statistički obrađuju da bi se odredile maksimalne projektne brzine vetra različitih verovatnoća pojave.



Slika 2.26: Primer ruže vetrova sa meteorološke stanice Beograd - Košutnjak; levo: prosečna brzina vetra po pravcima (m/s); desno: maksimalna brzina vetra („udari”) po pravcima (m/s); merenja se obavljaju na 10 m visine od tla i ažuriraju na sajtu Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ) svakih 5 min.

Drugi meteorološki podaci, kao što su temperature vazduha i pojava snega, mogu biti od značaja za izvođenje radova.

Ekonomske podloge. Ove podloge su neophodne za predračun regulacionih radova i dokazivanje njihove rentabilnosti. Obuhvataju cene: materijala (sa transportom), projektovanja, izvođenja i nadzora. Za analizu opravdanosti projekta, neophodni su podaci o zaduživanju (visina kredita, kamatne stope, rokovi otplate).

U projektima zaštite od poplava, ekonomske podloge čine podaci na osnovu kojih se mogu proceniti potencijalne štete (vrsta i broj ugroženih stambenih i infrastrukturnih objekata, cene sanacije ili rekonstrukcije objekata, veličina i namena plavnih površina, jedinične cene poljoprivrednih kultura itd.)

Sociološke podloge. Reč je o podacima koji su neophodni za sagledavanje uticaja uređenja vodotoka na život stanovnika u najširem smislu. Ti uticaji se odnose na: snabdevanje vodom, zdravlje ljudi, (ne)zaposlenost, rekreaciju, turizam. Sociološki aspekti su veoma važni za realizaciju nekog projekta, bilo da se radi o blagovremenom informisanju lokalne zajednice, kako se ova ne bi suprostavila radovima kad ovi započnu, bilo da se radi o razrešenju sukoba interesa samih učesnika (na primer, investitor zagovara korišćenje materijala iz lokalnog pozajmišta, a izvođač, zbog veće zarade, sličnog materijala dopremljenog sa strane).

Kulturno-istorijske podloge. Pri trasiranju regulisanog korita, a naročito u projektima zaštite od poplava, mora se evidentirati položaj istorijski značajnih objekata, kao i objekata koji su važni za kulturni identitet i život lokalne zajednice. Važno je i da se projektom uređenja vodotoka takvi objekti u potpunosti sačuvaju. U ovu vrstu podloga spadaju i stare karte i pisani dokumenti. Stare karte mogu ukazati na trend morfoloških promena korita u planu, što je od koristi pri trasiranju regulisanog korita. One takođe mogu ukazati na evoluciju ugroženosti od plavljenja, kao i merama koje su se u prošlosti preduzimale da bi se poplave stavile pod kontrolu (Slika 2.27).



Slika 2.27: Istorijske karte ugroženosti od poplava u Vojvodini iz 1942. godine; levo: pre interventivnih radova; desno: posle izgradnje odbrambenog sistema (arhiva muzeja Hidrosistema Dunav-Tisa-Dunav).

2.3 Regulacioni elementi

Regulacioni elementi, na kojima se zasniva projektovanje i izvođenje regulacionih radova su: merodavni protoci i nivoi, uzdužni i poprečni profili regulisanog korita, trasa regulisanog korita i regulacione građevine.

2.3.1 Izbor projektnog protoka

Sezonske varijacije protoka i nivoa u rekama su posledica neravnomernosti padavina na slivnom području. Hidrološki režim karakteriše manje–više pravilna smena sušnih i vlažnih perioda. U našim klimatskim uslovima, vrednost odnosa velikih i malih voda je kod velikih aluvijalnih reka reda 1:10, a kod malih bujičnih vodotoka, 1:100. U okviru takvog hidrološkog režima, u zavisnosti od ciljeva projekta (stabilizacija korita, zaštita od poplava, plovidba) bira se projektni protok (Tabela 2.9).

Tabela 2.9: *Projektni protoci i nivoi*

Cilj projekta	Projektni protoci/nivoi
Uređenje velikih aluvijalnih vodotoka sa pešćanim dnom	Srednji višegodišnji protok („srednja voda”, SV); oznaka: Q_{sv}
Uređenje malih bujičnih vodotoka sa šljunčanim dnom	Protok koji ispunjava osnovno korito („dominantni protok”), odnosno Srednja vrednost opaženih najvećih protoka u višegodišnjem periodu („srednja velika voda”, SVV); oznaka: Q_{svv}
Uređenje vodotoka za potrebe plovidbe	Protoci određenog trajanja („niski plovni nivo”, NPN); oznaka: Q_{npr} („visoki plovni nivo” VPN); oznaka: Q_{vpr}
Primarna zaštita od poplava - dimenzionisanje i trasiranje glavnih nasipa - kapacitet rasteretnih kanala i retencija - zapremina akumulacija	Apsolutni maksimalni protok Protoci određene verovatnoće 1%, 0,1% itd. („stogodišnja voda”); oznaka: $Q_{1\%}$ („hiljadugodišnja voda”); oznaka: $Q_{0,1\%}$ itd.)
Sekundarna zaštita od poplava dimenzionisanje i trasiranje letnjih nasipa	Sezonski (letnji) maksimalni protok („letnja velika voda”); oznaka: Q_{lvv}
Projektovanje vodozahvata Zaštita životne sredine Analiza kvaliteta vode	Apsolutni minimalni protok Srednja vrednost opaženih najmanjih protoka u višegodišnjem periodu („srednja mala voda”, MV); oznaka: Q_{mv}

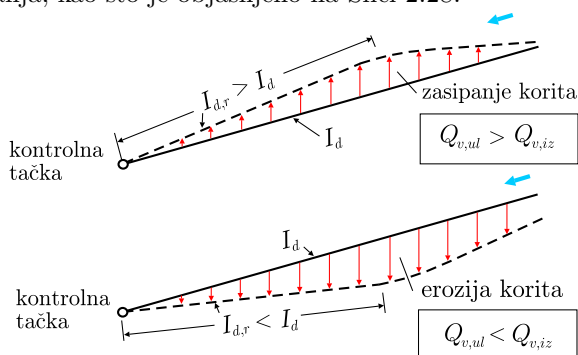
Načelno, projektni protok može biti promenljiv po deonicama istog vodotoka. U gornjem toku gde reka ima bujični karakter, korito se reguliše tako da primi velike vode; u srednjem toku, za projektni protok se obično uzima srednji višegodišnji protok, dok u donjem toku, to može biti srednji mali protok, ili protok dužeg trajanja (preko 200 dana godišnje). U našoj praksi se u regulaciji glavnog (minor) korita kao merodavan, koristi protok „srednje vode”.

Kada je u pitanju plovidba, projektni protok je predmet tehničko-ekonomskih kriterijuma. Pri tome je ključan izbor merodavnog *trajanja*. Na primer, na našem

sektoru Dunava u profilima hidroloških stanica Bezdan i Bogojevo, niske plovne nivoe označavaju kote nivoe zastupljenosti 92÷95%. U projektima „naturalne” regulacije malih vodotoka uzima se u obzir „ekološki protok”, posebno tzv. „garantovani ekološki protok” (videti peto poglavlje ove knjige).

2.3.2 Uzdužni profil regulisanog korita

Za projektovanje uzdužnog profila regulisanog korita, od velike je važnosti definisati *ravnotežni uzdužni nagib* rečenog korita $I_{d,r}$. To je uzdužni nagib pri kome su izjednačeni dotok vučenog nanosa na deonicu („ulazni tovar” $Q_{v,ul}$) i pronos vučenog nanosa na izlazu deonice („transportni kapacitet” $Q_{v,iz}$, KI-10.2). Kada je uslov: $Q_{v,ul} = Q_{v,iz}$ ispunjen, rečno korito dugoročno nije podložno deformaciji (eroziji ili zasipanju), ono je u „ravnotežnom stanju”. Ako navedeni uslov nije ispunjen, korito će vremenom prilagođavati svoj uzdužni nagib u pravcu dostizanja ravnotežnog stanja, kao što je objašnjeno na Slici 2.28.



Slika 2.28: Odnos postojećeg uzdužnog nagiba dna I_d i ravnotežnog nagiba $I_{d,r}$; kada dotok vučenog nanosa $Q_{v,ul}$ premaši transportni kapacitet deonice $Q_{v,iz}$, uzdužni nagib dna se povećava sve dok se transportni kapacitet i ulazni tovar ne izjednače. Povećanje nagiba dna se ostvaruje nagomilavanjem viška nanosa na uzvodnom delu deonice. Kada je dotok vučenog nanosa manji od transportnog kapaciteta, uzdužni nagib mora da se smanjuje, a manjak nanosa se podmiruje erozijom rečnog dna, sve dok se ne uspostavi uniformni pronos duž cele deonice prema [215].

Ako se regulacionim radovima ravnotežno stanje poremeti, regulisano korito će vremenom težiti da uspostavi novo ravnotežno stanje. Vreme koje je potrebno za dostizanje stabilnog ravnotežnog stanja je teško predvideti, jer zavisi od mnogih faktora, od kojih su najuticajni klimatsko-hidrološki uslovi i sastav materijala u kome je formirano rečno korito. Treba imati u vidu da evolucija korita ka ravnotežnom stanju nije posledica jednog ili više poplavnih događaja, već vodnog režima u nepredvidivo dugom vremenskom periodu. To predstavlja veliki problem za proračun ravnotežnog nagiba dna. Rešenje je da se uvede jedno bitno uprošćenje, a to je da je za evoluciju glavnog korita reprezentativan dominantni protok punog korita (KI-1.2), dok za inundacije to nije od značaja jer se ravnotežni nagib dna na njih ne odnosi.

Prvi korak u proračunu ravnotežnog nagiba dna je određivanje ulaznog tovara $Q_{v,ul}$. Poželjno je da se ova veličina utvrdi merenjem na terenu. Ako to nije moguće, pretpostaviti da je ulazni tovar jednak računskom transportnom kapacitetu uzvodne deonice. Ovo ima smisla samo ako je uzvodna deonica u ravnotežnom stanju, što se može ispitati obilaskom terena ili analizom istorijskih podataka i snimaka deonice iz vazduha.

Za proračun transportnog kapaciteta mogu se koristiti poznati obrasci za pronos vučenog nanosa, npr. obrazac MPM (KI-10.3). Ako uzvodna deonica nije u svom prirodnom stanju, već je poremećena regulacijom, ulazni tovar ne mora odgovarati transportnom kapacitetu. Tada se pronos $Q_{v,ul}$ mora proceniti merenjem.

Sledeći korak je proračun izlaznog tovara $Q_{v,iz}$. Koristeći geometriju i rapavost regulisanog korita, varira se uzdužni nagib njegovog dna, sve dok se ne utvrdi onaj nagib pri kome je transportni kapacitet jednak ulaznom tovaru: $Q_{v,iz} = Q_{v,ul}$. Tada je uspostavljen ujednačeni transport nanosa po celoj dužini toka. Izbor obrasca za proračun pronosa nanosa nije od presudnog značaja ako se za obe deonice (uzvodnu i onu koja se reguliše) koriste isti obrasci i rezultati poredi u relativnom smislu.

Ravnotežni nagib dna se definiše u odnosu na izabranu referentnu „kontrolnu“ tačku (Slika 2.28). Reč je o fiksnom profilu čija je stabilnost određena položajem stenskog ili betonskog praga (ili nekim drugim objektom) na dnu rečnog korita. Uzvodno od kontrolne tačke, evolucija korita ka ravnotežnom stanju odvija se kroz proces erozije ili zasipanja.

Ako se pokaže da je na uzvodnom kraju razmatrane deonice razlika između prvobitnog i ravnotežnog stanja nerealno velika, treba preispitati položaj kontrolne tačke i proveriti da nije previđena neka druga takva tačka.

U slučaju da se ne može ustanoviti kontrolna tačka, vreme dostizanja ravnotežnog stanja biće uslovljeno stabilnošću obala. Visinu obale (koja nije u steni ili tvrdoj glini) diktira stabilnost kosine, a kada se erozijom ta stabilnost naruši, dolazi do obrušavanja obale, širenja korita, smanjenja brzine toka i transportnog kapaciteta za vučeni nanos. Na taj način se korito širi, sve dok se ne izjednači transportni kapacitet sa ulaznim tovarom.

U okviru ove analize treba razmotriti i mogućnost armiranja (samopopločavanja) korita (KI-9.3), jer taj proces može zaustaviti eroziju korita pre nego što je dostignut ravnotežni uzdužni nagib dna.

Izloženo upućuje na zaključak da se radi o isuviše složenim procesima da bi se rezultati proračuna mogli uzeti sa apsolutnom sigurnošću. Rezultate treba kritički analizirati i prihvatati kao indikativne u kvalitativnom smislu.

■ **Primer 2.3.** Odrediti ravnotežni uzdužni nagib dna i trend deformacije korita jedne deonice, ako se imaju u vidu sledeći podaci.

(i) Korito uzvodne (neregulisane, a stabilne) deonice je trapeznog poprečnog preseka, sa širinom u dnu 20 m, nagibom obala 1:1,25 i uzdužnim nagibom dna $I_d = 0,005$. Prosečna visina obala u odnosu na dno korita iznosi 2 m. Usled obraslosti vegetacijom, vrednost Maningovog koeficijenta iznosi $0,04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Na osnovu uzoraka materijala sa rečnog dna određene su krupnoće zrna: $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$; $d_{90} = 1 \text{ mm}$. (Gustina nanosa $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$, vode $\rho = 1 \text{ t/m}^3$.)

(ii) Nizvodno od opisane deonice, nalazi se deonica koju treba regulisati na dužini od 500 m. Projektom je predviđeno da regulisano korito ima trapezni poprečni presek širine u dnu 30 m, sa kamenom obaloutvrdom u nagibu 1:1,5. Rapavost regulisanog korita je $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Na nizvodnom kraju regulisane deonice postoji betonski prag koji određuje morfološku kontrolnu tačku.

(iii) Hidrološkom analizom je definisan protok povratnog perioda 5 godina $Q_{20\%} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$. U proračunu pretpostaviti da nema pritoka i da je tečenje ustaljeno i jednoliko.

Rešenje. Primenjujući Maningovu jednačinu za jednoliko tečenje na *uzvodnoj* deonici, može se pokazati da normalnoj dubini $h = 2 \text{ m}$ (pri punom koritu), odgovara protok $Q = 114 \text{ m}^3/\text{s}$. Zaključak je da se može smatrati da je dominantni protok približno jednak $Q_{20\%} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretpostaviće se da vrednost dominantnog protoka važi i za deonicu koja se reguliše.

Pri protoku $Q_{20\%} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$, na uzvodnoj deonici normalna dubina je $h = 2,07 \text{ m}$, a hidraulički radijus $R = 1,75 \text{ m}$ (videti iterativni postupak KI-3.2, Primer 3.1). Za proračun transportnog kapaciteta za vučeni nanos može se primeniti obrazac MPM (KI-10.3.2-(10.22)):

$$q_{vm} = 1,3 (\tau'_o - \tau_{oc})^{3/2},$$

gde je q_{vm} – jedinični maseni pronos [$\text{t}/(\text{sm})$], τ_{oc} – kritični tangencijalni napon za pokretanje zrna d_{50} (KI-10.3.2-(10.21)), a τ'_o – redukovani tangencijalni napon na dnu (KI-2.3-(2.11), 10.3.2-(10.23)):

$$\tau_{oc} = 0,047 g (\rho_s - \rho) d_{50}; \quad \tau_o = \rho g R I_d; \quad \tau'_o = (Q_r/Q) (n_r/n)^{3/2} \tau_o.$$

Protok Q_r se odnosi samo na deo poprečnog preseka u kome je tangencijalni napon veći od kritičnog: $\tau_o > \tau_{oc}$, a Maningov koeficijent $n_r = d_{90}^{1/6}/26 = 0,0122 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, samo na deo ukupnog otpora koji proizilazi iz apsolutne krupnoće zrna na dnu.

Vrednosti redukcionih faktora su: $Q_r/Q \approx 1$ i $(n_r/n)^{3/2} = 0,168$. Ostali rezultati: $\tau_{oc} = 0,00038 \text{ kPa}$; $\tau_o = 0,086 \text{ kPa}$; $\tau'_o = 0,014 \text{ kPa}$; $q_{vm} = 0,0021 \text{ t}/(\text{sm}) = 2,1 \text{ kg}/(\text{sm})$. Pretpostavljajući da je pojas kretanja vučenog nanosa jednak širini korita (20 m), dolazi se do pronosa u celom profilu (transportnog kapaciteta) $Q_{vm} = 42 \text{ kg/s}$, što je ulazni tovar za nizvodnu deonicu. Rezultati proračuna pronosa nanosa na ovoj deonici, za koju važe faktori $Q_r/Q \approx 1$ i $(n_r/n)^{3/2} = 0,339$, prikazani su u Tabeli 2.10.

Tabela 2.10: Pronos nanosa u zavisnosti od uzdužnog nagiba dna.

I_d [-]	h [m]	A [m ²]	B [m]	O [m]	R [m]	τ_o [Pa]	τ'_o [Pa]	q_{vm} [kg/(s m)]	Q_v [kg/s]
0,0050	1,23	39,03	33,68	34,42	1,13	55,62	18,9	3,29	98,8
0,0030	1,43	45,87	34,28	35,15	1,31	38,41	13,0	1,86	55,9
0,0025	1,51	48,60	34,52	35,43	1,37	33,64	11,41	1,52	45,6
0,0023	1,55	49,91	34,63	35,57	1,40	31,66	10,74	1,38	41,5

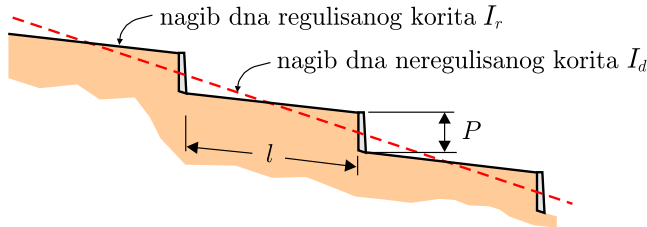
Vrednost transportnog kapaciteta se izjednačava sa ulaznim tovarom pri uzdužnom nagibu dna $I_{d,r} = 0,0023$, koji uspostavlja ravnotežno stanje korita. Pretpostavljajući da je proces promene nagiba dna kontinualan, rotacijom linije dna oko kontrolne tačke, može se prognozirati najveća eroziona dubina na uzvodnom kraju deonice: $500 (0,005-0,0023) = 1,35$ m.

Ostaje da se proverii ima li uslova za armiranje (samopopločavanje) korita koje bi moglo da zaustavi dostizanje ravnotežnog nagiba dna. Srednja krupnoća zrna u armirajućem sloju iznosi, prema kriterijumu MPM: 16 mm, a prema kriterijumu Šildsa: 37 mm (KI-12.2.2.2-(12.27)). Kako su navedene vrednosti daleko veće od najkrupnijeg zrna ($d_{90} = 1$ mm), može se zaključiti da u ovom slučaju nema dovoljno krupnih frakcija za formiranje armirajućeg sloja koji bi poremetio uspostavljanje ravnotežnog nagiba dna.

* * *

Potpuno je drugačija situacija kada projekat regulisanog korita predviđa *veštačku* izmenu uzdužnog profila. To je slučaj kod uređenja bujičnih vodotoka, gde je neophodno umirenje toka, što se postiže smanjenjem uzdužnog nagiba dna nizom kaskada (Slika 2.29).

Optimalni uzdužni profil regulisanog korita bujičnih vodotoka počiva na tehničko-ekonomskoj analizi, imajući u vidu željene ciljive (smanjenje brzine i erozionog potencijala toka) i cenu koštanja kaskada (u zavisnosti od njihovog broja i visine). Proračun kaskada biće prikazan je u narednom poglavlju koje je posvećeno regulacionim građevinama.



Slika 2.29: Smanjenje uzdužnog nagiba dna pomoću kaskada; visina kaskada P i njihov razmak l određuju broj kaskada koji je potreban da bi nagib dna regulisanog korita I_r bio u željenoj meri manji od prirodnog nagiba dna I_d .

2.3.3 Poprečni profil regulisanog korita

U našoj praksi se nekada poprečni profil regulisanog korita dimenzionisao na projektni protok, pretpostavljajući ustaljeno jednoliko tečenje. Na normalnu dubinu⁶ se, shodno iskustvu, dodavala rezervna visina. Sa današnjim sredstvima i metodom proračuna, ovaj pristup više nema opravdanja. Tečenje u rekama je *neustaljeno*, sa krivom protoka u obliku petlje (KI-5.5.1), koja pokazuje da zavisnost protoka i kote nivoa nije jednoznačna – pri istom protoku, dubina na silaznoj grani hidrograma je veća od one na ulaznoj grani. To znači da dimenzije projektnog poprečnog profila treba proveriti i u neustaljenom režimu, uz proveru stabilnosti korita na pokretanje materijala na dnu u celom opsegu frakcija sa granulometrijske krive.

Osnovni kriterijum valjanosti oblika i veličine poprečnog profila regulisanog korita je da ono ima dovoljnu propusnu moć za projektni protok, odnosno merodavni poplavni talas. Međutim, to je povezano i sa uzdužnim nagibom dna. Ako ovaj nije dobro određen, ni projektovani poprečni presek dugoročno neće biti održiv. Geometrija korita aluvijalnog vodotoka je u stalnom procesu promena u pravcu dostizanja dinamičke ravnoteže (videti hipoteze ekstremnih uslova, KI-14.2).

Širina glavnog korita. Za većinu vodotoka je karakteristično da im je dno korita formirano od krupnog šljunkovitog materijala, a obale, od lakše pokretnog peskovitog materijala. Tada deformacija korita ka ravnotežnom stanju ide lakše u pravcu širenja korita nego njegovog produbljenja. To znači da, pored propusne moći, projektni kriterijum treba da bude i potencijalna promena širine korita da bi se uspostavio ujednačen raspored brzine, tangencijalnog napona i pronosa nanosa duž vodotoka. Proračun može biti veoma uprošćen. Evo ilustrativnog primera.

■ **Primer 2.4.** Razmatra se vodotok sa obalama od lako pokretnog materijala, kod koga se može očekivati erozija obala, ali ne i značajna promena uzdužnog nagiba dna. Razmatraju se dve pravolinijske deonice ovog vodotoka, pretpostavljajući da im je presek pravougaoni, vrednost koeficijenta otpora ista, a tečenje ustaljeno jednoliko. Uzvodna deonica ima širinu minor korita $B_1 = 15$ m, uzdužni nagib dna $I_{d1} = 0,0005$ i dubinu pri dominantnom protoku $h_1 = 1,8$ m. Prognozirati ravnotežnu širinu korita na drugoj, nizvodnoj deonici, koja ima nagib dna: $I_{d2} = 0,0007$.

Rešenje. Kako je $I_{d2} > I_{d1}$, mora biti dubina $h_2 < h_1$. Da bi se uspostavio ravnomerni pronos vučenog nanosa, mora biti zadovoljen uslov: $\tau_{o2} = \tau_{o1}$:

$$\rho g R_1 I_{d1} = \rho g R_2 I_{d2} \Rightarrow R_2 = R_1 (I_{d1}/I_{d2}), \quad (2.18)$$

gde je $R = A/O = Bh/(B + 2h)$ – hidraulički radijus, a A – površina poprečnog preseka.

⁶U francuskoj literaturi, termin „regulacija” se koristi za povlačenje trase regulisanog korita, a termin „normalizacija” na određivanje njegovog uzdužnog nagiba i dimenzionisanje poprečnog preseka [93].

Kombinovanjem jednačine (2.18) i Manningove jednačine ustaljenog tečenja:

$$\frac{1}{n} A_1 R_1^{2/3} I_{d1}^{1/2} = \frac{1}{n} A_2 R_2^{2/3} I_{d2}^{1/2}, \quad (2.19)$$

dobija se:

$$A_2 = A_1 \left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}} \right)^{1/6}. \quad (2.20)$$

Iz sistema jednačina (2.18) i (2.20), napisanih u razvijenom obliku:

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_2 h_2}{B_2 + 2 h_2} &= \frac{B_1 h_1}{B_1 + 2 h_1} \left(\frac{I_{d1}}{I_{d2}} \right) \\ B_2 h_2 &= B_1 h_1 \left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}} \right)^{1/6} \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

rešavaju se nepoznate h_2 i B_2 . Eliminacijom promenljive B_2 iz ovog sistema dobija se kvadratna jednačina po nepoznatoj h_2 :

$$2 h_2^2 - (B_1 + 2 h_1) (I_{d2}/I_{d1})^{7/6} h_2 + B_1 h_1 (I_{d2}/I_{d1})^{1/6} = 0. \quad (2.22)$$

Ova jednačina ima dva realna korena: $h_2' = 12,64$ m i $h_2'' = 1,13$ m, od kojih je drugi fizički realan. Njemu odgovara širina korita $B_2 \approx 25$ m. Ovako značajno proširenje korita zahteva duži vremenski period, u kome se mogu očekivati periodične promene dominantnog protoka i brzine morfoloških promena.

Širina korita za veliku vodu. Korito za veliku vodu obuhvata glavno korito i plavne površine – inundacije. Širina ovog korita zavisi od hidroloških uslova i konfiguracije terena. Osnovni kriterijum je da korito za veliku vodu ima dovoljnu propusnu moć za evakuaciju projektnog poplavnog talasa određene verovatnoće pojave. Širina korita je tipično određena razmakom nasipa. Ukoliko ne postoje ograničenja (uglavnom slučaj ruralnih područja), razmak nasipa je predmet tehničko-ekonomske optimizacije, koja se obrazlaže u narednom poglavlju.

2.3.4 Regulacione građevine

Regulacione građevine biće predmet narednog poglavlja, u kome će se detaljno opisati konstruktivne karakteristike i obrazložiti metode dimenzionisanja. Ovde se definišu tipovi građevina i prikazuju njihovi osnovni konstruktivni elementi, u onoj meri u kojoj je to neophodno za razumevanje načela trasiranja regulisanog korita.

Podela regulacionih građevina. Prema funkciji i položaju, regulacione građevine se mogu podeliti kao što je prikazano u Tabeli 2.11.

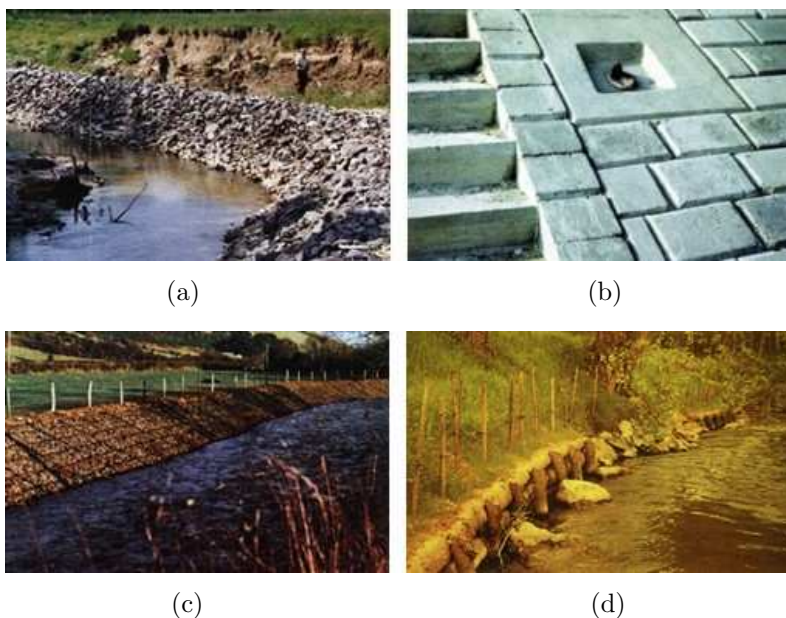
Tabela 2.11: Podela regulatornih građevina.

GRAĐEVINE U REČNOM KORITU	
paralelne sa rečnim tokom	
primarne	sekundarne
<i>obaloutvrde</i> <i>prave paralelne građevine</i>	<i>usmeravajuće građevine</i> <i>građevine za usporenje toka</i>
upravne na rečni tok	
primarne	sekundarne
<i>naperi</i> <i>pregrade</i> <i>pragovi i kaskade</i>	<i>traverze</i> <i>međunaperi</i> <i>rešetkaste građevine</i>
specijalne građevine: skretači toka	
GRAĐEVINE VAN REČNOG KORITA: <i>nasipi</i>	

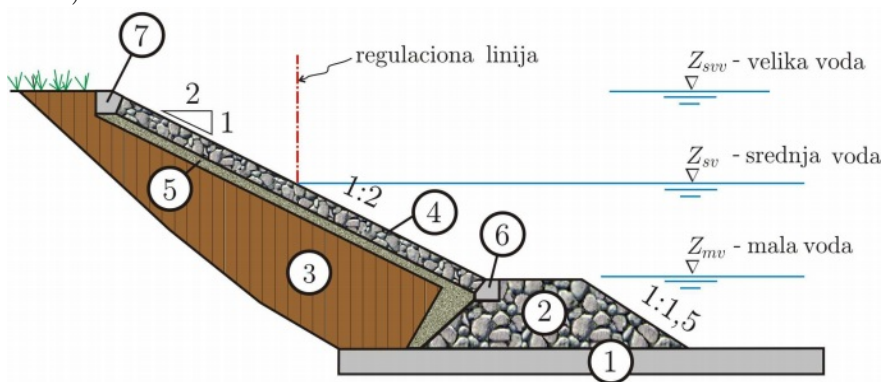
Obaloutvrde su građevine za zaštitu obala od erozije. Grade se do punog osnovnog korita (do kote srednje velike vode Z_{svv}), najčešće duž spoljašnjih, konkavnih obala u krivinama, ali i na pravolinijskim deonicama. Na Slici 2.30 prikazane su obaloutvrde sa raznim tipovima obloge, a na Slici 2.31 poprečni presek tipične obaloutvrde od kamena.

Prave paralelne građevine (PPG) grade se u rečnom koritu radi njegovog suženja, najčešće duž spoljašnjih, konkavnih obala. Visina ovih građevina, koje se, kao što ime kaže, pružaju paralelno sa rečnim tokom, određena je kotom nivoa srednje vode (Z_{sv}), što znači da je ova građevina u periodu poplava pod vodom. PPG se najčešće grade od krupnog kamena (Slike 2.32 i 2.33). Polja između traverzi se vremenom ispunjavaju finim rečnim nanosom, tako da se prirodnim putem formira nova obala.

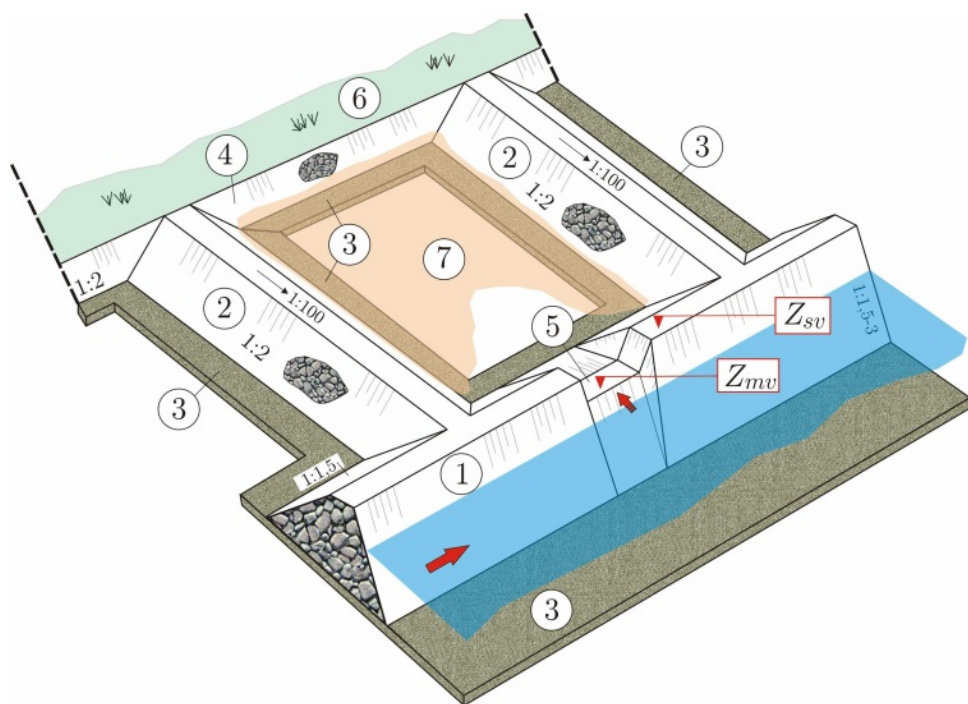
Naperi su glavne poprečne građevine koje se po pravilu grade duž unutrašnjih, konveksnih obala u krivinama, ili duž pravolinijskih deonica. Izazivaju suženje rečnog korita, povećanje dubine, i odbijanje toka od obale, čime se ona štiti od erozije. Više napera čini „sistem napera”. Broj, dužina i međusobni razmak napera u sistemu određuju se za svaku deonicu posebno. Kota krune napera odgovara koti srednje vode (Z_{sv}), što znači da su naperi prelivne građevine (Slika 2.34). Pod uticajem napera, u međunaperskim poljima se javlja povratno (recirkulaciono) strujanje vode koje smanjuje brzinu i energiju toka, tako da se stvaraju uslovi za taloženje nanosa. Vremenom se međunaperska polja prirodnim putem popunjavaju, čime se uspostavlja nova obala. Naperi se najčešće grade od krupnog kamena ili slaganih žičanih korpi ispunjenih kamenom – gabiona (Slika 2.35).



Slika 2.30: Razne vrste obaloutvrda, sa oblogama od: (a) – kamenog nabačaja (ruralna područja), (b) – betonskih blokova (urbana područja), (c) – gabiona [138] (ruralna i urbana područja) i (d) – biljnog materijala („naturalno“ uređenje malih vodotoka)



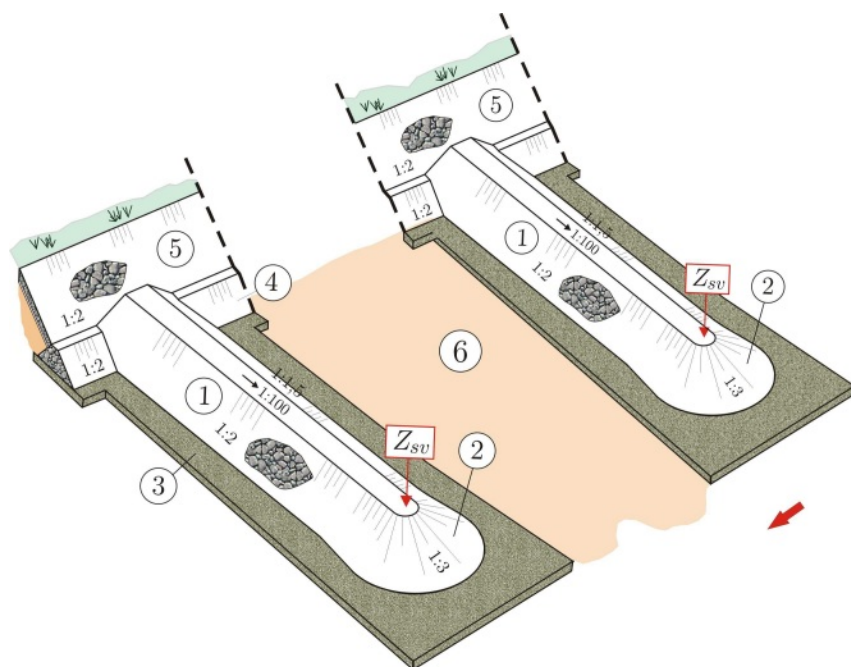
Slika 2.31: Konstrukтивni elementi tipične obaloutvrde: 1 – elastična podloga (vrbovo pruće, geotekstil, tucanik), 2 – telo nožice od krupnog kamena, 3 – izravnavajući sloj tla („balast“), 4 – obloga od kamena, 5 – peščani filtar za sprečavanje ispiranja sitnih čestica iz zaleđa, 6 – betonska uporna greda za prenos opterećenja sa obloge na nožicu, 7 – završni venac (kameni blokovi ili betonske grede). Konstrukтивni elementi obaloutvrda se, svaki ponaosob, dimenzionišu po kriterijumima hidrauličke funkcionalnosti i stabilnosti na statička i dinamička opterećenja.



Slika 2.32: Konstruktivni elementi tipične PPG; 1 – telo paralelne građevine od kamena; 2 – traverza; 3 – tepih od tucanika; 4 – obaloutvrda u zoni traverzi; 5 – otvor za upuštanje vode u polje između traverzi; 6 – zatravljena obala; 7 – istaloženi nanos.



Slika 2.33: Prava paralelna građevina na Velikoj Moravi kod Bagrdana; 1 - telo PPG; 2 - traverza



Slika 2.34: Konstruktivni elementi tipičnog napera; 1 – telo napera; 2 – glava napera; 3 – podloga – sloj tucanika, (fašinski madrac, geotekstil); 4 – nožica obaloutvrde; 5 – lokalna obaloutvrda na mestu napera; 6 – međunapersko polje zasuto nanosom.



Slika 2.35: Naperi: prost naper od kamena (levo) i naperi od gabiona (desno) [137].

Pregrade su poprečne regulacione građevine koje služe za pregrađivanje rukavaca i koncentraciju protoka u glavnom rečnom koritu u periodima malih i srednjih voda. U periodima velikih voda, pregrade postaju prelivne, pa se njihova stabilnost obezbeđuje izborom odgovarajućeg materijala (krupni kamen, gabioni) koji može da odoli velikim brzinama prelivnog mlaza (Slika 2.36).

Pragovi su po visini mnogo niže građevine od pregrada i koriste se za stabilizaciju korita bujičnih vodotoka ili za podsticanje zasipanja dubokih mesta (proloka) u koritima ravničarskih reka.

Za razliku od pragova, čija se kruna uklapa sa dnom korita, pa mnogo ne utiču na nivoe vode, **kaskade** su poprečne građevine koje svojom visinom i međusobnim razmakom utiču na nivoe i na taj način služe za kontrolu dubine i brzine toka (Slika 2.36).



Slika 2.36: Tipični primeri poprečnih građevina; levo: kamena pregrada dunavskog rukavca kod Mohova; desno: kasada od gabiona [1].

2.3.5 Trasa regulisanog korita

Pri trasiranju regulisanog korita mora se voditi računa o brojnim faktorima, kao što su: morfologija rečnog korita u postojećim uslovima, geotehnička svojstva obala, hidrološko-hidraulički režim vodotoka, položaj objekata, troškovi eksproprijacije.

2.3.5.1 Načela trasiranja

Osnovni principi trasiranja regulisanog korita mogu se sumirati kroz sledećih 10 „zlatnih pravila“:

1. Za regulisanje glavnog korita merodavan je protok srednje vode Q_{sv} .
2. Osnovni regulacioni elementi – *regulaciona širina* B_r i *regulacioni poluprečnik krivine* R_k (odnosno zakrivljenost $r_k = 1/R_k$) određuju se kod reka (ako su u prirodnom režimu) na osnovu statističkih morfoloških zavisnosti $B(Q_{sv}, x)$ i $r_k(Q_{sv}, x)$, odnosno proračunom vrednosti moda/medijane empirijskih funkcija gustine raspodele veličina B i r_k , na način na koji je to prikazano u prvoj knjizi (KI-14.4.2).
3. Na situaciji se povlače *regulacione linije* duž leve i desne obale tako da regulaciona širina bude uniformna na celoj deonici: $B_r = \text{const}$. Pri tome, obim zemljanih radova treba da bude što manji. U tom cilju treba težiti da se regulaciona linija u krivinama što više poklopi sa linijom visoke, konkavne obale. Uslov $B_r = \text{const}$ nije moguće ostvariti bez regulacionih građevina, koje moraju biti smišljeno odabrane i tako postavljene da se željeni hidraulički efekti postignu sa što manje troškova.
4. Treba težiti da broj krivina (hodova) ostane isti kao u prirodnim uslovima; kad god je moguće, izbegavati prosecanje krivina, zbog skupih radova i nepredvidivih morfoloških posledica.

5. Krivine regulisanog korita najlakše se opisuju kružnim lukovima (kasnije će se videti da postoje i druge mogućnosti). Treba težiti da poluprečnici budu što više ujednačeni duž vodotoka.
6. Treba težiti „glatkom” prelazu iz krivine u krivinu, bez kratkih pravolinijskih deonica između susednih krivina, tako da se prelaz iz krivinu u krivinu obavi u jednom profilu - „infleksiji” (kada su krivine suprotnog smera), ili „sifleksiji” (kada su krivine istog smera). U slučaju infleksije, centri sukcesivnih krivina treba da leže na istoj pravoj.
7. Izbegavati dugačke pravolinijske deonice, jer su one po pravilu nestabilne (pri niskim protocima, tok u pravolinijskim deonicama spontano meandrira, KI-1.3.1).
8. Oprezno sa prosecanjem krivina! Jedan usamljeni prosek obično izaziva neželjene morfološke posledice na deonici, pa ga treba izbegavati, ili zameniti sistemom preseka. Obavezno treba analizirati reakciju vodotoka na prosecanje, kao što je regresivna erozija (KI-12.2.2.3), rušenje obala, zasipanje nizvodnih deonica. Proceniti i da li je pri nailasku velikih voda moguće „samoprosecanje” oštih krivina.
9. Pregrađivanju rukavaca u cilju koncentracije protoka u glavnom koritu, povećanja dubine i transportnog kapaciteta za nanos, pristupiti smišljeno. Broj pregarada, njihov položaj i efekte, utvrditi pomoću hidrauličkih proračuna i ekonomske optimizacije.
10. Kod strmih bujičnih vodotoka, osnovni zadatak se sastoji u određivanju optimalnog uzdužnog profila regulisanog korita. Rešenje ovog zadatka počiva na tehničko-ekonomskoj analizi, imajući u vidu, s jedne strane, hidrauličke i psamološke efekte koji se žele postići (smanjenje brzine toka i njegovog erozionog potencijala), a s druge strane, troškove izgradnje regulacionih građevina (broj i visina kaskada).

■ **Primer 2.5.** Na Slici 2.37 prikazana je hipotetička rečna deonica sa ucrtanim regulacionim linijama i građevinama. Pretpostaviti da su regulacioni elementi (B_r , R_k , C) poznati. Obrazložiti dato rešenje u svetlu formulisanih načela.

Rešenje. Linije ureza srednje vode (plave boje), povučene su na osnovu proračuna nivoa pri protoku Q_{sv} . Regulacione linije (crvene boje) su paralelne linije na odstožanju regulacione širine B_r . Ove linije su povučene probanjem, u postupku koji je obuhvatio nekoliko faza. Najpre su određene granice krivina (označenih 1,2,...,5), koje su postavljene u inflecionim profilima, tako da nema pravolinijskih deonica.

Regulacione linije u prve četiri krivine (1,2,3 i 4) su u obliku prostih kružnih lukova, sa centrima $C_1 - C_4$ i poluprečnicima ujednačene dužine $R_{k1} - R_{k4}$. Poslednja, 5. krivina je složena, sa dva centra (duž iste prave) C_5 i C_6 i sa dva poluprečnika R_{k5} i R_{k6} (Slika 2.37).

Princip da regulaciona linija u krivini prati visoku, konkavnu obalu, dosledno je primenjen u prve dve uzvodne krivine (1 i 2), s tim da se u prvoj to odnosi na levu, a u drugoj, na desnu obalu. Sledeće dve krivine (3 i 4) su prosečene, tako da regulacione linije označavaju novo rečno korito. Krivina br. 5 je regulisana u postojećem koritu, čija je širina znatno veća od regulacione širine B_r (regulacione linije unutar linija ureza). Na kraju deonice počinje račvanje toka, a regulacione linije prate glavno korito, dok je rukavac pregradom zatvoren (Slika 2.37).

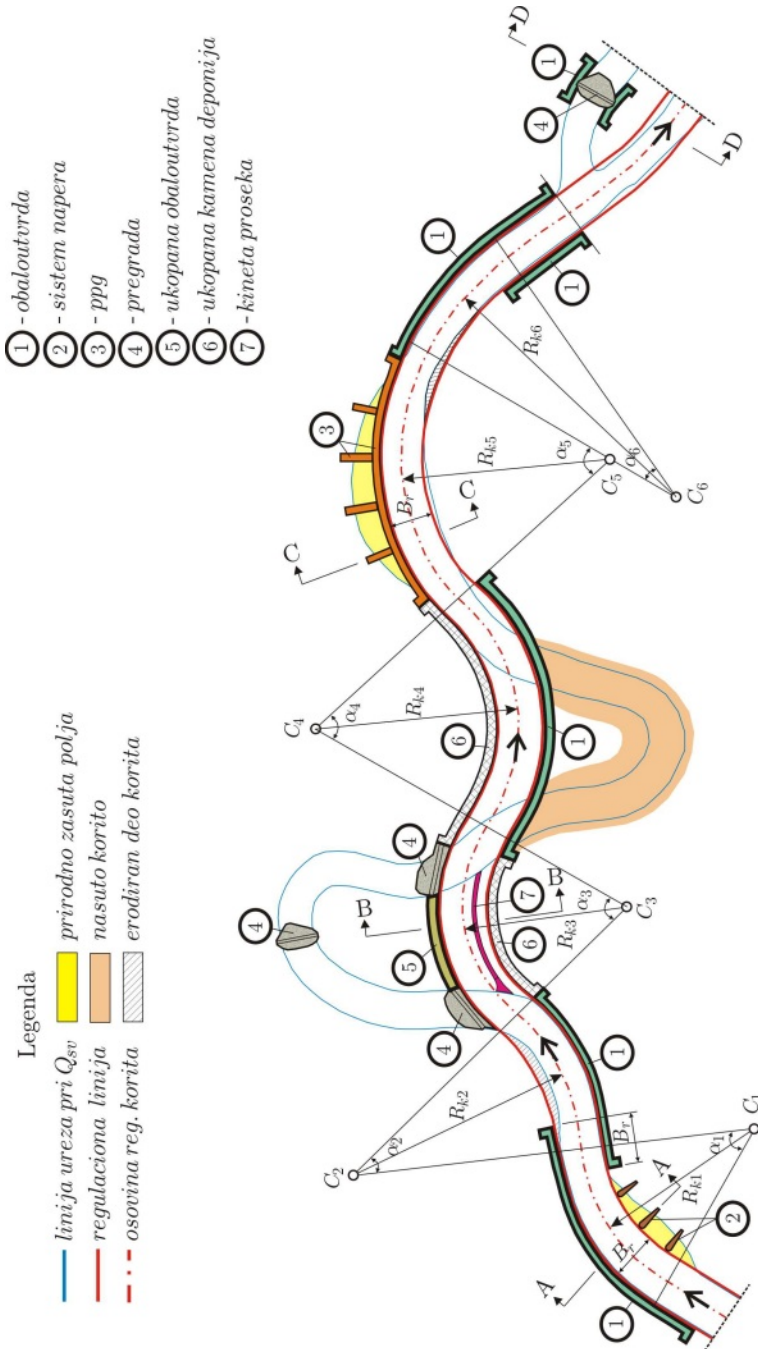
Položaj i oblik regulisanog korita obezbeđen je regulacionim građevinama. Visoke konkavne obale u krivinama 1 i 2 fiksirane su obaloutvrdama, sa preklapanjem na dužini od približno B_r . Dužina obaloutvrde iznosi $1,5 B_r$ uzvodno od početka krivine 1. Kako regulaciona linija duž desne obale u krivini 1 značajno zalazi u korito, neophodno je njegovo suženje, koje je ostvareno sistemom napera (Slike 2.37 i 2.38). Vremenom međunaperska polja bivaju zasuta nanosom.

Regulaciona linija na levoj obali u krivini 2 zalazi u teren; nije predviđena bilo kakva intervencija, već je ostavljeno da tu reka sama proširi korito koliko joj je potrebno. Krivine 3 i 4 su prosečene i regulisano korito je van postojećeg. U slučaju krivine 3, prikazana je varijanta prosecanja sa kinetom – kanalom koji se kopa sa nizvodnog kraja, uzvodno. Uvodni kraj, nazvan „čep”, ostavlja se neiskopan, sve do trenutka kada protok u reci dovoljno naraste, kada se čep probija, voda upušta u kinetu i započne proces dubinske i bočne erozije kinete. Brzina procesa širenja kinete („samorazrade”) zavisi od protoka i pokretljivosti materijala u kome je kineta prokopana (videti četvrto poglavlje). Da bi se erozioni proces zaustavio unutar željenih granica, duž konkavne (spoljašnje) granice proseka unapred se gradi ukopana obaloutvrda, a duž konveksne (unutrašnje) granice, ukopana kamena deponija (Slike 2.37 i 2.38). U cilju brže razrade novog korita (proseka), a zasipanja postojećeg korita („starače”), postavljaju se pregrade, na uzvodnom kraju, u sredini, i/ili na nizvodnom kraju postojećeg korita.

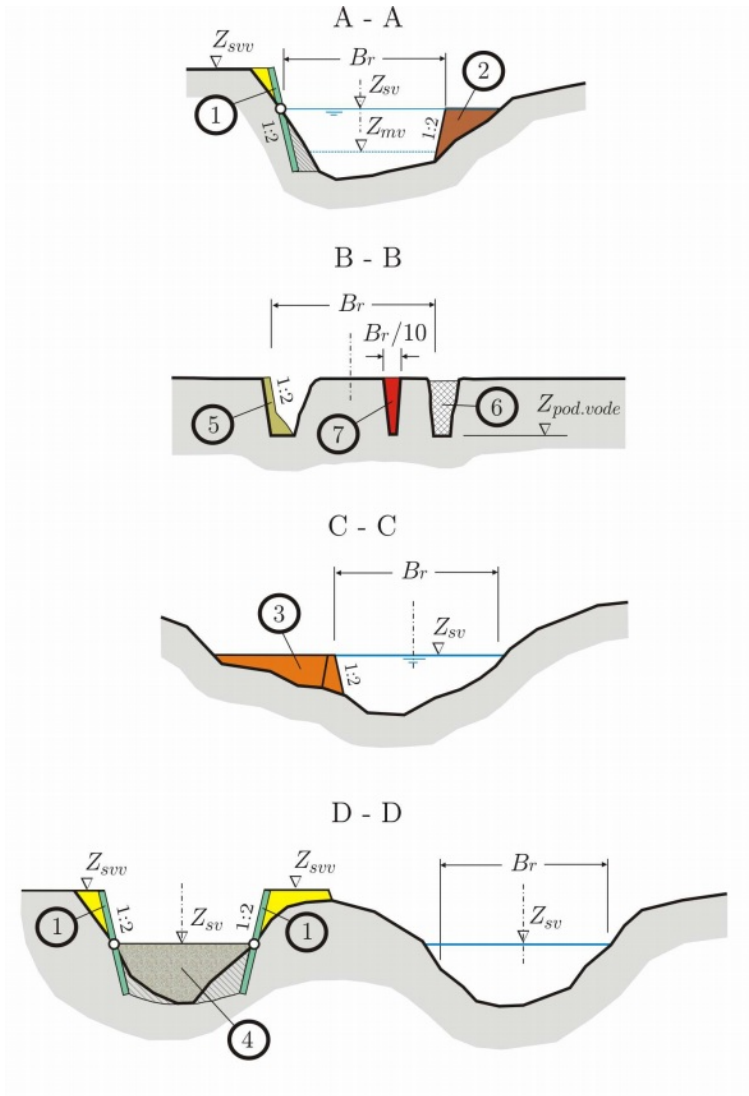
U slučaju krivine 4, prikazano je alternativno prosecanje – iskopom u punom profilu. Ovo rešenje se primenjuje u slučaju teško pokretnog tla (kamen, glina), ili kada je potrebno da se novo korito u celosti formira u što kraćem vremenu. Granice proseka su fiksirane obaloutvrdom i kamenom deponijom, a iskopani materijal se koristi za nasipanje postojećeg korita (Slika 2.37).

U krivini br. 5, suženje korita duž leve, konkavne obale, postignuto je pomoću prave paralelne građevine (PPG). Kao kod napera, polja između traverzi se vremenom zasipaju nanosom, formirajući novu obalu (Slika 2.38). Na suprotnoj, desnoj obali, odstupanje regulacione linije od linije ureza je relativno malo, pa nisu predviđeni regulacioni radovi.

Pravolinijska deonica nizvodno od krivine 5 je nestabilna, pa je učvršćena obaloutvrdama duž obe obale. Na kraju, kao što je već rečeno, pregrađivanjem rukavca obezbeđeno je koncentrisanje toka u glavnom koritu (Slike 2.37 i 2.38).



Slika 2.37: Regulacija hipotetičke deonice: situacija sa položajem građevina



Legenda

- | | |
|-------------------|-----------------------------|
| ① - obaloutvrda | ⑤ - ukopana obaloutvrda |
| ② - sistem napera | ⑥ - ukopana kamena deponija |
| ③ - ppg | ⑦ - kineta preseka |
| ④ - pregrada | |

Slika 2.38: Regulacija hipotetičke deonice: poprečni profili

2.3.5.2 Kontrolni morfološki parametri trasiranja

Regulisanje rečnih krivina nije jednostavno i zahteva prethodno proučavanje prirodne trase vodotoka. Iako postoji više tumačenja uzroka meandriranja reka (KI-1.4), može se smatrati da je ono odraz procesa uspostavljanja ravnomernog pronosa nanosa duž vodotoka.

Pri projektovanju trase regulisanog korita treba obratiti pažnju na vrednost *indeksa meandriranja* (sinusoidnosti, KI-1.3.1) S_i , kao i na raspored ovog morfološkog parametra:

$$S_i = \frac{\sum l_i}{L_i} \quad (2.23)$$

gde, je: l_i – dužina i -te rečne deonice po talvegu, L_i – „ispružena” dužina iste deonice po dolini, $i = 1, 2, \dots, N$ – broj deonice. Vrednosti S_i na jednoj reci variraju oko neke karakteristične vrednosti, koju treba imati u vidu pri trasiranju regulisanog korita. Ako postoje aerosnimci iz više perioda, kao merodavna uzima se prosečna vrednost ovog indeksa.

Kontrolni morfološki parametar za regulaciju vodotoka po postojećoj trasi je *indeks poprečnog preseka*:

$$c = \frac{H}{B} = \frac{A/B}{B} = \frac{A}{B^2} \quad (2.24)$$

gde je: H – srednja dubina pri protoku merodavnom za regulisanje vodotoka (srednja voda ili dominantni protok, KI-1.2) B – širina vodnog ogledala pri istom protoku, a A – odgovarajuća površina poprečnog preseka.

Smatra se da je meandrujuća trasa regulisanog vodotoka stabilna i da je njegova propusna moć očuvana ako vrednosti navedenih parametara ne odstupanju mnogo od onih pre regulacije. Podsetimo se da se do projektnih elemenata trase može doći i pomoću statističke analize zakrivljenosti rečnog korita u njegovom prirodnom (neregulisanom) stanju (KI-14.3).

2.3.5.3 Rečne krivine u analitičkom obliku

Za izvođenje regulacionih radova, neophodno je da se analitički definišu svi elementi krivina. Za to se koriste relativno jednostavni geometrijski oblici.

(1) *Kružni luk*. Ovo je najjednostavniji oblik za opisivanje rečne krivine. Iako su poluprečnik i zakrivljenost konstante, na prelaznicama kružnih krivina postoje izvesni hidraulički poremećaji. I pored ovog nedostatka, kružni luk je najčešće primenjivan geometrijski oblik u regulaciji reka, zbog jednostavnosti obeležavanja na terenu. Pored toga, za opisivanje krivine datog poluprečnika, kružni luk zahteva najmanje prostora i troškova za eksproprijaciju zemljišta.

Projektni poluprečnik krivine R_{ko} zavisi od veličine vodotoka. Grubo se može proceniti na osnovu širine vodnog ogledala pri projektnom protoku B ; kod veli-

kih i srednje velikih vodotoka: $R_{ko} = (7 \div 8)B$, a kod malih vodotoka: $R_{ko} = (10 \div 12)B$. Jednačina kružne krivine ima samo dva parametra – dužinu sečice l i dužinu tangente T (Slika 2.39-a):

$$l = 2 R_{ko} \sin \frac{\pi - \beta}{2}; \quad T = \frac{R_{ko}}{\operatorname{tg} \beta / 2}, \quad (2.25)$$

gde je: R_{ko} – poluprečnik do spoljašnje, konkavne obale, a β – centralni ugao. (Osovina korita, koja se menja sa protokom, nije merodavna za opisivanje krivina).

Za obeležavanje kružnog luka u lokalnom koordinatnom sistemu (x, y) koristi se jednačina kruga:

$$y = \sqrt{R_{ko}^2 - \left(R_{ko} \cos \frac{\beta}{2} - x \right)^2} - R_{ko} \sin \frac{\beta}{2}. \quad (2.26)$$

Preporuka je da se prost kružni luk koristi samo kod srednjih i malih vodotoka, pri čemu se podrazumeva da je konkavna obala zaštićena od erozije obaloutvrdom.

■ **Primer 2.6.** Širina vodnog ogledala pri projektnom protoku regulisanog korita jednog malog vodotoka iznosi $B = 30$ m, a vrednost centralnog ugla tipične krivine je: $\beta = 80^\circ = 1,4$ rad. Odrediti koordinate kružnog luka koji opisuje ovu krivinu.

Rešenje. Na osnovu preporuke $R_{ko} = 300 \div 360$ m, usvaja se: $R_{ko} = 350$ m. Izraz (2.25) daje dužine sečice $l = 536,23$ m i tangente $T = 417,11$ m. Koordinate kružnog luka (Slika 2.39), sračunate pomoću izraza (2.26), date su u Tabeli 2.12.

Tabela 2.12: Koordinate prostog kružnog luka

x (m)	0	100	200	300	400	500	536
y (m)	0	82,01	118,33	123,57	99,23	37,19	0,28

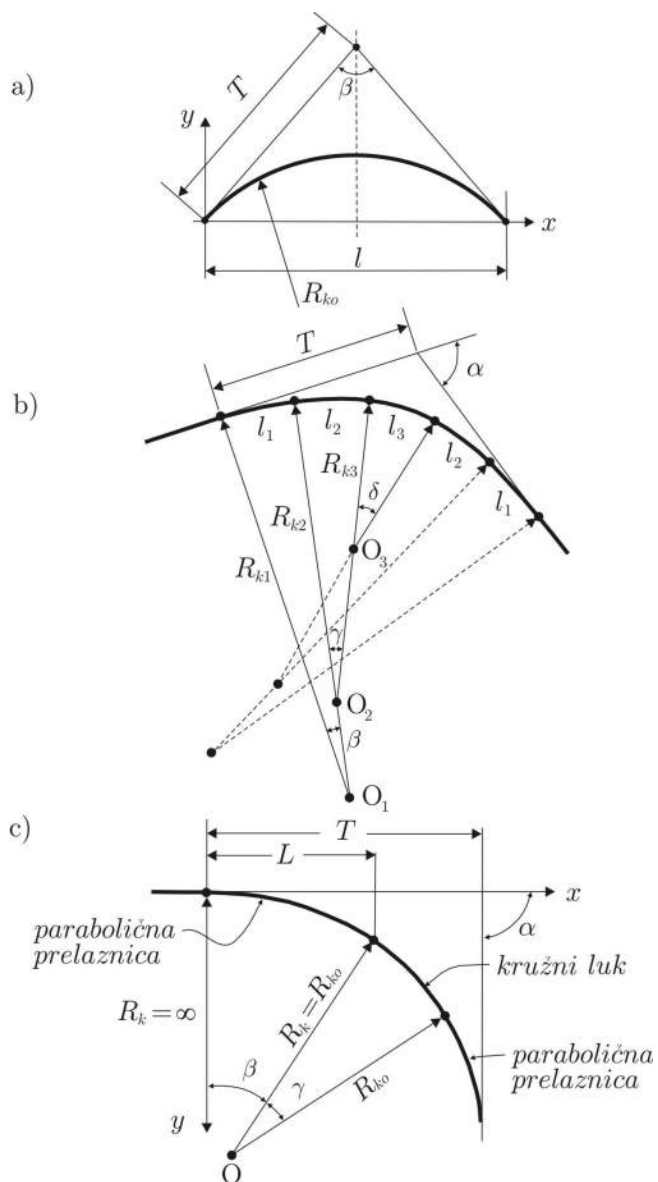
Napomena: Umesto centralnog ugla (β) može se zadati dužina tangente (T) kao ulazni podatak, a rezultat proračuna su veličine β , l i koordinate (x, y) .

(2) Složeni kružni luk. U praksi se vrlo često dešava da bi trasiranje krivine regulisanog korita u obliku prostog kružnog luka dovelo do neprihvatljivog udaljavanja od postojeće krivine, pa se mora tražiti neki podesniji geometrijski oblik. Složeni kružni luk koji se sastoji od tri prosta kružna luka različitih poluprečnika (Slika 2.39-b) predstavlja dobro rešenje u većini slučajeva. Polazi se od iskustvene preporuke za dužinu poluprečnika u zavisnosti od širine vodnog ogledala:

$$R_{k1} \approx (10 \div 12)B; \quad R_{k2} \approx (8 \div 10)B; \quad R_{k3} \approx (5 \div 8)B, \quad (2.27)$$

Iz uslova: $l_1 = l_2 = l_3$ mogu se izvesti izrazi za uglove prikazane na Slici 2.39-b:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\alpha}{2 + 2(R_{k1}/R_{k2}) + (R_{k1}/R_{k3})}; \\ \gamma &= (R_{k1}/R_{k2})\beta; \quad \delta = (R_{k1}/R_{k3})\beta; \quad \alpha = 2(\beta + \gamma) + \delta. \end{aligned} \quad (2.28)$$



Slika 2.39: Analitički oblici rečnih krivina: a) kružni luk; b) složeni kružni luk; c) kružni luk sa paraboličnim prelaznicama

Dužina tangente računa se pomoću izraza [143]:

$$\begin{aligned}
 T = R_{k1} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \left(1 + \cos \beta + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sin \beta \right) + \\
 R_{k2} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \left\{ \cos \beta + \cos(\beta + \gamma) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} [\sin \beta + \cos(\beta + \gamma) \sin(\beta + \gamma)] \right\} + \\
 R_{k3} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \left[\cos(\beta + \gamma) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cos(\beta + \gamma) \sin \frac{\gamma}{2} \right]. \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

Promena zakrivljenosti u krivinama opisanim u obliku složenog kružnog luka treba da bude neprekidna, sa najmanjim poluprečnikom u temenu krivine.

■ **Primer 2.7.** Trasirati regulisano korito u obliku složene kružne krivine ako su dati sledeći podaci: širina vodnog ogledala pri projektnom protoku $B = 30$ m, dužina tangente $T = 100$ m, spoljašnji ugao između tangenti $\alpha = 45^\circ = 0,785$ rad.

Rešenje. Na osnovu preporuka (2.27) usvojene su vrednosti: $R_{k1} = 350$ m, $R_{k2} = 250$ m i $R_{k3} = 180$ m. Sledi: $R_{k1}/R_{k2} = 1,40$ i $R_{k1}/R_{k3} = 1,94$. Vrednosti uglova su: $\beta = 6,67^\circ = 0,116$ rad; $\gamma = 9,34^\circ = 0,163$ rad; $\delta = 12,97^\circ = 0,226$ rad.

Provera: (1) na osnovu izraza (2.28) $\alpha = 2(6,67^\circ + 9,34^\circ) + 12,97^\circ = 45^\circ$, što odgovara zadatoj vrednosti; (2) na osnovu izraza (2.29), dužina tangente $T = 105,38$ m je nešto veća od zadate vrednosti (bolje slaganje se može postići malom korekcijom prečnika R_{k3}).

Napomena: kombinacija 3 kružna luka uz uslov $l_1 = l_2 = l_3$ može se primeniti na manje–više simetrične krivine (Slika 2.39-b); za krivine složenih i nesimetričnih oblika, metodologija zasnovana na obrascima (2.28)–(2.29), nije pogodna.

(3) *Kružni luk sa parabolničnim prelaznicama.* Kao u projektovanju puteva, prelazne deonice služe za ublaženje poremećaja zakrivljenosti na početku i kraju krivine opisane kružnim lukom (Slika 2.39-c). Dužina parabolnične prelaznice u pravcu x je obično $L = 0,2 R_{ko}$. Sa zadatim vrednostima poluprečnika R_{ko} i spoljašnjeg ugla tangenti α , mogu se sračunati uglovi:

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{L}{2 R_{ko}} \right); \quad \gamma = \alpha - 2\beta. \quad (2.30)$$

Zapaziti da kada $\alpha \rightarrow 2\beta$, $\gamma \rightarrow 0$, što znači da za vrlo male centralne uglove kružni luk više nema svrhe.

Dužina tangente data je izrazom [143]:

$$\boxed{T = L + \frac{L^2 \operatorname{tg} \beta}{6 R_{ko}} + \left[R_{ko} + \frac{L^2}{6 R_{ko} \cos \beta} \right] \left[\frac{\sin \gamma/2}{\cos(\beta + \gamma/2)} \right]}. \quad (2.31)$$

Parabolična prelaznica je definisana izrazom:

$$y = \frac{x^3}{6 L R_{ko}}. \quad (2.32)$$

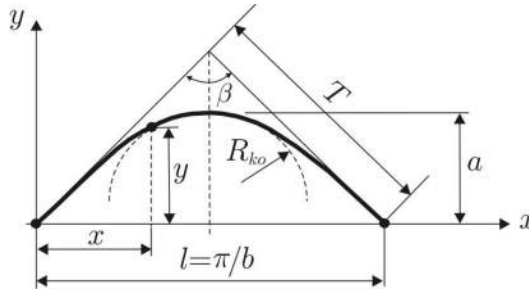
■ **Primer 2.8.** Projektovati krivinu regulisanog korita sa paraboličnim prelaznicama; podaci: širina vodnog ogledala pri merodavnom protoku $B = 30$ m i spoljašnji ugao tangenti $\alpha = 70^\circ = 1,222$ rad.

Rešenje. Usvaja se $R_{ko} = 8 B = 240$ m. Sledi: $L = 0,2 R_{ko} = 48$ m, a na osnovu izraza (2.30)–(2.31): $\beta = 0,1$ rad = $5,71^\circ$; $\gamma = 58,58^\circ = 1,022$ rad; $T = 192,5$ m. Koordinate prelaznice date su u Tabeli 2.13.

Tabela 2.13: Koordinate parabolične prelaznice

x (m)	10	20	30	40	50	60	70	80
y (m)	0,014	0,116	0,391	0,926	1,808	3,125	4,962	7,407

(4) *Sinusoida.* U trasiranju rečnih krivina regulisanog korita ponekad se primenjuje sinusna kriva (Slika 2.40), naročito kada je vrednost centralnog ugla $\beta \geq 100^\circ$.



Slika 2.40: Sinusna kriva

Opšti oblik sinusne krive sa parametrima a i b dat je izrazima:

$$y = a \sin bx; \quad a = \frac{l}{\pi} \operatorname{ctg} \beta/2; \quad b = \frac{\pi}{l}. \quad (2.33)$$

Ako su zadate vrednosti ugla β i dužine tangente T , vrednosti parametara a i b računaju se pomoću izraza:

$$a = \frac{2T \cos \beta/2}{\pi}; \quad b = \frac{\pi}{2T \sin \beta/2}. \quad (2.34)$$

Ako je data vrednost radijusa R_{ko} kružnog luka koji tangira sinusnu krivu u temenu (Slika 2.40), kao i vrednost centralnog ugla β , mogu se koristiti sledeći izrazi:

$$a = R_{ko} (\operatorname{ctg} \beta/2)^2; \quad b = \frac{1}{R_{ko} \operatorname{ctg} \beta/2}. \quad (2.35)$$

Kombinujući (2.35) i (2.33) dobija se:

$$l = \pi R_{ko} \operatorname{ctg} \beta / 2. \quad (2.36)$$

■ **Primer 2.9.** Sračunati koordinate sinusne krive, kao i dužinu tangente, ako su poznate vrednosti centralnog ugla $\beta = 140^\circ = 2,443 \text{ rad}$ i dužine između infleksionih tačaka $l = 600 \text{ m}$.

Rešenje. $a = 69,51 \text{ m}$, $b = 0,00524 \text{ m}^{-1}$, $T = 319,25 \text{ m}$. Koordinate sinusne krive date su u Tabeli 2.14.

Tabela 2.14: Sinusni luk

x (m)	0	50	100	150	200	250	300
y (m)	0,00	17,99	34,76	49,15	60,20	67,14	69,51

x (m)	350	400	450	500	550	600
y (m)	67,14	60,20	49,15	34,76	17,99	0,00

■ **Primer 2.10.** Na Slici 2.41 prikazana je deonica reke Velike Morave sa tri krivine. Odrediti oblike geometrijskih krivih koje najbolje opisuju ove krivine.



Slika 2.41: Deonica reke Velike Morave uzvodno od Čuprije

Rešenje. Krivina na nizvodnom kraju deonice je složenog, asimetričnog oblika. Jedna varijanta rešenja je da se linija konkavne obale na delu sa najvećom zakrivljenošću aproksimira prostim kružnim lukom. Procenom položaja graničnih tačaka kružnog luka i povlačenjem iz tih tačaka tangentskih linija na konturu obale, kao i normala na tangente, dobijaju se elementi za konstrukciju kružnice – položaj centra i poluprečnik: $R_{ko}=370 \text{ m}$. Rešenje je prikazano na Slici 2.42.

Za očitanu dužinu tangente $T=570 \text{ m}$ određena je vrednost centralnog ugla: $\beta \approx 66^\circ = 1,152 \text{ rad}$. Sračunata dužina sečice iznosi: $l = 620,7 \text{ m}$, a koordinate kružnog luka date su u Tabeli 2.15.

Druga varijanta rešenja za istu krivinu je aproksimiranje linije konkavne obale sa tri kružna luka. Kako se zakljivljenost krivine smanjuje nizvodno, položaj

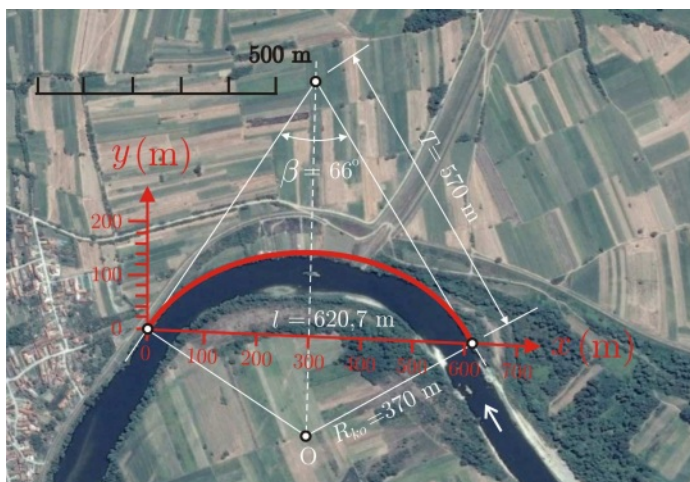
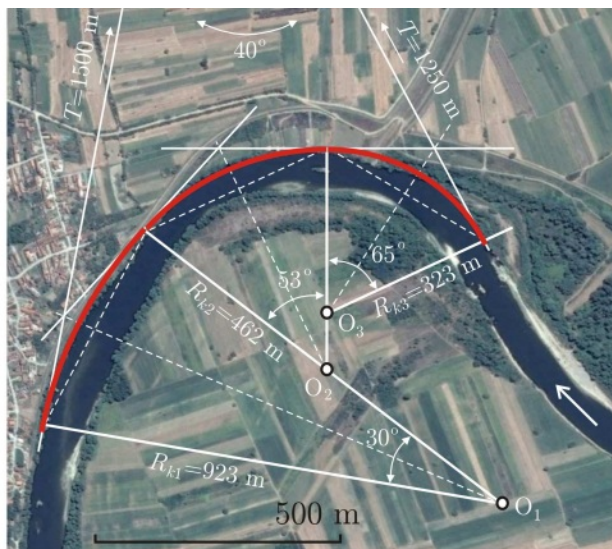
Slika 2.42: Primer 2.10: *Prost kružni luk*Slika 2.43: Primer 2.10: *Složeni kružni luk*

Tabela 2.15: Primer 2.10: *Koordinate prostog kružnog luka*

x (m)	0	50	100	150	200	250	300
y (m)	0,00	61,45	102,94	131,99	151,71	163,59	168,40

x (m)	350	400	450	500	550	620,7
y (m)	166,41	157,52	141,18	116,24	80,44	0,00

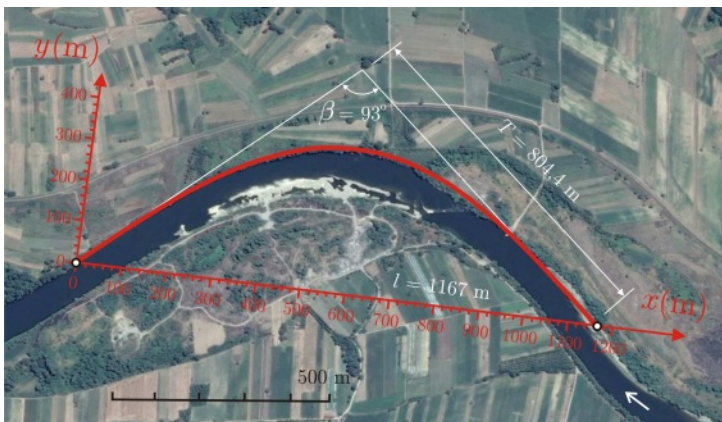
graničnih tačaka kružnih lukova se mora odrediti *probanjem*. Iz tih tačaka se zatim povlače tangentne linije i sečice, pomoću kojih se definišu centri kružnica i njihovi poluprečnici. Kružni lukovi se nadovezuju jedan na drugi bez pravolinijskih deonica – kroz infleksione tačke, tako da se centri dve kružnice nalaze duž iste prave, kao što je prikazano na Slici 2.43. (Zapaziti da se u ovom primeru ne može primeniti postupak iz primera 2.7.)

Krivina na uzvodnom kraju deonice je razvučena i relativno simetrična, tako da se kod nje može primeniti luk u obliku sinusoide. Za očitane vrednosti centralnog ugla: $\beta = 93^\circ = 1,623$ rad i dužine sečice: $l = 1167$ m, sračunata je dužina tangente $T = 804,4$ m, vrednosti parametara sinusoida $a = 352,16$ m, $b = 0,00269$ m⁻¹, kao i koordinate (Tabela 2.16). Ovo rešenje prikazano je na Slici 2.44.

Tabela 2.16: Primer 2.10: *Koordinate luka u obliku sinusoida*

x (m)	0	100	200	300	400	500	600
y (m)	0,00	93,75	180,76	254,74	310,37	343,64	352,16

x (m)	700	800	900	1000	1100	1167
y (m)	335,32	294,31	232,11	153,19	63,24	0,00

Slika 2.44: Primer 2.10: *Luk u obliku sinusoida*

Za obeležavanje na terenu projektovanih lukova potrebno je da se koordinate iz lokalnog sistema (x, y) , standardnom transformacijom prevedu u državni koordinatni sistem (videti Dodatak D10). Da bi obeležavanje na terenu bilo što lakše, krivine treba da budu što jednostavnije analitički definisane. Treba spomenuti i

to da su troškovi eksproprijacije zemljišta često ograničavajući faktor u trasiranju, pa se dešava da iz finansijskih razloga, projektovani poluprečnici krivina i dužine lukova moraju biti kraći od optimalnih. Međutim, ušteda na eksproprijaciji može biti samo prividna, jer osiguranje stabilnosti obala da bi iznuđeno rešenje bilo održivo, može zahtevati veća ulaganja. O trasiranju korita za veliku vodu, kasnije.

2.4 Provera stabilnosti korita

Procenu stabilnosti rečnog korita potrebno je obaviti *pre i posle* regulacionih radova. Za to se u ranoj fazi projektovanja mogu primeniti veoma jednostavni računski postupci za određivanje pokretljivosti nanosa na dnu korita, kao i za procenu njegove potencijalne opšte deformacije.

2.4.1 Procena pokretljivosti nanosa na dnu korita

Treba imati u vidu da kada je reč o pokretljivosti nanosa, postoje dve karakteristične, granične vrednosti protoka; jedna, pri kojoj počinje masovno kretanje materijala na dnu korita i druga, pri kojoj počinje erozija obala. Nažalost, ove vrednosti se mogu utvrditi samo u dužem periodu osmatranja, za šta obično nema mogućnosti pri izradi projekta. Zato je u praksi uobičajeno da se granični uslovi stabilnosti zrna na dnu korita i na obalama definišu pomoću istog, Šildsovog dijagrama (KI-9.2.2), iako strogo uzevši, ovaj važi samo za nevezani – lako pokretni materijal na blago nagnutoj podlozi. Alternativno se mogu koristiti izrazi za pokretanje nanosa izvedeni na osnovu Šildsove empirijske zavisnosti.

Podsetimo se da je kriterijum za pokretanja nanosa na dnu rečnog korita: $\tau_o > \tau_{oc}$. Provera ovog uslova je zasnovana na proračunu kritičnog tangencijalnog napona za pokretanje zrna prečnika d , pomoću izraza MPM (KI-10.3.2-(10.21)):

$$\tau_{oc} = 0,047 g (\rho_s - \rho) d \quad (2.37)$$

i na proračunu tangencijalnog napona na dnu (KI-3.1-(3.7),(3.8)):

$$\tau_o = \rho g R I_e = \frac{1}{2} \rho C_\tau V^2 = \frac{\rho g n^2}{R^{1/3}} V^2. \quad (2.38)$$

Izrazi (2.37) i (2.38) se mogu koristiti za ocenu stabilnosti korita. Svakoju sračunatoj vrednosti τ_o u poprečnom profilu, na osnovu (2.37) odgovara određena „kritična krupnoća” zrna $d = d_c$ u pogledu pokretanja:

$$\boxed{d_c = \frac{\tau_o}{0,047 g (\rho_s - \rho)}}. \quad (2.39)$$

Ova vrednost predstavlja *gornju granicu* krupnoće *svih pokrenutih zrna* pod uticajem datog tangencijalnog napona. Izraz (2.39) se može koristiti za niz protoka koji opisuju određeni poplavni talas, sa ciljem da se utvrdi koje će frakcije nanosa biti u pokretu tokom prolaska poplavnog talasa i koliko će trajati kretanje tih frakcija.

■ **Primer 2.11.** Analizirati pokretanje nanosa pri prolasku jednog poplavnog talasa (Tabela 2.17) u regulisanom koritu trapeznog poprečnog preseka širine u dnu 24 m, nagiba kosina 1:4, uzdužnog nagiba dna 0,0003 i rapavosti po Maningu 0,025 m^{-1/3}s. Granulometrijski sastav nanosa dat je u Tabeli 2.18. Radi lakšeg proračuna pretpostaviti da je tečenje *kvazi-ustaljeno*.

Tabela 2.17: *Poplavni talas u Primeru 2.11*

t [dani]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Q [m ³ /s]	15	14	21	20	18	21	45	50	116	103	56	42	35	20	17	15

Tabela 2.18: *Granulometrijski sastav u Primeru 2.11*

d [mm]	0,3	1,4	2,6	3,1	3,3	4,0	5,0	8,0
		d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{65}	d_{80}	d_{90}	
p [%]	1	10	30	50	65	80	90	100

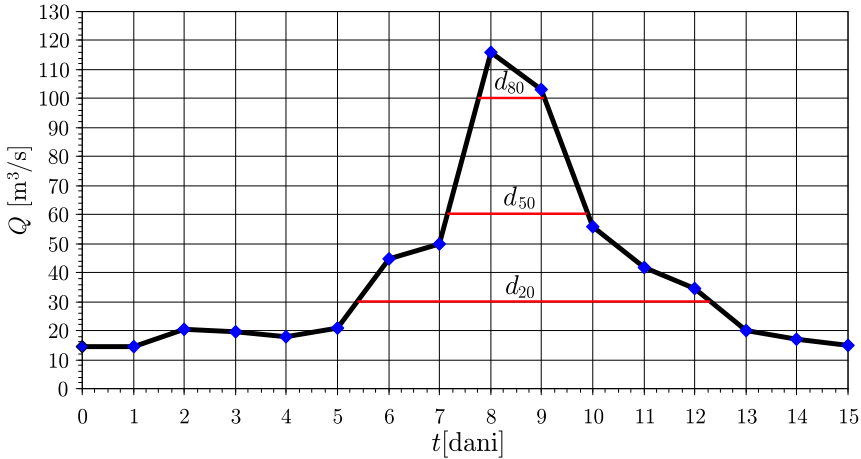
Rešenje. Na Slici 2.45 prikazan je hidrogram poplavnog talasa, a u Tabeli 2.19 dati su rezultati proračuna.

Tabela 2.19: *Primer 2.11: Proračun pokretanja nanosa.*

Q [m ³ /s]	h [m]	R [m]	V [m/s]	Fr	τ_o [Pa]	τ'_o [Pa]	d_c [mm]	Zrno	Trajanje kretanja	
									Aps. [dani]	Rel. [%]
10	0,72	0,65	0,52	0,042	1,90	0,96	1,3	$\approx d_{10}$	15,0	100
20	1,07	0,93	0,66	0,047	2,72	1,38	1,8		9,0	60
30	1,35	1,13	0,75	0,051	3,33	1,69	2,2	d_{20}	6,7	45
40	1,59	1,30	0,83	0,053	3,83	1,95	2,6	d_{30}	5,0	33
50	1,81	1,45	0,89	0,055	4,27	2,16	2,8		3,3	22
60	2,00	1,58	0,94	0,056	4,65	2,36	3,1	d_{50}	2,7	18
70	2,17	1,70	0,98	0,058	4,99	2,53	3,3	d_{65}	2,3	15
80	2,34	1,80	1,03	0,059	5,30	2,69	3,5		2,0	13
90	2,49	1,90	1,06	0,060	5,59	2,84	3,7		1,6	11
100	2,64	1,99	1,10	0,061	5,86	2,97	3,9	$\approx d_{80}$	1,3	9
115	2,84	2,12	1,14	0,062	6,24	3,17	4,2		0,003	0

U proračunu korigovanog tangencijalnog napona τ'_o po metodi MPM (KI-10.3.2-(10.23)), korišćene su vrednosti: $n_r = 0,016 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, $(n_r/n)^{3/2} = 0,507$ i $(Q_s/Q) = 1$. Pri datom protoku, može se smatrati da su u pokretu sva zrna čiji je prečnik manji od kritičnog (d_c), koji je sračunat pomoću izraza (2.39). Trajanje kretanja pojedinih frakcija, iskazano apsolutno (u danima) i relativno (procentualno, u odnosu na trajanje poplavnog talasa) dato je u Tabeli 2.19 i prikazano na Slici 2.45.

Opisana metoda proračuna može se primeniti i za dugoročnu prognozu kretanja vučenog nanosa. U tom slučaju se, umesto hidrograma izabranog poplavnog talasa, koristi „godišnji” hidrogram – vremenska raspodela srednjih dnevnih ili mesečnih protoka u toku merodavne godine. Pri tome treba biti svestan da je ovakva analiza veoma uprošćena. Pored toga, treba imati u vidu da je opisani postupak prikladniji za krupniji materijal (šljunkovite frakcije) nego za sitni peščani nanos, zbog mogućnosti da se čak i pri relativno niskom protoku, sve frakcije nađu u pokretu.



Slika 2.45: Primer 2.11: Poplavni talas i trajanje pokretanja pojedinih frakcija.

2.4.2 Prognoza opšte deformacija korita

Kvalitativna prognoza opšte deformacije kaže da produbljeno i usko rečno korito, sa granulometrijskim sastavom koji je „pomeren” ka krupnim frakcijama, ukazuje na erozioni proces. Relativno široko, a plitko korito, sa blagim uzdužnim nagibom dna i sitnozrnim nanosom, ukazuje na potencijalno zasipanje korita.

Kratkoročna opšta deformacija nastaje pri prolasku poplavnih talasa. Prognoze, koje se rade za talase velikih voda povratnih perioda od 10 do 100 godina, mogu se u ranoj fazi projektovanja obaviti primenom uprošćenog računskog modela, zasnovanog na jednačini kontinuiteta za nanos:

$$\boxed{\frac{d\forall}{dt} = Q_{v,ul} - Q_{v,iz}}, \quad (2.40)$$

gde je: \forall – zapremina nanosa, $Q_{v,ul}$ – ulazni tovar, pronos nanosa koji na razmatranu deonicu pristiže sa uzvodne deonice, $Q_{v,iz}$ – pronos nanosa koji sa razmatrane deonice odlazi nizvodno i koji je jednak transportnom kapacitetu za vučeni nanos (KI-10.2), t – vreme.

Prirodu deformacije određuje znak izvoda u izrazu (2.40): $d\forall/dt > 0$ – zasipanje korita (ulazni tovar veći od transportnog kapaciteta), $d\forall/dt < 0$ – erozija korita (ulazni tovar manji od transportnog kapaciteta) i $d\forall/dt = 0$ – nema promene, ravnotežno stanje korita (ulaz = izlaz).

Računska procedura:

1. Pretpostavka kvazi-ustaljenog tečenja dozvoljava da se hidrogram razmatranog poplavnog talasa diskretizuje nizom protoka koji se smatraju konstantnim u izabranom vremenskom intervalu Δt (obično 5÷10 intervala).

2. Rečna deonica se deli na određen broj pod-deonica, koje karakterišu *osrednjene* vrednosti: geometrije korita (širine, nagiba dna), hidrauličkih parametara (dubine, brzine toka) i nanosa (granulometrije). Na broj pod-deonica utiču i lokalni uslovi (npr. položaj mostova).
3. Za svaki od protoka sa diskretizovanog hidrograma i za svaku pod-deonicu, računaju se hidrauličke veličine (dubine, brzine toka itd.). To se grubo može obaviti proračunom normalne dubine, ili tačnije, proračunom linije nivoa (nejednolikog tečenja) pomoću računara.
4. Za svaki od protoka, primenom nekog obrasca za vučeni nanos (KI-10.3), računa se transportni kapacitet za svaku pod-deonicu ponaosob.
5. Primenom jednačine kontinuiteta (2.40), za svaku pod-deonicu određuje se neto pronos vučenog nanosa: $\Delta Q_s = Q_{v,ul} - Q_{v,iz}$, a odavde i promena zapremine nanosa u računskom vremenskom intervalu: $\Delta \forall = \Delta Q_v \Delta t$. Znak priraštaja $\Delta \forall$ određuje prirodu deformacije (– erozija, + zasipanje).
6. Sumiranjem svih promena $\Delta \forall$ po vremenskim intervalima dobija se ukupna *neto* promena zapremine na svakoj pod-deonici, *na kraju* prolaska poplavnog talasa.
7. Da bi se računala promena dna rečnog korita, mora se uzeti u obzir zapreminska masa (KI-8.2.2.3), pa sledi korekcija: $\Delta \forall / (1 - \lambda_o)$, gde je λ_o – poroznost nanosa (za peskovito dno $\lambda_o \approx 0,4$).
8. Vertikalno pomeranje prosečne kote dna na pod-deonici dobija se deljenjem promene zapremine nanosa površinom te pod-deonice.

■ **Primer 2.12.** Razmatra se kratkoročna opšta deformacije rečne deonice dužine 10 km, pod uticajem poplavnog talasa povratnog perioda 100 godina. Primenjujući kriterijum homogenosti geometrijskih, hidrauličkih i psamoloških uslova, deonica je izdvojena na 10 pod-deonica dužine $L=1$ km. Širine korita B na ovim deonicama date su u Tabeli 2.20. Na osnovu hidrauličkog proračuna, za svaku pod-deonicu je definisan transportni kapacitet vučenog nanosa $Q_{v,iz}$ (Tabela 2.20). Poroznost nanosa iznosi: $\lambda_o=0,4$. Prognozirati opštu deformaciju korita.

Rešnje. U Tabeli 2.20 prikazani su rezultati proračuna *samo za vršni protok* trajanja $\Delta t=20$ min.

Za pouzdanije procene, potrebno je račun sprovedi za više poplavnih talasa. U tom slučaju, diskretizacija hidrograma se slobodnije obavlja, a račun olakšava, ako se za svaku pod-deonicu, za nekoliko izabranih protoka najpre ustanovi zavisnost tipa: $Q_{v,iz} = a Q^b$ (a, b – regresioni koeficijenti), a onda se ta zavisnost koristi za određivanje transportnog kapaciteta ($Q_{v,iz}$) za bilo koji protok (Q) koji se uvede prilikom diskretizacije datih hidrograma.

Ponavlja se da opisani postupak služi za grubu procenu opšte deformacije, dok se tačniji (i komplikovaniji) način proračuna u (ne)ustaljenom režimu tečenja zasniva na rešenju Eksnerove (Exner) diferencijalne jednačine (KI-12.1-(12.2), 12.2.1). Ovaj pristup zahteva primenu računara i koristi se u višim fazama projektovanja.

Tabela 2.20: Rezultati proračuna u primeru 2.12.

Deonica	$Q_{v,iz}$ (m^3/s)	ΔQ_v (m^3/s)	Priroda deformacije	$\Delta \nabla$ (m^3)	$\Delta \nabla / (1 - \lambda)$ (m^3)	L (m)	B (m)	ΔZ_d (m)
1	110							
2	89	+21	zasipanje	+25200	+42000	1000	60	+0,70
3	120	-31	erozija	-37200	-62000	1000	78	-0,79
4	155	-35	erozija	-42000	-70000	1000	72	-0,97
5	170	-15	erozija	-18000	-30000	1000	59	-0,51
6	152	+18	zasipanje	+21600	+36000	1000	54	+0,67
7	190	-38	erozija	-45600	-76000	1000	83	-0,92
8	143	+47	zasipanje	+56400	+94000	1000	97	+0,97
9	128	+15	zasipanje	+18000	+30000	1000	60	+0,50
10	140	-12	erozija	-14400	-24000	1000	66	-0,36

2.4.3 Prognoza lokalne deformacija korita

Poznato je da ovaj vid deformacije nastaje na mestima nagle promene geometrije korita (proširenja, suženja, krivine), ili na mestima gde su u rečnom koritu prisutne građevine (mostovski stubovi i oporci, pragovi, naperi i dr.). Empirijske metode proračuna lokalne erozije u zoni građevina biće opisane u narednim poglavljima. Ovde se prikazuje proračun lokalne erozije u krivinama.

Za analizu ovog vida lokalne deformacije, koriste se empirijski obrasci za predviđanje *dubinske* erozije. Izraz Mejnorda (Maynord) [176] daje maksimalnu *projektvu* dubinu toka u krivini (h_{max}) na osnovu poluprečnika krivine (R_{ko}) i prosečne širine korita (B), za usvojenu vrednost faktora sigurnosti FS (min 1,1).

$$\frac{h_{max}}{H} = FS \left[1,8 - 0,051 \left(\frac{R_{ko}}{B} \right) + 0,0084 \left(\frac{B}{H} \right) \right]. \quad (2.41)$$

Obrazac (2.41), čija je oblast primene: $1,5 < R_{ko}/B < 10$ i $20 < B/H < 125$, preporučuje se za procenu erozije dna u podnožju obale koja je zaštićena obaloutvrdom. Dužina erozione zone nizvodno od temena krivine (L_e) je [176]:

$$\frac{L_e}{R} = 0,0604 \left(\frac{R^{1/6}}{n} \right) \quad (2.42)$$

gde je: $R = A/O$ – hidraulički radijus, a n – Manningov koeficijent.

■ **Primer 2.13.** Odrediti projektvu erozionu dubinu i dužinu u krivini ako su dati sledeći podaci: $B = 118$ m, $H = 1,89$ m, $R = 1,87$ m, $R_{ko} = 220$ m, $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

Rešenje. Primenom obrasca (2.41) sa vrednošću $FS = 1,1$ dobija se projektva eroziona dubina u krivini: $h_{max} = 4,6$ m. Obrazac (2.42) daje erozionu dužinu $L_e = 5$ m nizvodno od temena krivine.

2.5 Višefazni projektni pristup

Da bi se što lakše savladale teškoće projektovanja koje proizilaze iz složenosti interakcije strujanja vode i kretanja rečnog nanosa, proces projektovanja se može etapno strukturirati [215]:

- (i) početni nivo projektovanja, zasnovan na kvalitativnoj geomorfološkoj analizi;
- (ii) nivo standardnog projektovanja, zasnovan na kombinaciji geomorfoloških analiza i inženjerskih, pretežno empirijskih metoda proračuna i
- (iii) nivo naprednog projektovanja, na kome se koriste složeni softverski alati, a po potrebi, i laboratorijski fizički modeli.

Analize na početnom nivou daju uvid u fizičke procese razmatranog rečnog sistema i predstavljaju preduslov za kvalitativne analize u narednim fazama projektovanja. Višefazni (etapni) pristup je pogodan za dugoročne projekte, gde se, sa porastom fonda prikupljenih podataka, mogu sukcesivno primenjivati sve složenije metode proračuna.

2.5.1 Niži (početni) nivo projektovanja

Zasnovan u velikoj meri na inženjerskoj proceni i iskustvu, početni nivo projektovanja se bavi *kvalitativnom* geomorfologijom i fluvijanom morfodinamikom na makro planu (slivno područje) i mikro planu (rečne deonice). Prvi korak je prikupljanje i obrada podataka, upoznavanje sa postojećom tehničkom dokumentacijom, obilazak terena i kontakt sa lokalnim interesnim grupama.

Podaci koji su neophodni za elementarne kvalitativne analize obuhvataju: dominantni protok, geometriju rečnog korita (evoluciju trase, sadašnje morfološke oblike u planu, podužne i poprečne profile), karakteristike tla iz obala i nanosa iz dna korita, podatke o nameni površina i sadašnjim objektima, tragove poplava itd. Za ovo se koristi postojeća i planirana aerofotogrametrijska dokumentacija.

Analize rečnog korita. Upoznavanje nekog vodotoka započinje analizom njegove trase u planu. Oblik trase može biti pravolinijski, meandriračići, razuđeni, ili kombinacija ovih oblika (KI-1.3.1-SI:1.4). Za kvantifikaciju stepena meandriranja koristi se *faktor sinusoidnosti* S (odnos dužine toka po talvegu i po inundacijama); vrednost $S \approx 1,5$ označava granicu između meandrirajućeg i pravolinijskog korita. Drugi parametar tzv. „graničnih geomorfoloških stanja” je proizvod uzdužnog nagiba dna i protoka: $I_d Q^{1/4}$; vrednosti $\leq 0,0007$ karakterišu meandrirajuće vodotoke, a vrednosti $\geq 0,004$, razuđene vodotoke (KI-1.6.2).

Za procenu stabilnosti korita u početnoj fazi projektovanja treba razmotriti: tip vodotoka (meandrirajući, razuđen), vrednost faktora sinusoidnosti, propusnu moć korita, oblik poprečnog preseka, sastav obala, prisustvo starača u inundacijama itd. Na primer, ako je korito široko i razuđeno sa niskim obalama, sa vrednošću faktora $S < 1,5$, ono je nesumnjivo nestabilno i kao takvo, teže za regulaciju.

U projektu treba izbegavati pravolinijsku trasu, jer će unutar pravolinijskih obala talveg uvek krivudati stvarajući naizmenične sprudove, usmeravajući tok od jedne obale ka drugoj i tako sprečavajući uniforman raspored protoka i brzine po poprečnom preseku.

Veoma je važna interpretacija geografskih karata i aerofotogrametrijskih podloga. Karte daju kvantitativne informacije o topografiji, ali po pravilu nisu dovoljno ažurne. S druge strane, fotografije iz vazduha iz raznih perioda pružaju uvid u evoluciju rečnog korita i sa kartama čine komplementarnu bazu podataka. Savremena tehnologija daljinske detekcije (LiDAR) i internet servisi (Google Earth[®]) stoje na raspolaganju širokom krugu inženjera i znatno im olakšavaju posao.

Za kvalitativne procene stabilnosti korita mogu poslužiti i jednostavne korelacije protoka i neke od veličina koje opisuju rečno korito (širina, najveća dubina, uzdužni nagib dna). Ovakve zavisnosti postoje u tzv. „Teoriji režima” (KI-14.1). Umesto izraza iz literature, mnogo je bolje izvesti takve zavisnosti za konkretni vodotok, ukoliko za to postoje merni podaci.

Dugoročnu tendenciju ka uspostavljanju ravnotežnog stanja kvalitativno je opisana poznatim Lejnovim (Lane) izrazom (KI-14.1-(14.8)): $Q I_d \propto Q_s d_{50}$. Proporcionalnost između proizvoda protoka vode i uzdužnog nagiba dna i proizvoda pronosa nanosa i krupnoće zrna, može korisno poslužiti za kvalitativnu ocenu posledica promena, prirodnih ili veštački izazvanih.

Na primer, ako protok i krupnoća nanosa ostaju nepromenjeni, regulaciona mera smanjenja nagiba dna (npr. izgradnjom sistema kaskada) neminovno će dovesti do smanjenja pronosa nanosa, koje se u konkretnom slučaju može kvantifikovati ako je proporcionalnost određena na osnovu terenskih merenja.

Geotehničke analize. Za preliminarnu procenu stabilnosti korita neophodno je poznavanje tla u kome je formirano korito. Prvi korak je vizuelno prikupljanje informacija na terenu, kao i analiza postojećih geotehničkih podataka. Na primer, visina i nagib obala može odmah nagovestiti prisustvo glinovog materijala i malu opasnost od erozije. Pukotine ukazuju na mogućnost obrušavanja obala; stratifikovane (slojevite) obale se obrušavaju u vidu otkinutih blokova, a moguće je klizanje obala od vezanog (koherentnog) i nevezanog materijala.

Pri obilasku terena treba obratiti pažnju i na geološke strukture koje formiraju hidrauličke „kontrolne preseke”. Tipični primeri su: suženje stenovitog korita (koje određuje propusnu moć velikih voda) i stenoviti prag u koritu od peskovitog i šljunkovitog materijala (koji narušava kontinuitet transporta nanosa i zaustavlja deformaciju korita). Takođe treba snimiti i mesta na kojima se iz reke prekomerno vadi pesak i šljunak, jer je posledica regresivna erozije rečnog korita.

Podrazumeva se da, pored obilaska terena, u ovoj fazi treba obaviti i određeni fond terenskih merenja.

Hidrološke analize. Izučavanje istorijskih podataka, kao i aerofotogrametrijske i satelitske dokumentacije, pomaže projektantu da proceni uticaj poplava na evoluciju rečnog korita. U aridnim područjima, efemerni vodotoci se uočavaju samo posle velikih padavina, pa odsustvo morfoloških promena je samo prividan indikator stabilnosti korita ovakvih vodotoka.

U analizi hidrološkog režima, treba razmotriti podatke o smeni vlažnih i sušnih perioda, jer intenzitet površinskog oticaja i plavljenja zavise od prethodne vlažnosti tla (najbolji dokaz su katastrofalne poplave u Srbiji 2014. godine!). Uvid u cikluse vlažnih i sušnih perioda stiže se obradom višegodišnjih serija padavina.

Kada je u pitanju zaštita od poplava, od velikog značaja je prikupljanje podataka o nameni površina, iz lokalnih izvora i pomoću baza podataka na internetu (videti šesto poglavlje). Procena trendova promene namene površina je veoma bitna, da bi se ostvarili projektom predviđeni dugoročni efekti (veoma skupih) regulacionih radova.

Na kraju, treba naglasiti da početni nivo projektovanja nije dovoljan za realizaciju bilo kakvih regulacionih radova, već samo predstavlja *pripremu* za prelazak na standardni, odnosno napredni nivo projektovanja.

2.5.2 Standardni nivo projektovanja

Na ovom nivou projektovanja se rade *kvantitativne* analize, primenjujući standardne inženjerske postupke i metode. Da bi to bilo moguće, neophodni su podaci koji se odnose na:

- karakteristike sliva (površina, nagib, hidrografska mreža, oticaj, namena površina, produkcija nanosa);
- geometriju korita (uzdužni i poprečni profili, zakrivljenost trase);
- hidrološki režim, naročito velikih voda (verovatnoće, prirodni/sintetički hidrogrami);
- hidraulički režim (proticaji, nivoi, brzine, tangencijalni naponi);
- psamološki režim (granulometija, pronos nanosa);
- hidrotehničke i druge objekte (retenzije, akumulacije, brane, mostovi, vodozahvati i dr.).

Podaci se prikupljaju iz raznih izvora, kao što su: Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ), Direkcija za vodne puteve (Plovput), javna preduzeća (Srbijavode, Vojvodina vode), Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, kao i druge specijalizovane institucije.

Ako je fond ulaznih podataka nedovoljan, potrebno je preduzeti *dopunska merenja* i/ili premeniti metode *generisanja podataka*, koje su zasnovane na direktnoj ekstrapolaciji podataka, ili na indirektnoj ekstrapolaciji pomoću postojećih korelacionih zavisnosti. Primer indirektno ekstrapolacije može biti prenos podataka o

pronosu nanosa sa jednog vodotoka na drugi (sličan) vodotok; za to se mogu koristiti zavisnosti tipa: $Q_s \propto Q^a$ ($a - \text{const}$) ili $Q_s \propto V^b h^c$ ($b, c - \text{const}$) [215]. Prva opcija ne omogućava pouzdanu prognozu, a druga to omogućava, jer koristi hidrauličke veličine koje su specifične za razmatrani vodotok. Indirektna ekstrapolacija podrazumeva i primenu fizički zasnovanih obrazaca za pronos nanosa, pri čemu se postojeći podaci mogu koristiti za kalibraciju izabranog obrasca, da bi se ovaj zatim koristio za generisanje dodatnih podataka.

U nastavku se komentarišu neki aspekti psamoloških analiza u okviru standardnih inženjerskih projekata.

Produkcija nanosa u slivu. Termin „produkcija nanosa” u slivu se primarno odnosi na *tranzitni suspendovani nanos*, kao deo ukupnog nanosa (KI-11.9-SI:11.17). Osim u analizi zasipanja akumulacija, ovaj deo nanosa se ne uzima u obzir u rešavanju klasičnih problema regulacije reka, jer malo utiče na formiranje korita⁷.

Analiza produkcije nanosa u slivu počinje identifikacijom dominantnih erozionih oblika (površinsko spiranje, formiranje brazda, jaruga itd.). Za kvantifikaciju produkcije nanosa postoji više empirijskih obrazaca. Jedan broj obrazaca daje godišnji gubitak tla u slivu, obuhvatajući faktore kao što su: topografija (površina sliva, osrednjeni nagib), energija padavina, erodibilnost tla, vegetacija, antierozione mere (terasiranje, obrada poljoprivrednog zemljišta). Drugi obrasci, umesto energije padavina, uvode „faktor oticaja” vezan za izolovane kišne epizode, velikog intenziteta i kratkog trajanja. Razmatraju se kiše povratnih perioda $2 \div 100$ godina, pa se merodavna produkcija nanosa dobija težinskim osrednjavanjem, shodno verovatnoći pojave. Proračun produkcije nanosa u slivu je predmet specijalizovane literature, npr. [215].

Granulometrijski sastav. Materijal na dnu rečnog korita je mešavina nanosa, od krupnog šljunka, peska, do mulja i gline. Od sastava ove mešavine zavisi stabilnost rečnog dna. Nije dovoljno samo poznavati srednju krupnoću zrna (d_{50}), već kompletan granulometrijski sastav. To je naročito važno kod reka sa šljunkovitim koritom, gde postoji mogućnost armiranja ili samopopločavanja (KI-9.2.5-SI:9.8, 12.2.2.2) – procesa segregacije nanosa po krupnoći, sa sitnim frakcijama ispod najkrupnijeg nanosa. Obale aluvijalnih vodotoka su obično formirane od tla iste ili sitnije krupnoće od onog na dnu korita, pa su zato lakše erodibilne (ukoliko ne sadrže značajnu količinu gline, ili su zaštićene vegetacijom). Kod koherentnih (vezanih) materijala, otpornost na eroziju je više uslovljena jačinom kohezivne veze između čestica nego krupnoćom tih čestica.

Za projektovanje regulacionih radova i građevina, od svih fizičkih karakteristika mešavina nanosa primarni su: granulometrijski sastav, gustina, zapreminska masa i ugao unutrašnjeg trenja (KI-8.2.1.1–8.2.2.4). Određivanje granulometrijskog sas-

⁷Veoma velike koncentracije tranzitnog nanosa imaju indirektan uticaj kroz povećanje viskoznosti i gustine vode, rast vodne vegetacije i stabilnost obala.

tava, koje podrazumeva zahvatanje uzoraka, određivanje krupnoće i obradu rezultata, detaljno je opisano u prvoj knjizi (KI-8.2.2.1), gde je ukazano i na probleme koji se javljaju u praksi. Ovde se samo napominje da broj uzoraka i mesta njihovog zahvatanja zavise od veličine vodotoka i lokalnih uslova (pritoke, sprudovi, obrušavanje obale, objekti). Na dugačkim deonicama se preporučuje uzorkovanje na svakom kilometru, kao i $100 \div 150$ m uzvodno i nizvodno od svake pritoke. U slučaju homogenog sastava rečnog dna, dovoljno je zahvatanje iz površinskog sloja debljine 30 cm (KI-8.2.2.1-Sl:8.4), a u slučaju stratifikovanog dna, primenjuje se duboko zahvatanje uz obavezno obeležavanje debljine slojeva.

Pokretanje i pronos nanosa. Kritičan moment za pokretanje nanosa nastaje kada se hidrodinamičke sile koje deluju na zrno izjednače sa silama koje se opiru pokretanju tog zrna. Pokretanje nanosa je već razmatrano u primeru 2.11. Kako je peščani materijal lako pokretan čak i pri malim protocima, analiza pokretljivosti ima veći značaj za predviđanje armiranja šljunkovitih korita. Armirajući sloj može biti razoren u periodu velikih protoka i obnovljen u periodu njihovog opadanja. Za analizu armirajućeg sloja neophodno je poznavanje najveće krupnoće zrna d_{95} (KI-12.2.2.2).

U standardnim projektima se koriste (polu)empirijski izrazi za pronos vučenog, suspendovanog i ukupnog nanosa (KI-10.3, 11.5, 11.9). Treba voditi računa da obrasci daju *transportni kapacitet* u ravnotežnim uslovima, kada nema erozije i zasipanja korita. Pri izboru računске metode, ključno je poznavanje vodotoka – odnosa „vučeni-suspendovani nanos” i mogućnosti terenskih merenja za potrebe kalibracije računskog modela. Generalno, proračun pronosa nanosa po frakcijama ($4 \div 6$) je tačniji od proračuna sa reprezentativnom krupnoćom d_{50} (ali samo ako postoje uslovi za kalibraciju).

Deformacija korita. Proračuni opšte i lokalne deformacije rečnog korita sastavni su deo projekata na ovom nivou. Koriste se standardni računski postupci, kao što su oni ugrađeni u softverskom alatu HEC-RAS [250]. U nastavku se ukazuje na dva specifična problema koji se često sreću u praksi.

Jedan od uzroka deformacije rečnog korita je prekomerno vađenje peska i šljunka. Kada izbagerovane količine nanosa na određenoj lokaciji premaše dotok nanosa, kontinuitet pronosa nanosa biva narušen. U težnji da ovaj poremećaj neutrališe, reka spontano indukuje proces *regresivne erozije*, kada se manjak nanosa prirodnim putem nadoknađuje iz samog korita. Ovaj proces brzo napreduje uzvodno sa veoma nepovoljnim posledicama, kao što su: potkopavanje mostovskih stubova, prekid rada vodozahvata, sniženje nivoa podzemne vode u priobalju i dr. Čak i kada su locirane van rečnog korita, u plavnim inundacijama, šljunkare mogu izazvati nepovoljne posledice. Predviđanje efekata vađenja peska i šljunka je veoma teško i može zahtevati složenije proračune u višoj fazi projektovanja.

U razmatranju opšte deformacije ponekad je neophodno uzeti u obzir i uticaj malih voda. Naime, poznato je da se širina rečnog korita formira pod uticajem poplavnih

talasa retkih povratnih perioda. Može se desiti da u malovodnim periodima širina korita bude prevelika u odnosu na dubinu toka. Veoma plitki tokovi su neodrživi i reka teži da koncentriše tok urezivanjem korita za malu vodu unutar postojećeg korita. Ovaj proces je teško predvideti i računom potkrepiti. Obilaskom terena potrebno je oceniti koliko je dati proces realan, pa ako je potrebno, detaljniju analizu predvideti u narednoj (višoj) fazi projektovanja.

2.5.3 Viši nivo projektovanja

Ovaj nivo projektovanja zahteva simulaciju hidrauličkih i psamološko-morfoloških procesa pomoću višedimenzionih numeričkih modela, ili odgovarajućih fizičkih (hidrauličkih) modela. Primena navedenih modela je neophodna kada se želi simulacija morfodinamike vodotoka sa mnogo većim stepenom detaljnosti od onog na standardnom nivou projektovanja. U nastavku se ukazuje na neke specifičnosti korišćenja numeričkih i fizičkih modela.

2.5.3.1 Korišćenje numeričkih modela

Teorijska ograničenja. Korisnik komercijalnog softvera podrazumeva da je zagarantovana verna numerička reprodukcija kretanja vode i nanosa. To je samo uslovno tačno, jer postoje izvesna teorijska kontraverzna pitanja i ograničenja, koja se reflektuju na rezultate proračuna.

(1) Uticaj suspendovanog nanosa na hidrauličke otpore nije do kraja razjašnjen. Mnogi autori se spore da li prisustvo suspendovanog nanosa smanjuje ili povećava hidrauličke otpore i u kojoj meri to zavisi od koncentracije nanosa. Neka eksperimentalna istraživanja potvrđuju tvrdnju da suspendovani nanos u izvesnoj meri *smanjuje* otpore. Kontroverzno pitanje je da li je vrednost Fon Karmanovog koeficijenta $\kappa=0,4$ (jednog od parametara turbulencije) univerzalna konstanta, ili je promenljiva, u zavisnosti od koncentracije suspendovanog nanosa (KI-2.6-(2.27), 2.10-(2.50, 2.51)).

(2) U većini numeričkih modela je razdvojen proračun transporta vučenog i suspendovanog nanosa. Pouzdanost proračuna vučenog nanosa je znatno manja od proračuna suspendovanog nanosa, jer je teorija vučenog nanosa pretežno zasnovana na empirijskim istraživanjima, a teorija suspendovanog nanosa, na opštim zakonitostima mehanike fluida. U proračunima vučenog nanosa prisutna je podela na konceptualnom nivou. Neki autori (Velikanov i Ajnštajn), smatraju da je mehanizam kretanja vučenog nanosa *prekidan* – da periode skokovitog kretanja zrna prate periodi mirovanja. Ovaj koncept odgovara maloj i umerenoj koncentraciji nanosa i omogućava stohastički pristup u modeliranju (KI-10.3.5, 10.4, 11.7). Drugi autori (npr. Bagnold), smatraju da je trajektorija zrna uslovljena vektorskim slaganjem početnog impulsa (proizvoda mase zrna i njegove brzine kretanja u pravcu toka), brzine tonjenja zrna i brzine samog toka (KI-10.3.4, 10.4). Ovaj deterministički koncept podrazumeva *neprekidno*, intenzivno kretanje nanosa i prikladan je krupnijim zrnima (čija inercija nije zanemarljiva) i značajnim koncentracijama.

(3) Usled turbulencije toka pronos vučenog nanosa *nije jednoznačno* određen vrednošću tangencijalnog napona. Sa računске tačke gledišta, za pokretanje nanosa je svejedno da li nastaje pri maloj dubini i velikom nagibu dna, ili pri velikoj dubini i malom nagibu dna, a evidentno je da turbulentne karakteristike toka u ta dva slučaja nisu iste.

U obrascima za pronos vučenog nanosa uticaj turbulencije je samo implicitno obuhvaćen nizom empirijskih koeficijenata. Pored toga, u modeliranju kretanja vučenog nanosa teškoće predstavljaju uticaji sekundarnih strujanja u krivinama (KI-7.1.6), nanosnih formacija (KI-10.4) i inercije koja dovodi do „kašnjenja” pronosa nanosa u odnosu na promenu protoka vode (KI-12.2.2).

(4) Prisutno je i pitanje izbora formule za pronos vučenog nanosa (KI-10.3.2, 10.3.5, 11.9), jer one nemaju univerzalnu primenljivost. Srećom, dve su olakšavajuće okolnosti. Prvo, primenljivost nekog obrasca potvrđuje se njegovom kalibracijom pomoću terenskih merenja. Drugo, u regulaciji reka se ne insistira na apsolutno tačnim rezultatima, već se rezultati proračuna koriste u *relativnom smislu*, da bi se uporedio režim nanosa pre i posle regulacionih radova.

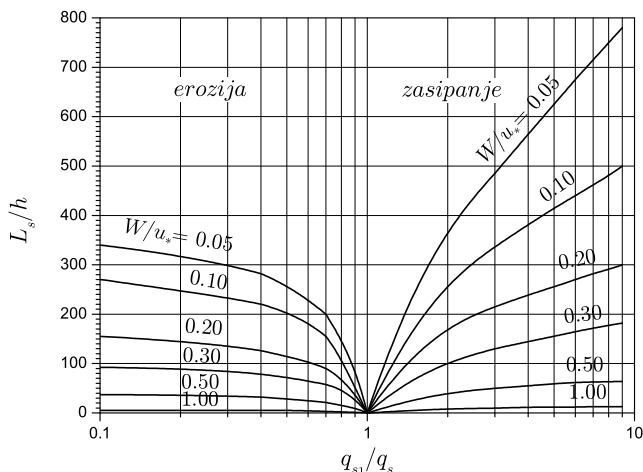
U poslednje vreme je uočljivo skretanje od opšteg ka partikularnom; umesto korišćenja poznatih obrazaca, javlja se trend da se koriste zakonitosti koje važe samo za određeni vodotok, ili čak samo za njegove pojedine deonice⁸.

(5) Naredni primer složenosti matematičkog modeliranja na teorijskom nivou je tretman tzv. „neravnotežnih” uslova. Samo mali broj modela uzima u obzir stvarnu raspoloživost nanosa (višak ili manjak u odnosu na transportni kapacitet), shodno datim graničnim uslovima. Modeliranje neravnotežnog stanja [25] omogućava da se odredi vremensko i prostorno prilagođavanje pronosa nanosa u pravcu dostizanja transportnog kapaciteta (KI-11.8-Sl:11.16) Slika 2.46).

(6) Teorija turbulentne difuzije (KI-2.5, 11.1.4, 11.1.5, 11.2) ima ključnu ulogu u analizi kretanja nanosa. Difuzioni prenos čestica u vertikalnoj ravni pod uticajem fluktuacionih komponenti brzine toka (KI-2.2) je slučajan proces koji dovodi do taloženja suspendovanih čestica ili do vraćanja istaloženih čestica u stanje „resuspenzije”.

Problem modeliranja turbulentne difuzije kod rečnih tokova je u tome što se mora uspostaviti veza između parametara matematičkog modela i fluktuacionih kretanja *mešavine* tečne i čvrste faze, što nimalo nije lako.

⁸Umesto tradicionalnog pristupa da se najpre postavi teorijski model, koji se onda u praksi potvrđuje merenjima, novi pristup nalaže da se obradom velikog broja mernih podataka (engl. *data mining*) dođe do matematičkog modela; primer su obrasci izvedeni za Dunav, za rečni potez u prirodnom režimu i za potez đerdapske akumulacije, pri čemu je korišćena baza podataka od 170 merenja izvršenih u periodu 1964-1999 [11].



Slika 2.46: Psamološka dužina prilagođavanja u funkciji opterećenja vodotoka suspendovanim nanosom; L_s – dužina dostizanja ravnotežnog stanja, h – lokalna dubina, W – brzina tonjenja čestice nanosa, u_* – lokalna smičuća brzina, q_{s1} – povećani dotok nanosa, q_s – transportni kapacitet vodotoka [117, 253].

Problemi kalibracije numeričkih modela. Pouzdanost rezultata koje daje numerički model zavisi od mogućnosti njegove kalibracije⁹. U praksi se kalibracija najčešće odnosi na određivanje vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti u linijskom modelu tečenja. Kao što je poznato, postupak se svodi na variranje vrednosti ovog parametra sve dok se računski linija nivoa približno ne poklopi sa linijom nivoa snimljenom u prirodi. Ovaj, naizgled jednostavan vid kalibracije nije bez teškoća [128].

(1) Kalibracija je moguća samo u domenu malih i srednjih voda, kada je moguće snimiti linije nivoa u glavnom koritu. To nije moguće pri velikim vodama, zbog nepristupačnosti i velikih brzina toka. U tom slučaju se kalibracija zasniva na tragovima najvećih nivoa registrovanih u prošlosti. Merenje nivoa i protoka u inudacijama je problematično zbog njihove velike površine.

(2) Ponekad se poklapanje računskih i snimljenih linija nivoa može ostvariti samo sa nereálnim vrednostima Manningovog koeficijenta (npr. sa vrednostima koje odgovaraju hidraulički glatkom režimu). Tada se mora pribeći novim geodetskim snimanjima na terenu ili novoj diskretizaciji računski oblasti, što produžava i poskupljuje izradu projekta.

⁹Kalibracija predstavlja proces određivanja vrednosti parametara numeričkog modela na osnovu rezultata merenja sprovedenih na terenu ili u laboratoriji. *Verifikacija* numeričkog modela predstavlja proveru da li on odgovara konceptualnom matematičkom modelu, a *validacija*, proveru da li numerički model daje fizički realne rezultate. Kalibracija, analiza osetljivosti i statistička analiza su različiti vidovi validacije modela.

(3) Ako se ne raspolaže snimljenim linijama nivoa, formalna kalibracija modela nije moguća, već se vrednosti Manningovog koeficijenta moraju usvojiti na osnovu podataka iz literature [117, 31], ili informacija prikupljenih obilaskom terena. Kada su u pitanju inundacije, koriste se izvori sa interneta (satelitski snimci i baze podataka o nameni zemljišta).

(4) Postoje i slučajevi kada kalibracija nije neophodna ili je čak nemoguća. Na primer, vrednosti koeficijenta rapavosti kod betonskih kanala variraju u vrlo uskim granicama, pa se mogu usvojiti iz literature. Drugi primer je proračun talasa nastalog rušenjem brane; kalibracija modela u ovom slučaju nije moguća jer se radi o protocima koji su bar za jedan red veličine veći od onih koji su ikada registrovani u prirodi (Slika 2.47).



Slika 2.47: Numerička simulacija hidrauličkih posledica proloma brane jalovišta Grot kod mesta Kriva Feja u jugoistočnoj Srbiji [101]; na karti je ucrtana plavna zona nizvodno od brane; hidrografi prikazuju prostiranje poplavnog talasa (vode i jalovine), izazvanog prolomom brane trajanja (30 min); vršne vrednosti ($> 8000 \text{ m}^3/\text{s}$) daleko prevazilaze najveće protoke vodotoka nizvodno od brane u njegovom prirodnom režimu.

Napomena u vezi sa Manningovim koeficijentom. Poznato je da je u linijskim (1D) modelima ovaj koeficijent ima karakter *globalnog* parametra svih hidrauličkih otpora na jednoj deonici (rapavosti, neprizmatičnosti i zakrivljenosti korita, nanosnih formacija, vegetacije i objekata, KI-3.5). Apsorbuje i nedovoljnu tačnost snimljenih poprečnih profila. U višedimenzionim (2D i 3D) modelima, Manningov koeficijent ima *lokalni* karakter. To znači da vrednosti ovog koeficijenta u 1D i 2D modelima ne moraju biti iste. U 2D modelima, Manningov koeficijent odražava uticaj turbulencije toka u vertikalnoj ravni, dok parametri nekog *modela turbulencije* (u sklopu računskog modela) to odražavaju u horizontalnoj ravni. Najjednostavniji model turbulencije je zasnovan na koeficijentu turbulentne viskoznosti

(KI-2.5). Postoje i složeniji modeli [127, 225], koji omogućavaju numeričku simulaciju vrtložnih tokova, što je od naročitog interesa kod građevina u rečnom koritu, kako pokazuje primer na Slici 2.48.

Izbor računskog modela. Na standardnom nivou projektovanja koriste se linijski (1D) računski modeli, od kojih je kod nas najviše u upotrebi HEC-RAS [250]. Na višem nivou projektovanja koriste se višedimenzioni (2D) i (3D) modeli, kakvi su na primer RMA2 [251] i Telemac2D/3D [83, 225].

Komercijalni softverski paketi imaju module za pronos nanosa i deformaciju korita. Kako se vremenske razmere hidrauličkih i psamološko-morfoloških promena kod aluvijalnih tokova veoma razlikuju, proračun se može ubrzati tako što se opšta deformacija korita ne računa u svakom koraku istovremeno sa proračunom pronosa nanosa, već nakon zadatog broja računskih koraka. Podrazumeva se da postoji opcija proračuna deformacije u svakom računskom koraku ako to priroda problema zahteva (slučaj brze promene konfiguracije dna, Slika 2.49).

Na kraju, treba imati u vidu i to da izbor računskog modela ne zavisi samo od zadatka koji se rešava, već i od obima i kvaliteta ulaznih podataka. Upotreba komplikovanih softverskih alata nije opravdana ako je fond podloga skroman ili je njihov kvalitet problematičan.

2.5.3.2 Korišćenje fizičkih modela

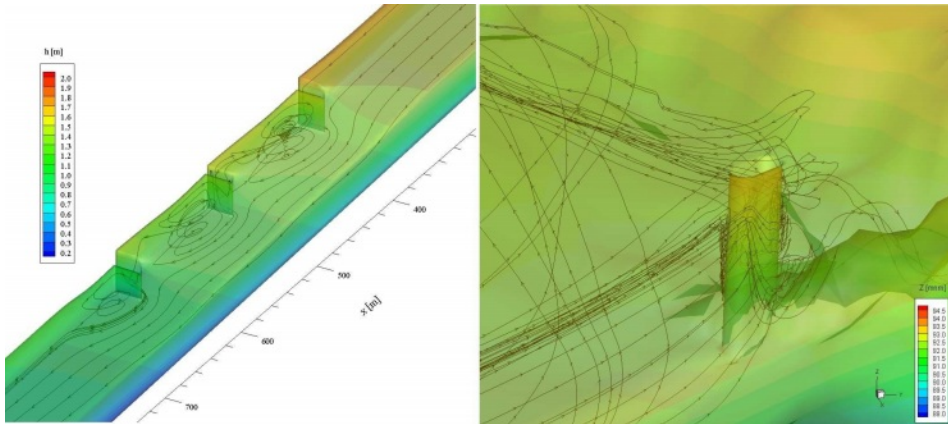
Fizički modeli su u prošlosti bili jedino sredstvo za modeliranje u rečnoj hidraulici. Vremenom su numerički modeli postali dominantni, što ne znači da fizički modeli više nisu potrebni. Naprotiv. Fizički i numerički modeli su *komplementarna sredstva* za rešavanje problema otvorenih tokova sa pokretnim dnom, a kombinacija ovih modela daje mogućnost njihove međusobne kalibracije i provere.

Najveći problem u projektovanju rečnih hidrauličkih modela je izbor materijala za pokretno dno (KI-13.3). Taj izbor može biti problematičan ne samo kada se ispituje opšta deformacija dugih rečnih deonica na modelima u distordovanoj razmeri, već i u slučaju lokalne deformacije korita, koja se po pravilu ispituje na modelima u nedistordovanoj razmeri (KI-13.2). Da bi se ovo objasnilo, neophodno je podsetiti se nekih osnovnih pojmova iz teorije sličnosti.

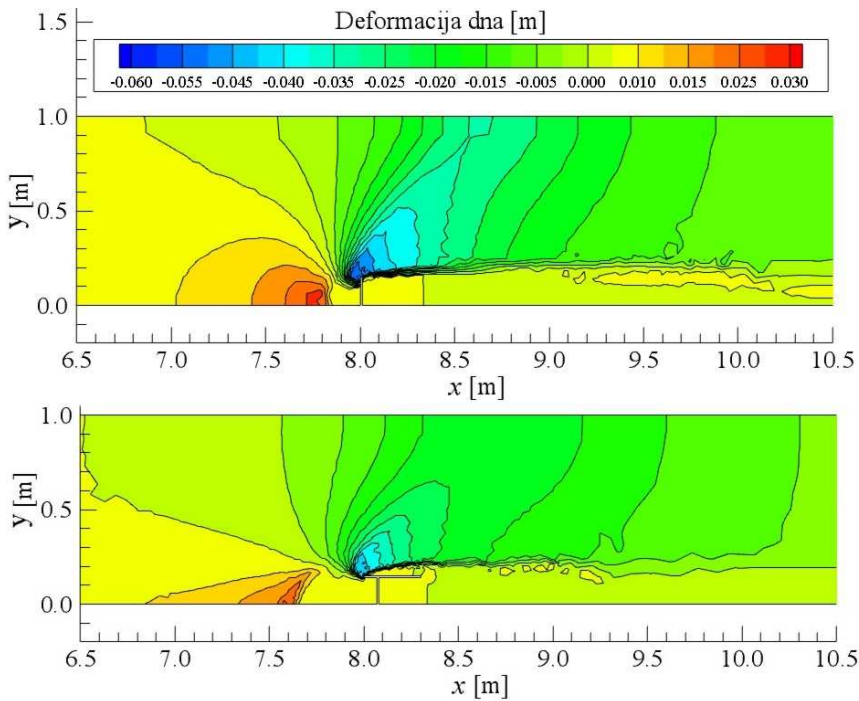
Rečni modeli u *potpunoj sličnosti* zahtevaju istovremeno zadovoljenje hidrauličke (Frudove) sličnosti, koja se odnosi na sličnost polja brzine i dubine i psamološke (Šildsove) sličnosti, koja obezbeđuje isti stepen pokretljivosti nanosa na modelu i u prirodi.

Frudova sličnost za rečne modele u *distordovanoj razmeri* može se opisati izrazom (KI-13.3-(13.6)):

$$Fr_* = \frac{h_*}{L_*} \left(\frac{h_*}{d_*} \right)^{2\mu} = 1 \quad (2.43)$$



Slika 2.48: Primeri numeričke (3D) simulacije vrtložne strukture tokova u blizini objekata u rečnom koritu; levo: vrtlozi u hipotetičkim međunaperskim poljima [110]; desno: opstrujavanje stuba Markovačkog mosta na Velikoj Morivi u periodu velikih voda [107].



Slika 2.49: Ispitivanje deformacije korita pod uticajem prostog napera i napera sa krilima; pomoću numeričkog 2D modela simuliran je eksperiment u laboratorijskom kanalu, koji je pokazao da je zapremina erodiranog materijala (peska krupnoće 1 mm) u slučaju prostog napera dvostruko veća od one kod napera sa krilima [112].

gde simbol „*“ označava razmeru – odnos neke veličine u prirodi i na modelu. U izrazu (2.43), razmere se odnose na: Frudov broj $Fr_* = Fr_p / Fr_m$, dužinu $L_* = L_p / L_m$, dubinu $h_* = h_p / h_m$ i apsolutnu rapavost (krupnoću nanosa) $d_* = d_p / d_m$; eksponent u izrazu (2.43) je proizašao iz pretpostavljenog logaritamskog rasporeda brzine: $\mu = [\ln(12h/d)]^{-1}$ (KI-3.2-(3.20)).

Psamološka sličnost se definiše preko razmera za veličine koje figurišu na poznatom Šildsovom dijagramu; kombinacijom ovih veličina dolazi se do razmere za prečnik zrna (KI-13.4.1-(13.13)):

$$d_* = \frac{L_*^{1/2}}{h_*}. \quad (2.44)$$

Međusobno usklađivanje osnovnih razmera, uz ograničenje stepena distorzije modela ($h_*/L_* < 5$), može dovesti do velikih problema sa izborom materijala za pokretno dno¹⁰. Kada se u datim uslovima ne može ostvariti potpuna sličnost, svesno se može, shodno prirodi problema, „žrtvovati” jedan uslov sličnosti, pod uslovom da to bitno ne utiče na tačnost modelskog ispitivanja. Dve su mogućnosti: (a) odstupanje od Frudove sličnosti: $Fr_* \neq 1$ i (b) odstupanje od Šildsove sličnosti $d_* \neq 1$. U prvom slučaju, govori se o rečnom modelu u „kvazi Frudovoj sličnosti”, a u drugom, o modelu u „kvazi psamološkoj”, ili „kvazi Šildsovoj sličnosti” (KI-13.4.2).

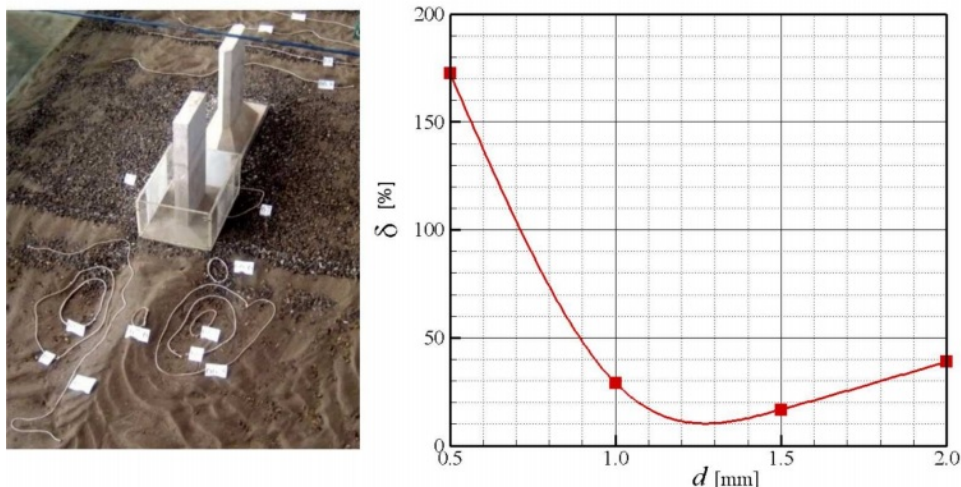
Prednost kvazi Frudove sličnosti je mogućnost rada sa prirodnim (peščanim) materijalom. Kada su u pitanju veliki ravničarski vodotoci insistira se na psamološkoj sličnosti ($d_* = 1$), a tolerišu se nešto veće vrednosti Frudovog broja na modelu nego u prirodi, sve dok je tečenje na modelu „duboko” u mirnom režimu (male vrednosti Fr broja). Kombinovanjem uslova (2.43) i (2.44), dobija se razmera za kvazi Frudovu sličnost:

$$Fr_* = \frac{h_*^{\mu-1/2}}{d_*^{\mu+1}}. \quad (2.45)$$

Kvazi psamološka sličnost ima opravdanje kada su u pitanju bujični vodotoci, sa krupnim nanosom, u burnom ili mešovitom režimu tečenja. Odstupanje od Frudove sličnosti se ne sme dopustiti, jer su hidrauličke promene nagle, a vrednosti Frudovog broja visoke. Kvazi psamološka sličnost podrazumeva korišćenje sitnijeg materijala od onog koji zahteva Šildsova sličnost, ali pod uslovom da tečenje na modelu ostane u oblasti hidraulički rapavog dna.

¹⁰Materijal na fizičkom modelu ne sme biti isuviše sitan zbog pojave nanosnih formacija (dina), koje narušavaju Frudovu sličnost. Pored toga, zbog razmere za gustinu, na rečnim modelima se često moraju koristiti veštački materijali (bakelit, smola, plovućac), što je skupčano sa praktičnim poteškoćama (nabavka, isplivavanje tokom rada i dr.).

■ **Primer 2.14.** Na Slici 2.50 prikazan je model mostovskog stuba, izgrađen u nedistordovanoj razmeri $L_* \equiv h_* = 40$. Merodavne hidrauličke veličine u prirodi su: $h_p = 8$ m, $V_p = 2$ m/s, $Fr_p = 0,05$, $\mu = 0,08$. Zadovoljenje potpune sličnosti (Frudove i Šildsove) nije moguće sa rečnim peskom krupnoće $d_p = 0,3$ mm (na osnovu (2.43) je $d_* = 40$, zrno na modelu bi moralo biti 40 puta sitnije od onog u prirodi). Da bi na modelu mogao da se koristi rečni pesak, potrebno je da bude primenjena puna psamološka, a kvazi hidraulička sličnost. Razmotrene su krupnoće zrna u opsegu: $d_m = 0,5 \div 2,0$ mm (razmere $d_* = d_p/d_m = 0,6 \div 0,15$). Pomoću izraza (2.45) određen je niz vrednosti Fr_* , a na osnovu njih, vrednosti Frudovog broja na modelu (Fr_m). Relativne razlike vrednosti Fr brojeva u prirodi i na modelu: $\delta = |Fr_p - Fr_m|/Fr_p$ predstavljaju meru odstupanja od Frudove sličnosti i kvantifikuju tzv. „efekte razmere” (Slika 2.50).



Slika 2.50: Model stuba mosta na Dunavu kod Beške [67] i dijagram odstupanje od Frudove sličnosti u zavisnosti od krupnoće peščanog materijala na modelu [123].

Vidi se da najmanje odstupanje od Frudove sličnosti, oko 10%, daju krupnoće 1,2 i 1,3 mm, pa je pesak sa ovom srednjom krupnoćom optimalan za hidraulički model. Vrednost $Fr_m = 0,07$ je tada samo nešto veća od one u prirodi ($Fr_p = 0,05$). Pesak čija je srednja krupnoća manja od 1,0 mm, odnosno veća od 1,5 mm, nije pogodan, jer je odstupanje od Frudove sličnosti značajno.

2.6 Projektna dokumentacija

Kako se kod nas projektna nomenklatura često menja, ovde će se koristiti uopštena terminologija višefaznog projektovanja: „niži (početni) nivo projektovanja” (idejna rešenja) i „viši (standardni i napredni) nivo projektovanja” (idejni i glavni projekti, projekti za izvođenje).

Generalno, projektna dokumentacija u oblasti regulacije reka sastoji se od četiri dela:

- I Opšti deo
- II Tehnički izveštaj
- III Prilozi (grafički/tabelarni)
- IV Foto dokumentacija.

Sadržaj pojedinih delova tipskog projekta je prikazan u nastavku.

I Opšti deo

- Izvod iz sudskog registra Privrednog suda
- Rešenje o ispunjenosti uslova za izradu tehničke dokumentacije
- Rešenje o imenovanju odgovornog projektanta
- Licenca odgovornog projektanta
- Izjava odgovornog projektanta
- Projektni zadatak
- Stručna mišljenja i uslovi (J.P. „Srbijavode”, RHMZ, „Plovput” i dr.)
- Rešenja (ministarstva)

II Tehnički izveštaj

- Sadržaj
- Spisak slika
- Spisak tabela
- Spisak priloga
- 1. Uvod (opšti podaci o projektu, predmet, ciljevi)
- 2. Osnove za projektovanje
 - prethodna tehnička dokumentacija
 - regulativa (tehnički propisi, standardi)
 - podloge (topografske, hidrološke, hidrauličke, psamološke i dr.)
- 3. Analize prirodnog režima vodotoka
 - hidrološka
 - hidraulička
 - psamološko-morfološka
 - stabilnost korita
- 4. Regulisano korito
 - koncepcija/varijantna rešenja
 - izbor elemenata trase
 - tip i položaj regulacionih građevina
- 5. Analize režima regulisanog vodotoka
 - hidraulička
 - psamološka
 - deformacija korita
- 6. Predmer i predračun (po varijantama)

- 7. Izbor optimalnog rešenja
 - kriterijumi za vrednovanje varijantnih rešenja
 - rezultat optimizacije
- 8. Uticaj na životnu sredinu
- 9. Tehnički uslovi izvođenja radova i uslovi zaštite na radu
- 10. Zaključci
 - Reference

III Grafički / tabelarni prilozi

- Dijagrami sa detaljnim rezultatima proračuna
- Situacioni planovi (R=1:5000, 1:10000, 1:25000)
- Uzdužni profili (R=1:100/1000, 1:100/5000, 1:200/25000)
- Poprečni profili (R=1:100/100, 1:100/200, ...)
- Crteži sa detaljima građevina

Deo projekta koji se odnosi na tehničko rešenje. Sadržaj ovog dela projektno dokumentacije zavisi od tipa regulacione građevine i vrste regulacionog zahvata. Detalji se razmatraju u narednim poglavljima. U nastavku se navode opšta pravila u vezi sa priložima i dokumentima koji prate prikaz tehničkog rešenja.

Na nižem nivou projektovanja daju se crteži *tipskih* građevina. Prilaže se i Program istražnih radova neophodnih za dalje projektovanje. Na višem nivou projektovanja, daju se crteži *svih* građevina pojedinačno, sa konstruktivnim detaljima u krupnijoj razmeri. Za potrebe projekta mogu se raditi posebne *tematske studije* (hidrauličke, psamološke, geotehničke i dr.), koje postaju sastavni deo projektne dokumentacije.

Deo projekta koji se odnosi na životnu sredinu. Regulacioni radovi na rekama mogu izazvati brojne nepovoljne uticaje po okolinu¹¹. Već je bilo reči o potencijalno negativnim posledicama regulacionih radova po morfologiju rečnog korita, režim površinskih i podzemnih voda i biološku raznovrsnost.

Ovde se posebno ukazuje na opasnost od zagađenja vode usled obimnih zemljanih radova i upuštanja velike količine mulja u živi tok. Zamućenje rečne vode nepovoljno utiče na akvatičnu faunu i povećava troškove prečišćavanja vode, ako se ova koristi za vodosnabdevanje.

Iako su materijali od kojih se grade regulacione građevine generalno hemijski inertni, treba voditi računa da u vodotok ne dospe zagađenje koje potiče od štetnih materija sadržanih u materijalu za nasipanje obala, ili u kamenu, šljunku i tucaniku (azbest, teški metali i dr.).

¹¹Termini „zaštita životne sredine” (okoline) i „ekološka zaštita” nemaju isto značenje, ali se u kontekstu uređenja vodotoka može smatrati da imaju isti smisao.

U analizi uticaja na okolinu treba razmotriti da li (i u kojoj meri) regulacioni radovi utiču na ispuštanje kanizacionih i industrijskih voda i kako to utiče na mehaničko (organsko i mineralno), biološko i hemijsko zagađenje rečnih voda. U tom cilju je potrebno utvrditi sadržaj i intenzitet zagađenja pomoću parametara:

- biohemijskog kiseonika (eng. *BOD* - Biochemical Oxygen Demand, mg/L) – indikatora prisustva biorazgradljivih organskih supstanci i bakterija;
- hemijskog kiseonika (eng. *COD* - Chemical Oxygen Demand) – indikatora prisustva nekog hemijski oksidirajućeg agensa (npr. kalijum permanganata) za procenu organskog zagađenja;
- ukupnog organskog ugljenika (eng. *TOC* - Total Organic Carbon) – mere sagorevanja organskih supstanci do gasa ugljen dioksida i vode.

Dodatno štetno dejstvo na rečne ekosisteme imaju: patogene bakterije iz kanizacionih otpadnih voda, zagađivači iz industrijskih otpadnih voda (fenoli, sulfati, ulja, joni teških metala, rastvorene radioaktivne materije), hemijski zagađivači sa poljoprivrednih površina (pesticidi, herbicidi, đubriva) i ispusti termoelektrana (termičko zagađenje vode). Otrovnne supstance mogu dospeti kroz tlo do podzemnih voda, a odavde do rečnih tokova. U nekim projektima je neophodno razmatrati načine uklanjanja nutrijenata (azotnih i fosfornih jedinjenja) koji dospevaju u recipijentne vodotoke i utiču na njihovu eutrofikaciju.

Treba imati u vidu da vremenski raspored radova može biti jedan od načina ekološke zaštite, jer omogućava da se poremećaj rečnih i priobalnih staništa svede na prihvatljivu meru. Ovo je važno stoga što se izgradnja regulacionih građevina obavlja po pravilu u periodima malih voda, koji se poklapaju sa periodima ribljeg mresta i razvoja vodnih beskičmenjaka.

U našoj praksi se oseća potreba konkretizacije veza između tehničkih rešenja i ekološke zaštite. Iako su svaka reka i svaki njen lokalitet slučaj za sebe, mogu se dati neke generalne smernice, prikazane u Tabeli 2.21.

Deo projekta koji se odnosi na tehničke uslove za izvođenje radova. U ovom delu se u višoj fazi projektovanja razmatraju pozicije pri izvođenju regulacionih radova i izgradnji regulacionih građevina (čišćenje korita, iskop, nasipanje, odlaganje itd.). Pri tome se referenciraju standardi za građevinske materijale. Od posebne važnosti je kamen, kao osnovni materijal za izgradnju regulacionih građevina. Propisima su definisane mere zaštite na radu, u toku gradnje i eksploatacije objekta. Sprovođenje ovih mera je naročito važno u vreme velikih voda.

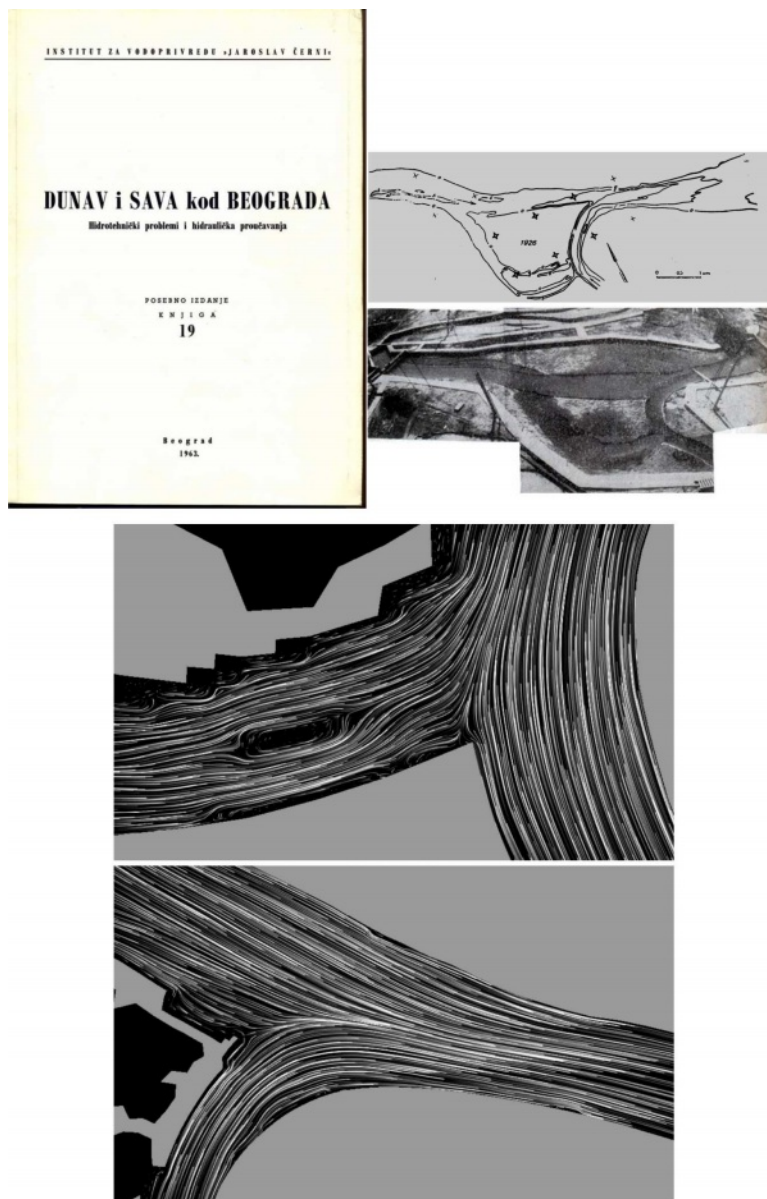
U višoj fazi projektovanja obuhvata se niz izvođačkih elemenata koji su navedeni u Tabeli 2.22. Jedna od najvažnijih stavki je dostupnost materijala. Reč je o ekonomskom pitanju, koje se tiče ne samo korišćenja lokalnog materijala u cilju smanjenja transportnih troškova, već i projektovanja konstrukcije; na primer, u nedostatku kvalitetnog kamena za obaloutvrdu, projektant se može odlučiti za druge tipove obloge (gabione, betonske blokove), ili za neki vid biološke zaštite.

Tabela 2.21: *Ekološki aspekti u projektima regulacije reka* [199].

Ekološki ciljevi projekta	Preporuke za projektovanje
Ograničenje erozije dna i obala	zakrivljena trasa, pragovi, stabilizacioni pojasevi, obaloutvrde, biotehničke mere;
Smanjenje zasipanja korita	uređenje korita za male vode, taložnice za nanos, selektivno čišćenje, antierozioni radovi;
Održanje nivoa podzemne vode	objekti za kontrolu nivoa, drveće u priobalju, održavanje krivina;
Održanje kvaliteta vode	selektivno čišćenje i vađenje panjeva, zaštitni pojasevi vegetacije, derivacioni kanali, uređenje korita za malu vodu;
Očuvanje vodenog habitata	selektivno čišćenje i vađenje panjeva, stvaranje tišaka, brzaka, „odmorišta” za ribe, ribljih staza, objekata za kontrolu nivoa, održavanje meandera, sezonska obustava radova;
Očuvanje priobalne vegetacije	selektivno čišćenje terena, uređenje obale, sadnja vegetacije, očuvanje ostrva i starača, biotehničke mere na ogoljenim padinama;
Očuvanje raznovrsnosti vegetacije na kopnu	obnova rečnog koridora, sadnja vegetacije, kontrola odlaganja izbagerovanog materijala;
Stvaranje vlažnih staništa	obnova rečnog koridora, sadnja drveća, očuvanje starača, rekultivacija deponija od izbagerovanog materijala;
Unapređenje estetskih vrednosti	selektivno čišćenje i uređenje obale, očuvanje meandera, objekti za kontrolu nivoa, primena posebnih materijala za uređenje obale, sadnja vegetacije, rekultivacija deponija, uspostavljanje zaštitnih pojaseva vegetacije;
Unapređenje uslova za rekreaciju	selektivno čišćenje terena, pragovi, uređenje korita, očuvanje starača.

Tabela 2.22: *Izvođački elementi*

Pozicija	Element projekta
1	Resursi: materijali, mehanizacija, radna snaga, energija
2	Spoljašnji i unutrašnji transport
3	Snabdevanje gradilišta energijom
4	Specifikacija mehanizacije
5	Specifikacija vrste i količine materijala
6	Dinamički plan rada sa gantogramom
7	Orgnizacija rada na gradilištu
8	Smeštaj i ishrana radne snage
9	Posebna pitanja
10	Finansijski obračun na osnovu jediničnih cena



Iz arhive: Uređenje beogradskog hidročvora; gore: kapitalna studija (1963), zasnovana na istorijskim morfološkim podacima i rezultatima ispitivanja na fizičkom modelu [73]; dole: numerička simulacija strujnica na ušću Dunavca i na ušću Save (2015) [111].

Glava 3

Regulacione građevine

3.1 Uvodna razmatranja

Ovo poglavlje se bavi raznim tipovima građevina koje se koriste u regulaciji reka. Posebna pažnja je posvećena obaloutvrdama, jer se najčešće sreću na terenu, bilo kao samostalne građevine, ili u kombinaciji sa drugim građevinama. U okviru obaloutvrda prikazano je dimenzionisanje konstruktivnih elemenata (obloge, filtri, nožice) koji su zajednički i za druge regulacione građevine.

Metode dimenzionisanja regulacionih građevina su uglavnom empirijskog karaktera i kao takve, sadrže brojne neizvesnosti. Zbog toga, bilo bi pogrešno shvatiti da se projektovanje regulacionih građevina može osloniti isključivo na primenu jednostavnih empirijskih formula. U ovom poglavlju je na nekoliko primera pokazano kako se validnost empirijskih postupaka može proveriti simulacijama pomoću višedimenzionih numeričkih modela, ili pomoću fizičkih modela. Time se želelo naglasiti da empirijske formule treba obazrivo koristiti, pre svega za ocenu dominantnih uticaja i poređenje varijantnih rešenja u ranim fazama projektovanja, a da postoji neophodnost provere na višem nivou projektovanja. Jasno, ta provera zahteva puno više vremena i finansijskih sredstava.

3.2 Materijali u regulaciji reka

Za izradu regulacionih građevina na raspolaganju je veliki broj prirodnih i veštačkih materijala. Preporuka je da se, iz ekonomskih, ekoloških i estetskih razloga što više koriste lokalni prirodni materijali (kamen, šljunak, zemlja, materijali biljnog porekla).

Danas se u regulaciji reka koristi i veliki broj veštačkih materijala (žičane korpe, geotekstil, gumirani proizvodi i dr.), zbog zagarantovanih svojstava i brže gradnje. Podrazumeva se da svi materijali treba da budu otporni na mehaničke, temperaturne, hemijske i druge uticaje, kojima su regulacione građevine izložene u dužem eksploatacionom periodu.

3.2.1 Prirodni materijali

3.2.1.1 Kamen, šljunak i pesak

Krupan kamen se koristi za izradu obloga i nožica obaloutvrda, tela napera, pregrada i drugih građevina. Koristi se kvalitetan kamen, odgovarajuće čvrstoće i mase, nehigroskopan i otporan na uticaj tekuće vode, mraza, habanja i hemijskih materija rastvorenih u rečnoj vodi. U tom smislu, najbolji je kamen od stena eruptivnog porekla (graniti, bazalt i dr.), ali se u praksi najčešće koristi kamen od sedimentnih stena, pre svega krečnjak.

Šljunak i pesak su aluvijalni materijali koji se široko koriste za izradu pojedinih elemenata regulacionih građevina (posteljica, filtarskih slojeva, ispuna), kao i za spravljanje cementa i betona. Često se zahvataju iz rečnog korita u blizini gradilišta. Pre ugrađivanja je potrebno da se šljunak i pesak ispiranjem oslobode organskih primesa.

Zbog otpornosti na dejstvo tekuće vode i relativno prihvatljivu cenu nabavke i ugradnje, kamen je tradicionalno najčešće korišćen materijal u regulaciji reka. Zato su veoma važna njegova svojstva, koja se mogu svrstati u tri kategorije.

Fizička svojstva. Od interesa su: (i) *apsolutna gustina* (odnos suve mase i zapremine), kao indikator čvrstoće kamena; za većinu stena je: $\rho_s = 2500 \div 2700 \text{ kg/m}^3$, izuzetno 2000 kg/m^3 (neke sedimentne stene), 3100 kg/m^3 (bazalt); (ii) *vodopropusnost* (masa upijene vode po jedinici suve stenske mase), kao indikator izdržljivosti kamena u eksploatacionim uslovima; (iii) *otpornost kamena na spoljašnje uticaje*: temperaturne promene (naročito mraz), mehaničke, biološke i hemijske; (iv) *kompaknost* (prisustvo pukotina), kao indikator otpornosti na lom i abraziju; (v) *boja* (od značaja za očuvanje ambijentalne vrednosti).

Proizvodna svojstva. Obuhvataju: (i) *oblik kamenih blokova* koji utiče na stabilnost regulacione građevine; (ii) *celovitost blokova*, koja je važna za rukovanje kamenom i sprečavanje njegovog usitnjavanja pri ugrađivanju; (iii) *gradacija* – raspodela krupnoće kamena, koja utiče na izbor načina gradnje i opreme.

Pokazatelji gradacije (oblika granulometrijske krive) zasnovani su na odnosu karakterističnih krupnoća, kao što je na primer, koeficijent uniformnosti: $S_u = d_{60}/d_{10}$ (KI-8.2.2.1-(8.30)). U Tabeli 3.1 kriterijum gradacije je dat preko odnosa prečnika zrna (d) i mase (M).

Tabela 3.1: *Kriterijum gradacije prema [42].*

Gradacija (granulometrijska kriva)	d_{85}/d_{15}	M_{85}/M_{15}	Kvalifikacija
Uska	$1,2 \div 1,5$	$1,7 \div 3,4$	„uniformna”
Razvučena	$1,5 \div 2,5$	$3,4 \div 16$	„uobičajena”
Veoma razvučena	$1,5 \div \geq 5$	$16 \div \geq 125$	„kamenolomska”

Svojstva bitna za konstrukciju. Obuhvataju: (i) *poroznost* – odnos zapremine šupljina u jedinici zapremine kamena; zavisi od stepena nabijenosti ($15 \div 40\%$), pri čemu niže vrednosti odgovaraju materijalima dobre gradacije kod kojih manje čestice ispunjavaju šupljine između većih čestica; (ii) *ugao unutrašnjeg trenja* – svojstvo kamena bitno za stabilnost građevina (više u nastavku).

3.2.1.2 Zemlja, glina i ilovača

Zemlja, odnosno tlo iz obližnjeg pozajmišta, koristi se u velikim količinama za izradu nasipa, popunjavanje prirodnih depresija i formiranje/ojačanje obale regulisanog korita. Razne vrste tla se definišu kao prirodni agregat mineralnih čestica koje se mogu razdvojiti mehaničkim sredstvima, nasuprot stenama kod kojih su minerali vezani čvrstim i trajnim vezama. Dva su osnovna tipa tla:

- (i) *vezana (kohezivna) tla* potiču od hemijski nestabilnih stena koje su pretrpele promene na mineralnom nivou i završile kao vrlo fine pločaste čestice;
- (ii) *zrnasta tla*, koja nastaju fizičkim raspadom relativno stabilnih stena i imaju zrna pravilnog oblika.

U poreklu tla se reflektuju njegova svojstva: ponašanje zrnastih tla je uslovljeno masom, a kohezivnih tla, površinom (od koje zavise kohezija, plastičnost i promena zapremine). Postoji više načina klasifikacije tla. Najčešće se za to koristi podela prema krupnoći zrna (Dodatak D2). U konkretnom slučaju, krupnoća zrna se utvrđuje prosejavanjem kroz standardizovana sita (Dodatak D1) i prikazuje granulometrijskim krivama (KI-8.2.2.1, Tab:8.2).

Za procenu stabilnosti tla u rečnom koritu i u obalama koriste se *geotehnički parametri*, od kojih je najvažnija čvrstoća na smicanje. Tla su dvofazni ili trofazni sistemi, koji se sastoje od čvrstih čestica, vode i/ili vazduha. Otpornost (čvrstoća) na smicanje se definiše kao najveći otpor tangencijalnom naponu, pre nego što nastane lom tla u obliku kliznih ravni. Ovaj otpor zavisi od prisustva vode u tlu (pornog pritiska). Veći sadržaj vode smanjuje kontakt između čestica i obrnuto.

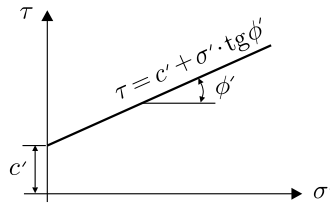
Efektivna čvrstoća na smicanje je:

$$\tau = c' + \sigma'_n \phi' \quad (3.1)$$

gde je: $c' = c - p_v$, c – kohezija, p_v – porni pritisak vode, σ'_n – efektivni normalni napon, ϕ' – efektivni ugao unutrašnjeg trenja.

Kod nevezanog (nekohezivnog) tla je: $\tau = \sigma'_n \phi'$ ($c'=0$), a kod zasićenog kohezivnog (glinovitog) tla: $\tau = c'$. (Vrednosti kohezije c date su u Dodatku D3, a ϕ' u prvoj knjizi, KI-8.2.2.4-Tab:8.5.)

Empirijska veza čvrstoće na smicanje (τ) i efektivnog normalnog napona (σ'_n) je linearna i grafički je prikazana na poznatom Mor-Kulombovom (Mohr-Coulomb) dijagramu (Slika 3.1), koji je prisutan u svakom udžbeniku iz mehanike tla.



Slika 3.1: Mor-Kulombov dijagram; parametri linearne veze – nagib prave, koji određuje ugao unutrašnjeg trenja i odsečak na ordinati koji određuje koheziju, utvrđuju se pomoću laboratorijskog opita.

Važno je znati da postoje tri ugaona parametra stabilnosti zrnastih materijala, koje treba razlikovati, jer se sva tri koriste u proračunima regulacionih građevina.

- *Ugao mirovanja.* Definiše nagib izvodnice kupaste gomile slobodno rasutih zrna. Odražava stepen unutrašnjeg trenja svih zrna (kao celine), ali ne i trenja između pojedinačnih zrna. U tom smislu, predstavlja *zapreminsko svojstvo* materijala. Ugao mirovanja (u odnosu na horizontalu) zavisi od niza faktora: krupnoće, gustine, oblika i rapavosti zrna, kao i površinskih uticaja (lepljivosti, elektrostatičkih sila) i dr. Meri se opitom pomoću strme ravni sa uzorkom tla, kada se nagib ravni povećava sve dok se (nakon klizanja i obrušavanja zrna) ne formira stabilna kosina, čiji nagib predstavlja ugao mirovanja. Imati u vidu da je uspostavljanju stabilnog stanja prethodilo *kretanje* zrna, zbog čega se ugao mirovanja ponekad zove i „ugao zaostalog (rezidualnog) smicanja”.
- *Ugao unutrašnjeg trenja.* Ovaj ugao je indikator *interakcije* zrna. Tangens tog ugla predstavlja *koeficijent trenja* između slojeva zrnastog materijala. Njegova vrednost je jednaka količniku tangencijalne i normalne komponente napona u uslovima graničnog naponskog stanja – u trenutku pokretanja zrna. Kako je kontakt zrna različit u suvom i pod vodom, razlikuju se dva ugla unutrašnjeg trenja, odnosno dva koeficijenta trenja. Kod *homogenih* zrnastih materijala, uglovi mirovanja i unutrašnjeg trenja imaju približno istu vrednost. U inženjerskoj praksi se često prećutno pretpostavlja homogenost materijala, pa se uglovi mirovanja i unutrašnjeg trenja izjednačavaju i oba označavaju simbolom ϕ .
- *Ugao pokretanja.* Za razliku od ugla mirovanja koji se odnosi na stabilnu kosinu *posle* kretanja zrnastog materijala, ugao pokretanja (ili „ugao početnog popuštanja”) definiše najveći ugao fiksne podloge do koga se ova može nagnuti, kada *počne* masovno pokretanje zrna – njihovo klizanje i kotrljanje. Dakle, ugao mirovanja je vezan za statičku stabilnost kosine, a ugao pokretanja, za otpornost zrna na pokretanje u *dinamičkim* uslovima (recimo pod uticajem turbulentnog toka). Kod mešavina tla sa zrnima raznih krupnoća, ugao pokretanja se vezuje za reprezentativno zrno (na primer d_{50}). Veće vrednosti odgovaraju krupnijim zrnima nepravilnog oblika.

3.2.1.3 Materijali biljnog porekla

U regulacionim radovima se koriste razne vrste vegetacije. To je naročito prisutno u tzv. „biotehničkoj” zaštiti kosina rečnih obala od erozije, kao najčešće zastupljenog elementa tzv. „naturalne” regulacije malih vodotoka. Prednost korišćenja vegetacije ogleda se u ekonomičnosti i ekološko-estetskom unapređenju ambijenta.

Za zaštitu kosina od fluvialne erozije koriste se razne vrste *trava*, kao što su: medunika (*Holcus lanatus*), pirevina (*Triticum repens*), troskot (*Polygonum aviculare*) i dr. (Slika 3.2).



Slika 3.2: Materijali biljnog porekla: medunika, pirevina, troskot, vrba, trska

Trave su otporne na kratkotrajne velike brzine toka (nekoliko sati). Dobra zaštita obala može se postići oblaganjem busenom tipičnih dimenzija $0,3 \times 0,3 \times 0,1$ m (Slika 3.3), ili sadnicama vrbe (*Salix*), $6 \div 8$ sadnica/m². U slučaju kada talasi, izazvani vetrom ili prolaskom plovila, utiču na eroziju obale, dobru zaštitu pruža trska (*Phragmites*). Trska je korisna i u ekološkom smislu, kao habitat faune (Slika 3.2).



Slika 3.3: Zatravljanje obale kao zaštita od fluvialne erozije.

Kada je u pitanju zaštita od poplava, u inundacijama se tradicionalno sade plantaže topola (*Populus*), koje imaju za cilj da, povećanjem hidrauličkih otpora, smanje brzinu poplavnog talasa. Stabla se sade planski, po šahovskom rasporedu, na međusobnom odstojanju od oko 5 m.

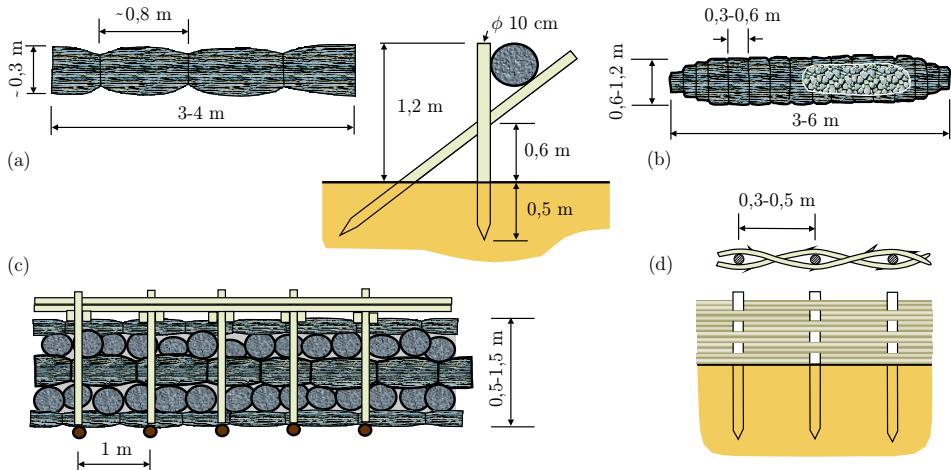
Vegetacija se tradicionalno koristi i za izradu nekih elemenata regulacionih građevina. Žicom povezani snopovi pruća, prečnika oko 0,3 m i dužine $3 \div 4$ m, zovu se *fašine* (Slika 3.4, 3.5-a).



Slika 3.4: Vrbovo pruće pripravljeno za izradu fašinskih madraca u sklopu uređenja obale u Beogradu i regulacionih radova na Velikoj Moravi kod Bagrdana.

Ako se fašine ispune kamenom, dobijaju se *punjene fašine* i *punjeni valjci*, dužine $3 \div 6$ m, prečnika $0,6 \div 1,2$ m, sa omotačem od pruća od oko $0,1$ m, i ispunom od kamena (šljunka ili tucanika) od oko $0,5 \div 0,7$ m³ po dužnom metru. Punjenje fašina se obavlja na obali, pomoću prethodno postavljenog rama (Slika 3.5-b), a uvezivanje, pomoću žice ($\varnothing=3$ mm), na razmaku $0,3 \div 0,6$ m.

Fašinski madraci imaju funkciju savitljivih temelja. Grade se na obali, od nekoliko slojeva fašina na ramu od drvenih oblica u vidu splavova (Slika 3.5-c), koji zatim plove do mesta ugradnje, gde se kamenom potapaju na rečno dno. Preko fašinskih madraca se težina regulacione građevine prenosi na slabo nosivo rečno dno, čime se sprečava tonjenje građevine i omogućava da se njena konstrukcija prilagodi deformaciji rečnog dna.



Slika 3.5: Elementi regulacionih građevina od biološkog materijala: (a) fašine; (b) punjeni valjak; (c) splav od fašina; (d) poplet od pruća.

Popleti se sastoje od nosećeg kolja pobijenog u tlo, oko kojih se obavijaju snopovi pruća (Slika 3.5-d). Koriste se kao element regulacionih građevina, ili, u kombinaciji sa kamenom, za zaštitu obale od erozije. Danas se tradicionalni fašinski elementi sve manje koriste jer zahtevaju deficitarni zanatski rad, tako da ih iz upotrebe istiskuju razni tipovi veštačkih materijala.

3.2.2 Veštački materijali

3.2.2.1 Geosintetički materijali

Industrijski proizvedeni veštački materijali od raznih vrsta polimera (polietilena, polipropilena, poliestera, najlona i polivinil hlorida) nose generički naziv „geosintetički materijali” (eng. *geosynthetics*). Široka gama ovih proizvoda se koristi u građevinarstvu, a posebno u regulaciji reka, sa ciljem da se postigne bar jedna od ovih funkcija: razdvajanje materijala, učvršćenje tla i dreniranje. Sintetički geomaterijali mogu se svrstati u nekoliko kategorija, prema nazivima datim na Slici 3.6.

U regulaciji reka se najčešće koriste *geotekstili*. Njihovim svojstvima biće u nastavku posvećena posebna pažnja. *Georešetke* su plastični ravni elementi, dobijeni bušenjem materijala, ili oblaganjem i spajanjem vlakana. *Geomreže* su elementi od polietilena koji se najviše koriste u drenažnim sistemima. *Geomembrane* su elementi najčešće izrađeni od polietilena, koji imaju glatke ili nabrane površine i služe kao vodonepropusne barijere.

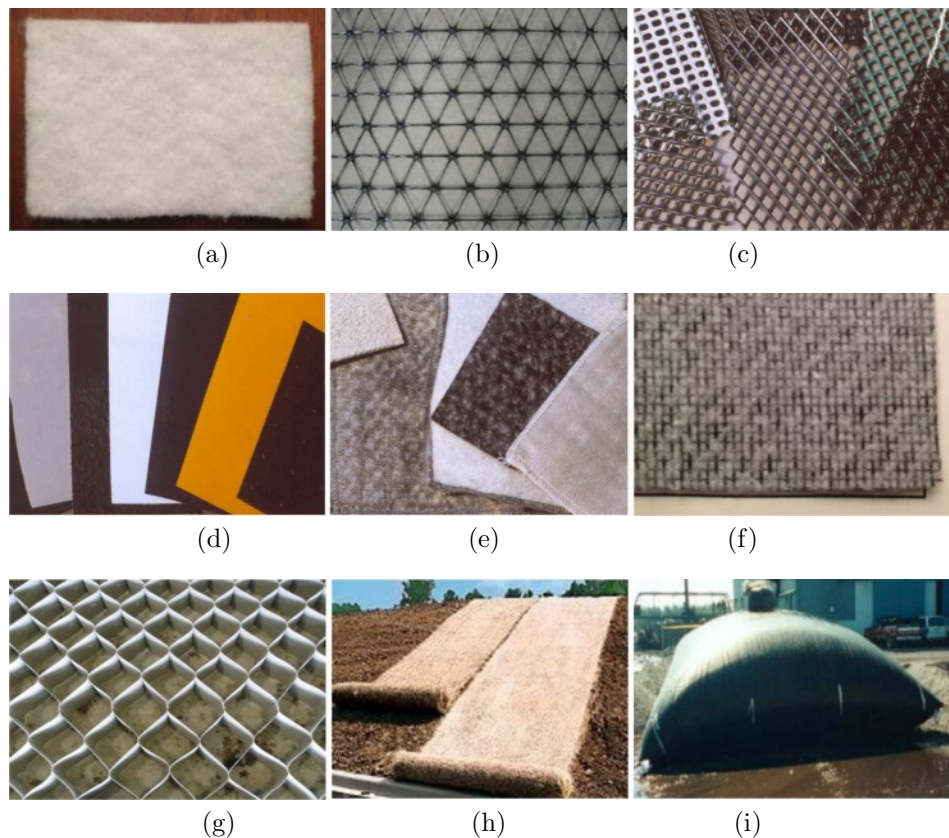
Geokompoziti su kombinacije geotekstila i georešetki, odnosno geomreža, sa objedinjenim svojstvima pojedinačnih elemenata. U tu kategoriju mogu se svrstati i geopodloge od geotekstila sa umetnutim slojem gline. Geoelementi sačaste strukture koriste se za stabilizaciju tla, posebno obala. Istu funkciju imaju i *geotepisi* koji se kombinuju sa travnatim rastinjem. *Cevasti* geoelementi se pune peskom i služe za izgradnju nasipa i drugih rečnih regulacionih građevina.

Geotekstili. Geotekstili su vodopropusne polimerne (poliesterske ili polipropilenske) tkanine koje se široko koriste u geotehnici i u hidrotehnici. Po načinu izrade mogu biti tkani i netkani (Slika 3.7).

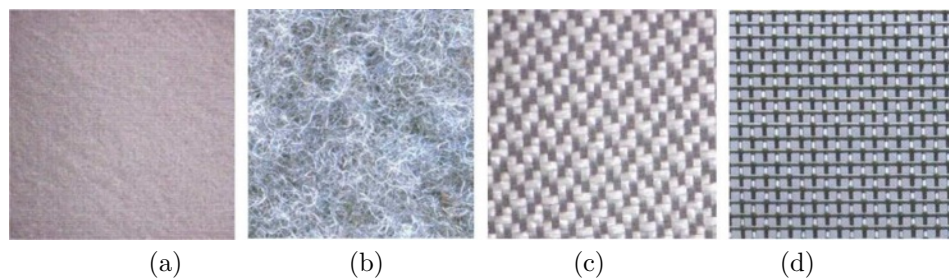
Netkani geotekstili su izrađeni od dugačkih polimernih vlakana koja su spojena tehnologijom iglanja, ili termičkim, hemijskim i mehaničkim postupcima. Tipična debljina termički formiranih geotekstila je $0,5 \div 1,0$ mm, hemijski formiranih, oko 3 mm, a mehanički formiranih, $2 \div 5$ mm. Imaju visoku otpornost na proboj, hemijske i biološke uticaje i ultravioleto zračenje. Odlikuju se odličnim drenažnim karakteristikama.

Tkani geotekstili se proizvode, kao što naziv kaže, tkanjem pojedinih vlakana, a rezultat je mrežasta struktura koja je pogodna za jačanje slabonosivog tla. Postoji više vrsta tkanih geotekstila, u zavisnosti od načina izrade i preplitanja vlakana. Posebnu vrstu čine pleteni geotekstili sa vlaknima u vidu međusobno povezanih petlji. Načelno, geotekstili imaju tri osnovne funkcije.

- *Izdvajanje/razdvajanje tla.* Kao savitljiv materijal, geotekstil se može koristiti za razdvajanje različitih tipova tla (na primer peščanog od šljunčanog tla, tla obale od kamene obloge itd.), sa ciljem da se očuvaju svojstva razdvojenih vrsta tla i da se poboljša njihovo sadejstvo.



Slika 3.6: Sintetički geomaterijali: a - geotekstil; b, c - geomreže; d - geomembrane; e - geopodloge sa slojem gline; f - geokompoziti; g - geosaće; h - geotepisi; i - cevasti geoelementi.



Slika 3.7: Tipovi geotekstila; netkani: a-b; tkani: c-d.

- *Učvršćenje tla.* Tlo može da primi napone pritiska, ali ne i zatezanja, pa tu ulogu preuzima geotekstil.
- *Dreniranje tla.* Sistem tlo–geotekstil treba da omogući slobodan oticaj vode, bez ispiranja čestica tla, u neograničenom vremenskom periodu.

U Dodatku D7 navedena su svojstva geotekstila koji se koriste u građevinarstvu. Sa stanovišta primene u hidrotehničkoj praksi, osnovna svojstva geotekstila su: poroznost, veličina otvora i vodopropusnost.

(i) *Poroznost* geotekstila predstavlja odnos zapremine šupljina (pora) i ukupne zapremine uzorka (sa osnovom površine 1 m^2):

$$\lambda_g = 1 - \frac{m_g}{\rho_g \delta}, \quad (3.2)$$

gde je: λ_g – bezdimenziona poroznost, m_g – masa geotekstila po jedinici površine [kg/m^2], ρ_g – gustina tekstilnih vlakana [kg/m^3], a δ – debljina tekstilnog materijala [m]. Kako su m_g i ρ_g konstante, iz (3.2) proizilazi da poroznost datog geotekstila zavisi od njegove debljine. Tipične vrednosti: $\delta = 0,25 \div 7,5 \text{ mm}$.

(ii) *Površina otvora* „POA” (eng. *Percent Open Area*) je parametar koji prestavlja procentulani odnos površine otvora (prostora između niti) i ukupne površine uzorka. Koristi se samo za tkane geotekstile. Tipične vrednosti: $\text{POA} = 4 \div 8\%$.

(iii) *Prividna veličina otvora* „AOS” (eng. *Apparent Opening Size*) definiše se karakterističnim otvorom sita na granulometrijskog krivoj O_{95} (samo 5 % većih otvora).

(iv) *Permitivnost* je parametar hidrauličke provodljivosti¹ kroz ravan tkanine:

$$\Psi_g = \frac{K_n}{\delta} \quad (3.3)$$

gde je K_n – koeficijent hidrauličke provodljivosti (filtracije) kroz ravan geotekstila, a δ – debljina tkanine (na koju utiče optrećenje).

Imajući u vidu Darsijev (D’Arcy) zakon [134]:

$$q_n = K_n I_{\Pi} A_g = K_n (\Delta\Pi/\delta) A_g = \Psi_g \Delta\Pi A_g,$$

može se uspostaviti ovakva veza:

$$\Psi_g = \frac{q_n}{\Delta\Pi A_g} \quad (3.4)$$

¹Permeabilnost je svojstvo poroznog medijuma da propusti fluid; izražava se pomoću koeficijenta permeabilnosti k u jedinicama [m^2], ili u darsijima (1 darsi $\approx 10^{-12} \text{ m}^2$). Hidraulička provodljivost (konduktivnost) opisuje lakoću kretanja vode kroz porozni medijum i izražava se pomoću koeficijenta provodljivosti K , čija vrednost zavisi od gustine i viskoznosti fluida, svojstvene permeabilnosti i zasićenja tla: $K = \rho g k / \mu$ [m/s], gde je μ – dinamička viskoznost fluida [Pa·s]. Koeficijent K se koristi u formulaciji poznatog Darsijevog (D’Arcy) zakona [134].

gde je: q_n – filtracioni protok kroz ravan geotekstila, $\Delta\Pi$ – pijezometrijski pad (savljadaivanje otpora kretanju vode kroz tkaninu), a A_g – površina geotekstila u problemu koji se razmatra.

Vrednost parametra permitivnosti se određuje eksperimentalno, pomoću Darsi-jevog aparata, kao u slučaju tla [134]. Tipične vrednosti: $K_n = 0,0008 \div 0,23 \text{ cm/s}$ i $\Psi_g = 0,02 \div 2,2 \text{ s}^{-1}$.

(v) *Transmisivnost* je parametar hidrauličke provodljivosti u ravni tkanine:

$$\Theta_g = K_g \delta \quad (3.5)$$

gde je: K_g – koeficijent filtracije u ravni geotekstila.

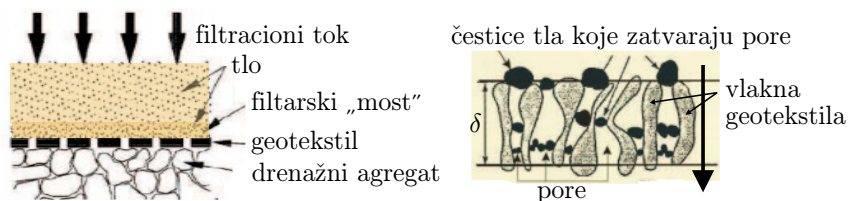
Ako su dimenzije pravougaonog komada geotekstila: dužina l_1 i širina l_2 , iz Darsi-jevog izraza sledi:

$$q_g = K_g (\Delta\Pi/l_1) A_g = K_g (\Delta\Pi/l_1) l_2 \delta = \Theta_g (\Delta\Pi/l_1) l_2,$$

pa je veza između transmisivnosti i protoka u ravni geotekstila:

$$\Theta_g = \frac{q_g l_1}{\Delta\Pi l_2}. \quad (3.6)$$

Navedene osobine su ključne za izbor geotekstila koji se koristi kao *sintetički filter*. Takav geotekstil treba da omogući slobodan prolaz vode, a da pri tome spreči ispiranje čestica tla obale u neograničenom vremenskom periodu. Za geotekstilni filter je (pored permitivnosti i transmisivnosti), bitna i otpornost na *kolmiranje* (zapušenje) (Slika 3.8).

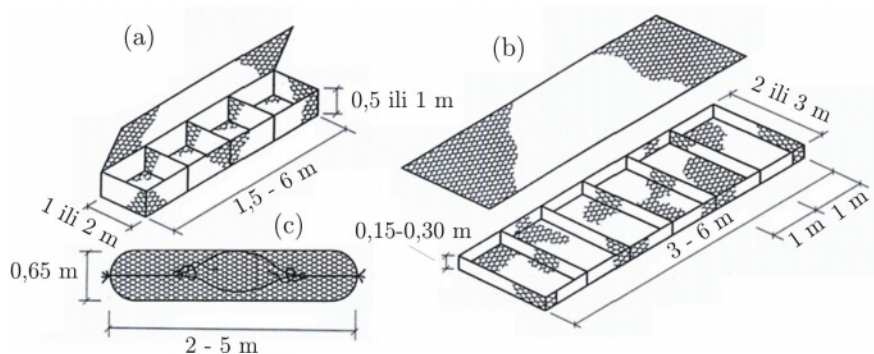


Slika 3.8: Shematski prikaz kolmiranja geotekstilnog filtra.

3.2.2.2 Gabioni

Gabioni su generičko ime raznih tipova konstruktivnih elementa za izgradnju regulacionih građevina. Gabioni su žičane korpe ispunjene kamenom. Tri osnovna tipa su: kutijasti gabioni, gabionski madraci i cevasti, ili vrećasti gabioni (Slika 3.9).

Prednosti gabiona su: (i) korišćenje sitnog kamena; (ii) prilagodljivost deformacijama okolnog tla (naročito sleganju); (iii) mali uticaj deformacije samih gabiona (pomeranja kamene ispune) na stabilnost građevine; (iv) brzina i jednostavnost izgradnje raznih tipova regulacionih građevina.

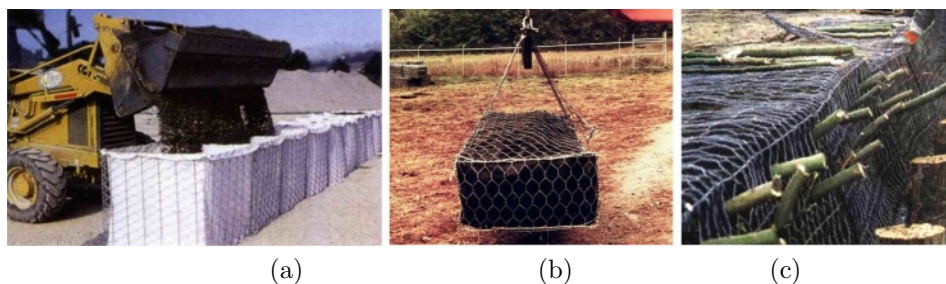


Slika 3.9: Tipovi gabiona: (a) kutijasti, (b) madrac i (c) cevasti [42].

Usled velike vodopropusnosti, gabioni nisu izloženi nepovoljnim uticajima hidrostatičkog diferencijalnog pritiska. Obično idu u kombinaciji sa geotekstilnim filtrom na kontaknoj površini, zbog sprečavanja ispiranja čestica osnovnog tla.

Žičane korpe se izrađuju od duplo pocinkovane žice, sa tipičnom veličinom otvora $60 \div 80$ mm, koja je manja od krupnoće kamena (Dodatak D6). Korpe se mogu puniti i sitnozrnim materijalima (tlom, peskom, šljunkom), u kom slučaju se za izradu korpi koriste guste polimerske mreže, ili žičane mreže obložene geotekstilom (Slika 3.10-a).

Gabioni punjeni tлом (Slika 3.10-b) se koriste uglavnom za izradu potpornih zidova, ispunjavajući pri tome i određene estetske zahteve, kroz mogućnost da se u tlo usadi vegetacija (Slika 3.10-c).



Slika 3.10: Gabioni: (a) obloženi geotekstilom; (b) ispunjeni zemljom; (c) sa sadnicama [137].

Žičane mreže se dopremaju na gradilište u vidu paketa, pa se na licu mesta formiraju kutijasti gabioni (Slika 3.11) ili gabionski madraci. Punjenje korpi kamenom se obavlja mašinski ili ručno. Korpe kutijastih gabiona i gabionskih madraca imaju poprečne dijafragme koje ograničavaju pomeranje kamene ispune i sprečavaju preterano ispučenje korpi prilikom punjenja.

Pozicioniranje i ugradnja kutijastih gabiona i gabionskih madraca pod vodom može se obaviti na razne načine: pomoću užadi, čeličnih ramovskih nosača, ili sa pontonskih platformi.



Slika 3.11: Ugradnja i ozelenjavanje kutijastih gabiona [137].

U slučaju izuzetno velikih brzina toka (ili zbog mogućeg vandalizma), kamena ispuna se može učvrstiti pomoću cementnog maltera ili bitumenskih mešavina. To se generalno ne preporučuje, jer previše veziva čini regulacione građevine isuviše krutim da bi se prilagodile deformacijama korita.

Vek regulacionih građevina od gabiona zavisi od održivosti žičanih korpi. One su izložene raznim mehaničkim oštećenjima i abraziji pod dejstvom vučenog nanosa. Zbog toga je važno da žica bude dobrog kvaliteta, po mogućstvu zaštićena plastičnom oblogom. Jedan od uzroka oštećenja gabiona može biti i usitnjavanje kamene ispune usled pomeranja kamena. Na Slici 3.12 prikazani su ostaci krune praga od gabiona, oštećenog udarom plivajućih balvana i panjeva u vreme prolaska poplavnog talasa na reci Velikoj Moravi.



Slika 3.12: Velika Morava: ostaci gabionskog madraca zgužvanog udarom balvana.

Treba napomenuti da elementi od sintetičkih materijala ne moraju da budu geometrijski pravilnog oblika. Vreće isunjene kamenom, pogodne su za popunjavanje proloka u rečnom koritu, jer mogu imati razne zapremine i lako se prilagođavaju obliku erozionih jama (Slika 3.13).



Slika 3.13: *Plastične („džambo“) vreće ispunjene kamenom i vrećasti gabioni.*

3.2.2.3 Beton i čelik

Beton se tradicionalno koristi u regulaciji reka na više načina: za izgradnju vertikalnih zidova kanala, za zaštitu obala u urbanim područjima, u elementima regulacionih građevina kao što su uporne grede, završni venci, ili kao vezivni materijal za kameni nabačaj, ispunu gabiona itd. Njegove prednosti su čvrstoća ($MB > 15 \div 30$), trajnost, otpornost na mnoge hemijske uticaje i prilagodljivost geometrijskim zahtevima. Beton lako odoleva povremenim brzinama toka i do 5 m/s. Poroznost betona mora biti mala da bi se smanjila opasnost od dejstva mraza. Za povećanje vodonepropusnosti betona koriste se aditivi. Mane su mu visoki troškovi, krutost koja nije povoljna kod obaloutvrda i to što se estetski ne uklapa u prirodni ambijent.

Čelik se relativno malo koristi u regulaciji reka, uglavnom u vidu čeličnih talpi za ojačanje nasipa i u vidu betonske armature. Osnovi nedostaci čelika su visoka cena i narušavanje ambijentalnih i ekoloških vrednosti.

3.3 Obaloutvrde

Obaloutvrde, kao što ime kaže, štite rečne obale od erozije izazvane velikom brzinom toka. Učvršćenjem obala, ove, najčešće primenjivane regulacione građevine, sprečavaju poprečnu migraciju meandera aluvijalnih vodotoka (KI-1.4).

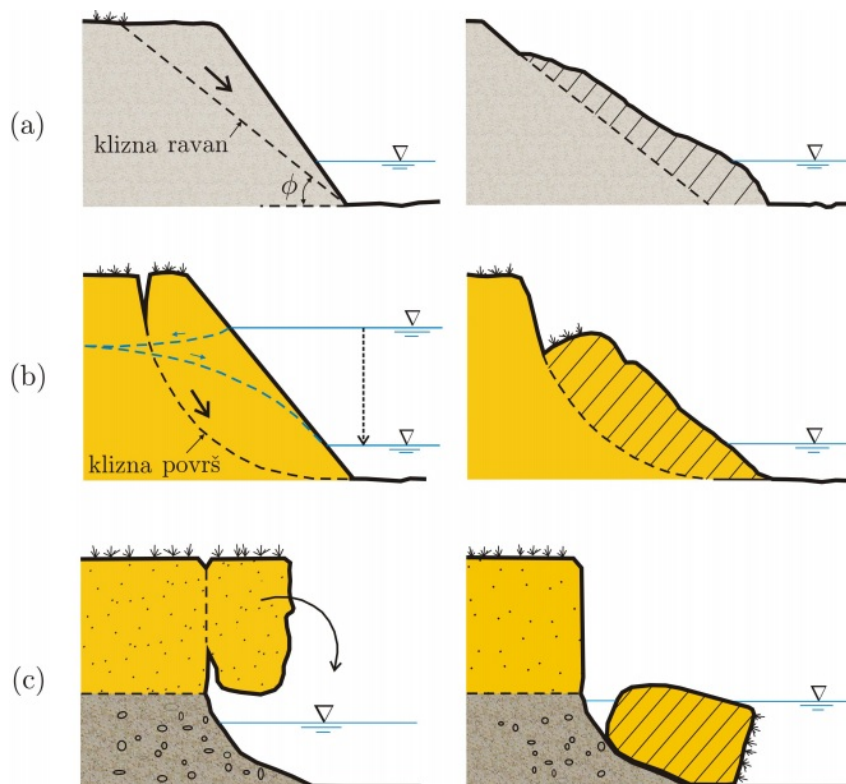
3.3.1 Stabilnost obala

Erozija obala je izražena u rečnim krivinama, gde sekundarno strujanje (KI-7.1) izaziva potkopavanje spoljašnje – konkavne obale i nagomilavanje erodiranog materijala u vidu spruda, duž unutrašnje – konveksne obale (KI-1.4.3). Primeri erozijom oštećenih obala prikazani su na Slici 3.14, a tri osnovna načina potkopavanja i rušenja obala shematski su prikazana na Slici 3.15.

Na brzinu rušenja obala presudno utiču hidraulički parametri – vrednost i trajanje protoka, intenzitet brzine i usmerenje toka. Kod bujičnih vodotoka, kratkotrajne poplave velikog intenziteta dovode do brzog rušenja obala, jer brzine toka mogu biti nekoliko redova veličine veće od onih u periodima srednjih i malih voda.



Slika 3.14: Erozijska obala na Dunavu, Velikoj Moravi i Vrbasu.



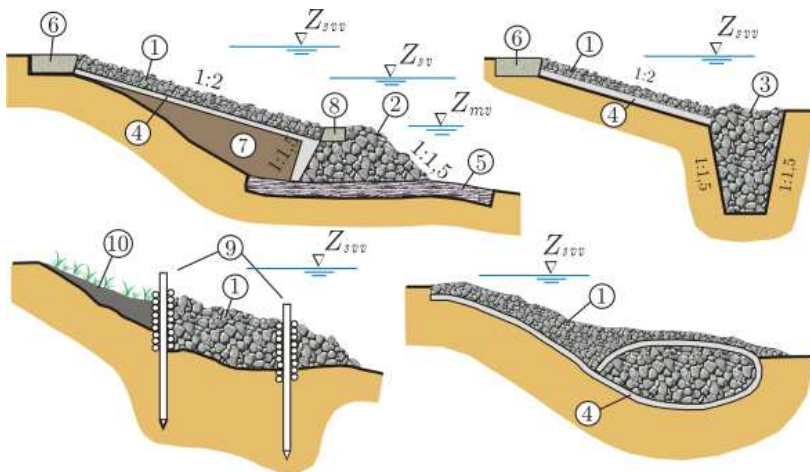
Slika 3.15: Mehanizmi rušenja obale: a - obrušavanje po kliznoj ravni je tipično za nevezana peskovito-šljunkovita tla i zaustavlja se uspostavljanjem ugla kosine koji približno odgovara uglu mirovanja; b - rotaciono obrušavanje homogenog koherentnog glinovitog tla, pod uticajem visokog nivoa podzemne vode i vodom ispunjenih pukotina; klizna površ može zaći u rečno korito; c - kod obala od slojevitog tla, erozijom donjih aluvijalnih (peskoviti) slojeva, gornji čvršći (glinoviti) slojevi ostaju bez oslonca, pa se blokovi smicanjem otkidaju i obrušavaju u rečno korito (prema [42, 132, 133]).

Stabilnost obala zavisi i od režima podzemnih voda, naročito od brzine promene nivoa. Strujanje podzemne vode ka reci kao recipientu, destabilizuje obale, a vegetacija ih učvršćuje. Naročito su nepovoljni dugi periodi niskih nivoa u reci, kada se u slojevitom vodopropusnom tlu lako stvaraju uslovi za formiranje strujnih cevi kroz koje se ispiraju čestice tla, što na kraju dovodi do rušenja obale.

Treba pomenuti i uticaj spoljašnjih faktora vezanih za ljudsku aktivnost, kao što su: urbanizacija, povećanje opterećenja obala, oscilacije nivoa usled rada hidroelektrana, talasanje izazvano prolaskom brodova i dr. U kojoj meri obale mogu da se prirodno odupru navedenim uticajima zavisi od geotehničkih osobina tla (videti Dodatke D2 i D3) i od stepena obraslosti vegetacijom.

3.3.2 Konstruktivni elementi obaloutvrda

Konstrukcija obaloutvrda može biti različita, pri čemu oblik i dimenzije pojedinih delova zavise od lokalnih hidrauličkih uslova i materijala izrade. Primera radi, na Slici 3.16 prikazani su konstruktivni elementi obaloutvrda od kamenog nabačaja.



Slika 3.16: Poprečni preseki tipičnih obaloutvrda od kamenog nabačaja: 1—obloga od kamenog nabačaja; 2—nasuta nožica od krupnog kamena; 3—ukupana nožica; 4—filter; 5—elastični temelj nožice (fašinski madrac); 6—završni venac; 7—zemljani balast za formiranje kosine; 8—uporna greda; 9—kolje sa popletom od vrbovog pruća; 10—travnati pokrivač na podlozi od humusa.

Za sve tipove obaloutvrda važe neka univerzalna pravila. Kota krune obaloutvrde je jednaka koti punog osnovnog korita (približno koti srednje velike vode Z_{svv}), dok je kota krune nasute nožice obično jednaka koti srednje male vode (Z_{mv}). Ugao koji kosina obloge zaklapa sa horizontalom treba da bude bar 5° blaži od ugla mirovanja/unutrašnjeg trenja osnovnog materijala obale. U praksi je taj nagib najčešće 1:2. Malim vodotocima sa uskim koritom prikladne su obaloutvrde sa ukopanom nožicom.

3.3.3 Obaloutvrde od kamena

Osnovni tipovi kamenih obloga su: kameni nabačaj, slagani kamen i kamen zaliven nekim vezivom (Slika 3.17).



Slika 3.17: Tipovi kamene obloge: a - kameni nabačaj; b - ručno slagani i uklapani kamen; c - kamen zaliven cementnim malterom; d - kamen zaliven bitumenskom mešavinom.

3.3.3.1 Obloge od kamenog nabačaja

U vangradskim područjima uobičajeno je da se primenjuje najjeftinija obloga od kamenog nabačaja. Kod ovog tipa obloge kameni komadi nisu vezani, već se pod uticajem rečnog toka mogu pomerati, što je naročito izraženo pri prolasku poplavnih talasa.

Kako bi se kontrolisale deformacije obaloutvrde i smanjili troškovi sanacije, potrebno je odrediti krupnoću kamena koji se neće pomeriti dok se ne ostvare neki (unapred definisani) kritični uslovi pokretanja. Pri definisanju tih uslova, uzima se u obzir stabilnost obloge i visina troškova njenog održavanja. Za dimenzionisanje kamenog nabačaja postoji više pristupa.

Metoda sila i kritičnog tangencijalnog napona. U prvoj knjizi je razmatrana stabilnost kamena na kosini obale (KI-9.2.5-Sl:9.7). Definisane su dve sile; jedna koja teži da pomeri kameni blok (R) i druga – sila trenja (T), koja se suprotstavlja pomeranju kamena:

$$R = \sqrt{G'^2 \sin^2 \alpha_s + F_x^2} = \sqrt{G'^2 \sin^2 \alpha_s + c_1^2 \tau_s^2} \quad (3.7)$$

$$T = G' \cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi', \quad (3.8)$$

gde je: α_s – ugao koji kosina zaklapa sa horizontalom, G' – težina kamenog komada pod vodom, F_x – komponenta vremenski osrednjene hidrodinamičke sile u pravcu toka (x), τ_s – tangencijalni (smičući) napon na kosini obale, c_1 – efektivna površina kamenog komada izloženog smicanju, ϕ – ugao unutrašnjeg trenja.

Faktor sigurnosti („koeficijent sigurnosti“) je količnik navedenih sila:

$$FS = \frac{T}{R} = \frac{G' \cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi'}{\sqrt{G'^2 \sin^2 \alpha_s + c_1^2 \tau_s^2}}. \quad (3.9)$$

Granično stanje ravnoteže kamenog komada na kosini razmatra se relativno u odnosu na početak njegovog pokretanja po *ravnom* dnu, što omogućava da se iz gornje jednačine eliminiše parametar c_1 .

Na ravnom dnu ($\alpha_s = 0$, $\cos \alpha_s = 1$, $\sin \alpha_s = 0$), u trenutku pokretanja kamenog komada je $FS = 1$, a vrednost tangencijalnog napona ($\tau_s \equiv \tau_o$) je dostigla kritičnu vrednost: $\tau_{oc} = 0,047 g (\rho_s - \rho) d_{50}$ (obrazac MPM, KI-10.3.2-(10.21)). Gustina nanosa ($\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$) i vode ($\rho = 1,0 \text{ t/m}^3$) su konstante. Sledi:

$$c_1 = \frac{G' \operatorname{tg} \phi'}{0,047 g (\rho_s - \rho) d_{50}}. \quad (3.10)$$

S druge strane je poznato da je veza tangencijalnog napona na kosini i na dnu:

$$\tau_s = k_2 \tau_o = k_2 \rho g h I_e, \quad (3.11)$$

gde je k_2 – faktor nagiba obale (KI-9.2.5-(9.56)):

$$k_2 = \cos \alpha_s \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_s}{\operatorname{tg}^2 \phi'}} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_s}{\sin^2 \phi'}}, \quad (3.12)$$

h – dubina toka, a I_e – nagib linije energije (u slučaju ustaljenog jednolikog tečenja jednak nagibu dna korita: $I_e = I_d$).

Ako se veličine c_1 iz (3.10) i τ_s iz (3.11) uvrste u (3.9) dobija se:

$$FS = \frac{G' \cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi'}{\sqrt{G'^2 \sin^2 \alpha_s + \left(\frac{G' \operatorname{tg} \phi' k_2 \rho g h I_e}{0,047 g (\rho_s - \rho) d_{50}} \right)^2}}. \quad (3.13)$$

Rešavanjem ove jednačine po krupnoći kamenog komada konačno se dobija:

$$d_{50} = \frac{k_2 h I_e \operatorname{tg} \phi'}{0,047 \Delta \sqrt{\left(\frac{\cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi'}{FS} \right)^2 - \sin^2 \alpha_s}} \quad (3.14)$$

gde je $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ – relativna gustina kamena.

Izraz (3.14) pokazuje da je rešenje moguće samo ako je ispunjen uslov:

$$\left(\frac{\cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi'}{FS} \right)^2 - \sin^2 \alpha_s > 0, \quad \text{odnosno: } \frac{\cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi'}{FS} > \sin \alpha_s.$$

Oдавде sledi da je *najveći nagib obaloutvrde*:

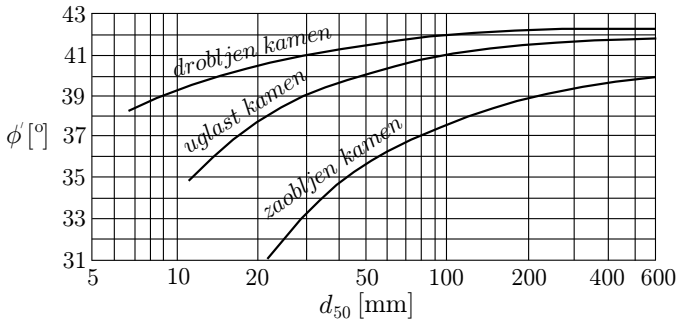
$$\alpha_{s,\max} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\operatorname{tg} \phi'}{FS} \right). \quad (3.15)$$

Ulazni podaci za proračun:

(1) *Karakteristike kamena.* Vrednosti gustine i ugla unutrašnjeg trenja su date u Tabeli 3.2 i na Slici 3.18. Za krupan kamen prečnika većeg od 100 mm je: $\phi' = 41^\circ \div 42^\circ$ (koeficijent trenja: $f = \text{tg } \phi' = 0,896 \div 0,900$).

Tabela 3.2: *Relativna gustina kamena*

Vrsta kamena	ρ_s/ρ [-]
Peščar	2,1 ÷ 2,4 (2,25)
Krečnjak	2,6 ÷ 2,7 (2,65)
Granit	2,5 ÷ 3,1 (2,80)
Bazalt	2,7 ÷ 3,2 (2,95)



Slika 3.18: *Ugao unutrašnjeg trenja kamena za obaloutvrde, prema [45].*

Tabela 3.3: *Vrednosti ugla unutrašnjeg trenja ϕ' [°]*

Zrnasto tlo	Oblik zrna		
d_{50} [mm]	zaobljen	zaobljen i uglast	uglast
< 1	30	≈ 33	33 ÷ 35
1 ÷ 10	30 ÷ 32	32 ÷ 36	33 ÷ 40
10 ÷ 100	32 ÷ 37	33 ÷ 40	≈ 40
Prašinasti pesak	27 ÷ 34		
Krupan šljunak i kamen	40 ÷ 45		

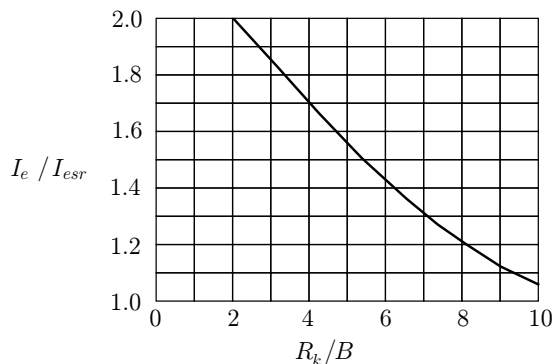
Tabela 3.4: *Karakteristične vrednosti nagiba kosina obaloutvrde*

1:m	1:1,5	1:2	1:2,5	1:3
α_s [°]	34	27	22	18,5
k_2 [-]	0,549	0,735	0,829	0,880

(2) *Obala.* U Tabeli 3.3 date su vrednosti ugla unutrašnjeg trenja tla, a u Tabeli 3.4, vrednosti nagiba kosine obaloutvrda koje se najčešće primenjuju u praksi. Date su i vrednosti faktora nagiba k_2 za ugao unutrašnjeg trenja $\phi' = 42^\circ$ ($f = 0,900$).

(3) *Hidrauličke veličine.* Dubina h i nagib linije energije I_e su podaci za proračun tangencijalnog napona. Kod korita trapeznog poprečnog preseka merodavna dubina na kosini je na mestu najvećeg smičućeg napona (na 1/3 visine od dna, KI-2.13-Sl:2.18). Kod korita nepravilnog poprečnog preseka, proračun treba obaviti za niz dubina, da bi se ustanovila zavisnost krupnoće d_{50} od dubine toka.

Nagib linije energije (I_e) je takođe rezultat hidrauličkog proračuna. Na pravolinijskim potezima se može koristiti osrednjeni nagib po deonicama I_{esr} , a za svaku krivinu se koristi lokalni nagib. Zbog savladavanja većih otpora (KI-7.1.7-Sl:7.7), u krivini je (pri istim uslovima) lokalni nagib (I_e) veći od osrednjenog nagiba pravolinijskih deonica (I_{esr}). Ova pojava je ispitivana i rezultat je empirijski dijagram na Slici 3.19.



Slika 3.19: Zavisnost nagiba linije energije u krivini od poprečnika krivine (do konkavne obale R_k) i širine korita (B).

Vrednosti I_e imaju veliki uticaj na rezultate proračuna. Jedna od osnovnih „slabih tačaka” opisane metode je upravo ovaj ulazni podatak, jer su veoma male vrednosti I_e podložne greškama, što može dovesti u pitanje pouzdanost rezultata proračuna.

(4) Faktor sigurnosti. Vrednost FS ($1,1 \div 1,5$) se usvaja iskustveno, imajući u vidu: pouzdanost ulaznih podataka, neizvesnost prirodnih uslova (turbulencije toka, vegetacije, kvaliteta kamena), način izvođenja radova i posledice oštećenja obaloutvrde.

■ **Primer 3.1.** Sračunati srednju krupnoću kamena obaloutvrde ako su dati sledeći ulazni podaci: (1) Kamen: $\Delta = 1,65$, $\phi' = 43^\circ$ ($\text{tg } \phi' = 0,9$), (2) Nagib kosine: 1:2 ($\alpha_s = 27^\circ$), (3) Parametri toka: $h = 8$ m, $I_{esr} = 0,002$, (4) $FS = 1,2$. Obaloutvrdom se štiti konkavna obala u krivini, $R_k/B = 7$.

Rešenje. Koristeći dijagram na Slici 3.19, određuje se nagib linije energije u krivini: $I_e = 0,002 \cdot 1,3 = 0,0026$. Na osovu izraza (3.12), (3.14) i (3.15) dobijaju se vrednosti: $k_2 = 0,735$; $d_{50} \approx 0,4$ i $\alpha_s = 36,9^\circ$.

Da bi se stekao uvid u međusobnu zavisnost promenljivih, proračun je ponovljen za više nagiba i dubina. Rezultati su dati u Tabeli 3.5.

Tabela 3.5: Sračunate krupnoće kamene obloge d_{50} [m] u funkciji nagiba obale i dubine toka

Dubina [m]	Nagib kosine 1:N											
	Min			(1:3)		(1:2,5)		(1:2)		(1:1,5)		Max
	Ugao kosine [°]											
	0,0	10,0	15,0	18,5	20,0	22,0	25,0	27,0	30,0	34,0	35,0	36,5
	Faktor k_2 [-]											
1,000	0,966	0,922	0,880	0,859	0,829	0,775	0,735	0,665	0,549	0,515	0,458	
1,0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,08	0,15
2,0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,15	0,30
3,0	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,16	0,20	0,23	0,46
4,0	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,21	0,27	0,31	0,61
5,0	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,27	0,33	0,39	0,76
6,0	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32	0,40	0,46	0,91
7,0	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,37	0,47	0,54	1,07
8,0	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,39	0,40	0,43	0,54	0,62	1,22
9,0	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43	0,45	0,48	0,60	0,70	1,37
10,0	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,48	0,50	0,53	0,67	0,77	1,52

Metoda kritične brzine. Za određivanje krupnoće kamena može se koristiti i izraz za kritičnu brzinu toka osrednjenu po dubini:

$$\tilde{u}_c = 5,75 \log \left(12 \frac{h}{k_s} \right) \sqrt{\Theta_c g \Delta d_{50}} ,$$

koji je izveden tako što je uspostavljena veza između kritične brzine koja deluje na kamen, logaritamskog rasporeda brzine po dubini i kritičnog tangencijalnog napona (KI-9.2.4-(9.51)). Kao u prethodnoj metodi, neophodno je da se parametar Θ_c (kritični bezdimenzioni tangencijalni napon, ili kritični Šildsov broj) koriguje faktorom k_2 .

Ako se apsolutna rapavost izrazi preko karakteristične krupnoće kamena: $k_s = 6,8 d_{50}$ (KI-2.6-Tab:2.1), može se konstatovati da se vrednosti logaritamske funkcije približno kreću od 1 do 1,5 (Tabela 3.6).

Tabela 3.6: Vrednosti logaritamske funkcije relativne rapavosti

h/d_{50}	20	10	5
$\log(12h/k_s) = \log(1,76 h/d_{50})$	1,54	1,24	0,94

Usvajajući srednju vrednost ove funkcije 1,2, vrednost parametara $k_2 = 0,75$ i broja $\Theta_c = 0,03$ (najmanja vrednost, da bi rezultat bio na strani sigurnosti), dobija se: $k_s \Theta_c \approx 0,02$, pa je:

$$\tilde{u}_c = 5,75 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{0,02} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2g \Delta d_{50}} \approx 0,7 \sqrt{2g \Delta d_{50}} , \quad (3.16)$$

odnosno: $d_{50} = 1,2 \tilde{u}_c^2 / (2g)$. U primeni ovog izraza, stvarnu brzinu toka (\tilde{u}) pri projektnom protoku treba izjednačiti sa kritičnom brzinom: $\tilde{u} = \tilde{u}_c$, pa konačno sledi:

$$\boxed{d_{50} = 1,2 \frac{\tilde{u}^2}{2g}} . \quad (3.17)$$

Izvodnjenje navednih formula za krupnoću kamena pokazuje da su izrazi za kritični tangencijalni napon i kritičnu brzinu toka uzajamno povezni, ali to ne znači da metoda zasnovana na kritičnom tangencijalnom naponu nužno daje istu krupnoću kamena kao metoda zasnovana na kritičnoj brzini.

U literaturi postoji veliki broj (prividno različitih) obrazaca za kritičnu brzinu pokretanja, ali se oni mogu svesti na dva osnovna oblika: $d = \text{const } V^2 / (2g)$, sa različitim (empirijskim) vrednostima konstante i različito definisanom brzinom V (srednjom profilskom, srednjom po dubini, lokalnom brzinom delovanja na kamen), ili na oblik: $d/h = \text{const } (V/\sqrt{g \Delta h})^m$, gde je veličina u zagradi neka vrsta Frudovog broja, a m – empirijski eksponent. Primera radi, u nastavku se navode dva, u svetu često primenjivana obrasca.

(1) Obrazac Escarameia i Meja (Escarameia, May, 1992) [42]:

$$d_{50} = \frac{C}{\Delta} \frac{u_d^2}{2g} \quad (3.18)$$

gde je: d_{50} – karakteristični prečnik kamena [m], jednak stranici ekvivalentne kocke (koja ima istu zapreminu i gustinu kao kamen), C – empirijski koeficijent koji uzima u obzir tip obloge i intenzitet turbulencije (Tabela 3.8), Δ – relativna gustina kamena, u_d – lokalna brzina toka koja deluje na kamen [m/s], na odstojanju od dna koje je jednako 10% dubine.

Empirijska veza između brzine u_d i srednje brzine po dubini (\tilde{u}) ima oblik:

$$u_d = \begin{cases} (-1,48 TI + 1,04) \tilde{u} & \text{za } TI \leq 0,5 \\ (-1,48 TI + 1,36) \tilde{u} & \text{za } TI > 0,5 \end{cases} \quad (3.19)$$

gde je: $TI = 0,12 \div 0,6$ – parametar koji ukazuje na veličinu fluktuacija brzine toka u odnosu na vremenski osrednjenu brzinu (Tabela 3.7).

Tabela 3.7: Vrednosti parametra TI u obrascu *Escarameia i Meja* [154].

TI	Intenzitet turbulencije	Lokacija
0,12	nizak	pravolinijske deonice, široko korito
0,20	umeren	završetak obaloutvrda
0,35 ÷ 0,50	srednje do visok	prelazne deonice, građevine u koritu
0,60	vrlo visok	nizvodno od slapišta i ispusta

Tabela 3.8: Vrednosti koeficijenta C u obrascu *Escarameia i Meja* [42].

Tip obaloutvrde	C	Oblast važnosti
Kameni nabačaj	$12,3 TI - 0,20$	$TI \geq 0,05$, najveći nagib 1:2
Betonski blokovi	$9,22 TI - 0,15$	$TI \geq 0,05$, najveći nagib 1:2,5
Gabionski madraci	$12,3 TI - 1,65$	$TI \geq 0,12$, najveći nagib 1:2

Uočiti da je obrazac (3.18) vrlo sličan obrascu (3.17) i da se u njemu eksplicitno ne javlja dubina toka; ona je indirektno uzeta u obzir preko računске brzine i parametra turbulencije, a isto važi i za zakrivljenost rečnog korita. U izrazu (3.18) je implicitno sadržan i određeni faktor sigurnosti, kroz vrednosti empirijskog koeficijenta C .

■ **Primer 3.2.** Koristeći ulazne podatke iz primera 3.1 sračunati srednji prečnik kamena obaloutvrde, ako je srednja brzina po vertikali $\tilde{u} = 2,8$ m/s. Pretpostaviti da je intenzitet turbulencije veoma visok: $TI = 0,6$. ($\Delta = 1,65$).

Rešenje. Na osnovu (3.19), projektna brzina toka je: $u_d = 1,32$ m/s. Kako je: $C = 12,3 TI - 0,2 = 7,18$, iz (3.18) sledi: $d_{50} = 0,39$ m, usvojeno 0,40 m.

(2) Obrazac Majnorda i dr. (Maynord et al, 1989) [154]:

$$\frac{d_{30}}{h} = KS C_s C_v C_T \left[\frac{u_d}{\sqrt{K_1 g \Delta h}} \right]^{2,5} \quad (3.20)$$

gde je: d_{30} – prečnik karakterističnog zrna od koga je težinski 30% sitnijih zrna [m], h – lokalna dubina iznad zrna [m], KS – koeficijent sigurnosti (1,1 ÷ 1,5), C_s – koeficijent stabilnosti kamena (0,30 za kamen nepravilnog oblika, 0,375 za zaobljen kamen), C_v – koeficijent rasporeda brzine čija veličina zavisi od krivudavosti korita i prisustva građevina (Tabela 3.9), C_T – koeficijent koji uzima u obzir debljinu obloge (1,0 u nedostatku podataka), Δ – relativna gustina kamena, g – gravitaciono ubrzanje (9,81 m/s²).

Tabela 3.9: Vrednosti koeficijenta C_v u metodi Majnorda i dr. [154].

C_v	Lokacija
1,0	pravolinijske deonice
1,283 – 0,2 log(R_{ko}/B)	krivine, ako je: $R_{ko}/B \leq 26$
1,0	krivine, ako je: $R_{ko}/B > 26$
1,25	nizvodno od betoniranog korita
1,25	na završetku građevina

U Tabeli 3.9 je: R_{ko} – centralni poluprečnik krivine [m] (do osovine toka), a B – širina vodnog ogledala neposredno uzvodno od krivine [m]. Napominje se da su vrednosti empirijskih koeficijenata C_s i C_v utvrđene za obloge od kamena čija je neuniformnosti granulometrijskog sastava u opsegu:

$$\frac{d_{85}}{d_{15}} = 1,5 \div 5,2. \quad (3.21)$$

Projektna brzina toka (u_d) definisana je kao brzina na 20% dubine iznad dna i njena veza sa srednjom profilskom brzinom (V) je data empirijskim obrascem:

$$u_d = \begin{cases} V (1,74 - 0,52 \log(R_{ko}/B)) & \text{- prirodna korita} \\ V (1,74 - 0,78 \log(R_{ko}/B)) & \text{- kanali trapeznog preseka} \end{cases} \quad (3.22)$$

Parametar K_1 uzima u obzir kosinu obaloutvrde i definisan je empirijskim izrazom:

$$K_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha_s - 14^\circ}{\sin 32^\circ} \right)^{1,6}}, \quad (3.23)$$

gde je: α_s – ugao koji kosina obale zaklapa sa horizontalom.

Veza između karakterističnih krupnoća d_{30} i d_{50} može se uspostaviti tako da bude zadovoljen uslov (3.21):

$$d_{50} = (1,2 \div 1,4) d_{30}. \quad (3.24)$$

Obrazac (3.20) ne može se primeniti za strme bujične tokove sa uzdužnim nagibom dna koji su veći od 2%. Kada se sračunaju karakteristični prečnici d_{30} i d_{50} , definiše se granulometrijska kriva kamene obloge.

■ **Primer 3.3.** Koristeći ulazne podatke iz primera 3.1 sračunati srednju krupnoću kamena obaloutvrde kojom se štiti konkavna obala u krivini ($R_{ko}/B = 7$). Ugao koji kosina obale zaklapa sa horizontalom iznosi: $\alpha_s = 27^\circ$ (nagib 1:2). Gustina kamena je: $\Delta = 1,65$. Srednja profilska brzina je $V = 2,8$ m/s, a lokalna dubina $h = 8$ m.

Rešenje. Usvojaju se vrednosti: $FS = 1,2$; $C_s = 0,36$ (oblik kamena) i $C_T = 1,0$. Pomoću izraza (3.23) računa se vrednost $K_1 = 0,864$. Iz Tabele 3.9 se usvaja vrednost $C_v = 1,11$. Na osnovu izraza (3.22) i (3.20) sledi: $u_d = 3,64$ m/s i $d_{30} = 0,27$ m, a iz uslova: $d_{50} = 1,4 d_{30} = 0,37$ m, usvojeno 0,40 m.

Primeri 3.1, 3.2 i 3.3 pokazuju da primenjeni obrasci daju približno iste rezultate. Međutim, u praksi je to pre izuzetak nego pravilo, pa je uputno primeniti više metoda, uporediti dobijene rezultate, pa na osnovu inženjerske procene usvojiti konačnu vrednost.

Granulometrijski sastav kamenog nabačaja. Kada se odredi srednji prečnik d_{50} , može se definisati *projektni* granulometrijski sastav kamenog nabačaja, koristeći preporuke [133]:

$$\boxed{\frac{\min d_{50}^K}{d_{50}} \geq 1; \quad \frac{\max d_{50}^K}{\min d_{50}} \leq 5; \quad \frac{\min d_{100}^K}{\min d_{50}} \geq 2; \quad \frac{\max d_{100}^K}{\min d_{50}} \leq 5; \quad \frac{\max d_{100}^K}{\min d_{15}} \leq 16} \quad (3.25)$$

ili, alternativno, još određenije preporuke [154]:

$$\left. \begin{array}{l} \min d_{10}^K = 0,58 d_{50}; \quad \max d_{10}^K = 0,84 d_{50}; \\ \min d_{15}^K = 0,61 d_{50}; \quad \max d_{15}^K = 0,87 d_{50}; \\ \min d_{50}^K = 0,95 d_{50}; \quad \max d_{50}^K = 1,15 d_{50}; \\ \min d_{60}^K = 1,05 d_{50}; \quad \max d_{60}^K = 1,25 d_{50}; \\ \min d_{85}^K = 1,30 d_{50}; \quad \max d_{85}^K = 1,54 d_{50}; \\ \max d_{100}^K = 2,0 d_{50}; \end{array} \right\} \quad (3.26)$$

gde se oznaka „K” odnosi na kameni nabačaj. Potrebna masa kamena može se odrediti pretpostavljajući oblik kamenog komada, kao što pokazuju izrazi (3.27).

$$M^K = \begin{cases} \rho_s d^3 \pi / 6 & = 0,52 \rho_s d^3 & - \text{ lopta} \\ \rho_s (d^3 \pi / 6 + d^3) / 2 & = 0,76 \rho_s d^3 & - \text{ nepravilan oblik} \\ \rho_s d^3 & = 1,00 \rho_s d^3 & - \text{ kocka.} \end{cases} \quad (3.27)$$

Može se konstativati da je $M^K = (0,52 \div 1,00) \rho_s d^3$, pri čemu se (kao što se formira granulometrijska kriva), može formirati kriva distribucije mase kamenog nabačaja – po frakcijama. Prema literaturi [154] se preporučuje:

$$d_{85}^K / d_{15}^K = 1,5 \div 2,5; \quad M_{85}^K / M_{15}^K = 3,5 \div 16. \quad (3.28)$$

■ **Primer 3.4.** Ako je srednja krupnoća kamena $d_{50} = 0,4$ m, definisati odgovarajuću granulometrijsku krivu kamenog nabačaja. Proveriti uniformnost krupnoće kamena i njegove mase, ako je u pitanju krečnjak ($\rho_s = 2,65$ t/m³). Oblik kamena je nepravilan.

Rešenje. Prema (3.26), za $d_{50} = 0,4$ m, projektovani granulometrijski sastav obloge od kamenog nabačaja ima sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned} \min d_{10}^K &= 0,23 \text{ m}; & \max d_{10}^K &= 0,34 \text{ m}; & \text{usvojeno: } d_{10}^K &= 0,25 \text{ m}; & M_{10} &= 31 \text{ kg} \\ \min d_{15}^K &= 0,24 \text{ m}; & \max d_{15}^K &= 0,35 \text{ m}; & \text{usvojeno: } d_{15}^K &= 0,30 \text{ m}; & M_{15} &= 54 \text{ kg} \\ \min d_{50}^K &= 0,38 \text{ m}; & \max d_{50}^K &= 0,46 \text{ m}; & \text{usvojeno: } d_{50}^K &= 0,40 \text{ m}; & M_{50} &= 129 \text{ kg} \\ \min d_{60}^K &= 0,42 \text{ m}; & \max d_{60}^K &= 0,50 \text{ m}; & \text{usvojeno: } d_{60}^K &= 0,45 \text{ m}; & M_{60} &= 184 \text{ kg} \\ \min d_{85}^K &= 0,52 \text{ m}; & \max d_{85}^K &= 0,62 \text{ m}; & \text{usvojeno: } d_{85}^K &= 0,60 \text{ m}; & M_{85} &= 435 \text{ kg} \\ \max d_{100}^K &= 0,80 \text{ m}; & & & \text{usvojeno: } d_{100}^K &= 0,80 \text{ m}; & M_{100} &= 1031 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$d_{85}^K / d_{15}^K = 0,60 / 0,30 = 2,0 \text{ i } M_{85}^K / M_{15}^K = 435 / 54 = 8.$$

Da bi se ubrzao postupak, u literaturi [154] su date granične karakteristične krupnoće kamena za 10 klasa. Potrebno je samo pronaći kojoj klasi pripada sračunati prečnik d_{50} (prema najbližoj vrednosti medijane) i iz Tabele 3.10 očitati odgovarajuće najmanje i najveće dozvoljene vrednosti ostalih karakterističnih krupnoća ($\min d_{15}^K, \max d_{15}^K, \dots$ itd.). Zatim se pomoću (3.27) mogu odrediti i odgovarajuće najmanje i najveće dozvoljene mase kamena.

Stohastički pristup dimenzionisanju kamenog nabačaja. U svetu se uočava veliki upliv probablističkog pristupa u rešavanju hidrotehničkih problema koji su se tradicionalno rešavali pomoću determinističkih (pretežno empirijskih) obrazaca. U ovom slučaju, ideja je da se stepen potencijalnog oštećenja, procentualno izražen brojem odnetih kamenih komada u odnosu na ukupan broj ugrađenih komada, uzme kao osnova za vrednovanje održivosti projektovane ili postojeće obloge od kamenog nabačaja [53].

Upoređenjem sračunatog stepena potencijalnog oštećenja sa unapred usvojenim stepenom *dozvoljenog* oštećenja, donosi se odluka o prihvatljivosti razmatrane obaloutvrde sa stanovišta potencijalnih troškova njenog održavanja.

Tabela 3.10: *Dozvoljene granične krupnoće kamenog nabačaja, prema [154].*

Klasa	medijana [m]	$\min d_{15}^K$ [m]	$\max d_{15}^K$ [m]	$\min d_{50}^K$ [m]	$\max d_{50}^K$ [m]	$\min d_{85}^K$ [m]	$\max d_{85}^K$ [m]	$\max d_{100}^K$ [m]
I	0,15	0,09	0,13	0,14	0,18	0,20	0,23	0,30
II	0,23	0,14	0,20	0,22	0,27	0,29	0,36	0,46
III	0,30	0,19	0,27	0,29	0,36	0,39	0,47	0,61
IV	0,38	0,23	0,33	0,37	0,44	0,50	0,58	0,76
V	0,46	0,28	0,39	0,43	0,52	0,60	0,70	0,91
VI	0,53	0,33	0,47	0,51	0,61	0,70	0,83	1,07
VII	0,61	0,37	0,53	0,58	0,70	0,79	0,94	1,22
VIII	0,76	0,47	0,66	0,72	0,88	0,99	1,17	1,52
IX	0,91	0,56	0,80	0,86	1,05	1,19	1,41	1,83
X	1,07	0,65	0,93	1,02	1,23	1,38	1,64	2,13

Ne ulazeći u sve detalje metodologije koja je opisana u literaturi [53], ovde se navode samo ključni elementi računске procedure.

Polazi se od toga da je kameni nabačaj *mešavina* kamenih komada i da se njegova granulometrijska kriva može podeliti na najmanje 10 frakcija, pri čemu svaka frakcija ima reprezentativni prečnik d i zastupljenost Δp . Ključni parametar računskog modela je *ugao pokretanja*, čija se vrednost može proceniti pomoću empirijskog izraza:

$$\phi = 35 + 46,5 \left(\frac{d}{d_{50}} \right) \sigma_g^{-0,63} \quad (3.29)$$

gde je: d_{50} – srednja krupnoća kamena, a $\sigma_g = \sqrt{d_{85}/d_{15}}$ – geometrijska standardna devijacija (analogna onoj kod log-normalne raspodele krupnoće nanosa, KI-8.2.2.1-(8.28)). (Ograničenje za primenu metode je: $\sigma_g \leq 4$.)

Ugao pokretanja je bitan faktor u definisanju tangencijalnog napona na kosini τ_s . Veza tog napona i napona na dnu je: $\tau_s = k_2 \tau_o$, gde je korekcionni faktor, kao što je ranije već navedeno, dat u funkciji ugla koji kosina zaklapa sa horizontalom α_s (3.12) i (KI-9.2.5-(9.56)):

$$k_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_s}{\sin^2 \phi}}.$$

U oblasti razvijenog turbulentnog toka po hidraulički rapavom dnu, sve veličine, uključujući kritičan Šildsov broj Θ_c , imaju *slučajan* karakter, sa određenom verovatnoćom². Ispitujući u laboratorijskom kanalu pokretanje velikog broja kamenih komada raznih veličina, postavljenih *na ravnom dnu*, autori modela predloženog u literaturi [53] su ustanovili da se verovatnoća realizacije kritičnog Šildsovog broja

²To se vidi po „rasipanju” tačaka u oblasti visokih Re_* brojeva na Šildsovom dijagramu (KI-9.2.2-SI:9.2)).

može definisati teorijskom dvoparametarskom Veibulovom (Weibull) raspodelom³:

$$F(\Theta_c) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\Theta_c}{\Theta_c^M} \right)^\beta \right], \quad (3.30)$$

gde je: Θ_c^M – bezimenzioni tangencijalni napon (Šildsov broj) pri najvećoj učestalosti pokretanja kamenih komada (mod na dijagramu gustine raspodele), a β – parametar oblika funkcije gustine raspodele ($1/\beta$ je mera disperzije).

Empirijski izrazi za parametre ovog modela imaju oblik:

$$\Theta_c^M = 0,056 + \exp \left[1,73 - 2,68 \left(\frac{d}{d_{50}} \right) - 0,177 \sigma_g \right] \quad (3.31)$$

$$\beta = 1,59 + 1,61 \left(\frac{d}{d_{50}} \right) - 0,208 \sigma_g. \quad (3.32)$$

Sa vrednostima parametara Θ_c^M i β može se pomoću izraza (3.30) izračunati verovatnoća pokretanja reprezentativnog zrna svake frakcije, koja se množi odgovarajućom zastupljenošću: $F(\Theta_c) \Delta p$. Zatim se računa kumulativna verovatnoća pokretanja za sve frakcije. Ako je ova kumulativna vrednost (izražena u %) manja od vrednosti prihvatljivog, dozvoljenog stepena oštećenja, obloga od kamenog nabačaja je dobro dimenzionisana; u protivnom, nužne su korekcije u pravcu povećanja vrednosti d_{50} i/ili smanjenja vrednosti σ_g .

Računski algoritam:

(1) Odrediti relevantne hidrauličke veličine pri projektnom protoku: dubinu u podnožju obaloutvrde h i odgovarajuću srednju brzinu po dubini \tilde{u} .

(2) Sračunati vrednost tangencijalnog napona na kosini obaloutvrde $\tau_s(0,8h) = \rho g(0,8h) I_e$, ili, primenom Manningovog obrasca: $\tau_s = \rho g n^2 \tilde{u}^2 / (0,8h)^{1/3}$, gde je koeficijent rapavosti: $n = d_{50}^{1/6} / 21$ (KI-3.2-(3.23)), $\rho = 1 \text{ t/m}^3$ i $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

(3) Definirati osnovne parametre granulometrijskog sastava projektovanog ili postojećeg kamenog nabačaja: d_{50} i $\sigma_g = \sqrt{d_{85}/d_{15}}$. (Usvaja se $\Delta = 1,65$).

(4) Podeliti granulometrijski sastav na najmanje 10 klasnih intervala ili frakcija. Definirati zastupljenost svake frakcije Δp_i i reprezentativni prečnik d_i ($i = 1 \div 10$).

Za svaku frakciju ($i = 1 \div 10$):

(5) Pomoću izraza (3.29) sračunati vrednost ugla pokretanja: $\phi_i = \phi(d_i)$.

³Ovaj tip teorijske raspodele se često koristi u teoriji pouzdanosti; recimo opisuje srednje vreme do otkaza nekog uređaja, ili prosečan vek trajanja električnih aparata. U tom smislu, pokretanja kamena obaloutvrde se može shvatiti kao „otkaz” stabilnosti.

(6) Pomoću izraza (3.31) i (3.32) sračunati vrednosti parametara Veibulove raspodele: $\Theta_{c,i}^M = \Theta_c^M(d_i)$ i $\beta_i = \beta(d_i)$.

(7) Pomoću izraza (3.4) sračunati vrednost korekcionog faktora: $k_{2,i} = k_2(d_i)$.

(8) Odrediti tangencijalni napon na dnu: $\tau_{o,i} = \tau_s/k_{2,i}$, koji je merodavan za proračun Šildsovog broja: $\Theta_i = \tau_{o,i}/g \Delta d_i$. Za pokrenute kamene komade, ovo je *kritični* Šildsov broj, $\Theta_i \equiv \Theta_{c,i}$. Ako je kamen nepravilnog, uglastog oblika, teže se pokreće, pa vrednosti $\Theta_{c,i}$ treba povećati za 20% (pomnožiti faktorom 1,2).

(9) Pomoću izraza (3.30) sračunati verovatnoću pokretanja $F(\Theta_{c,i})$.

(10) Sračunati verovatnoću pokretanja svih frakcija: $\sum_{i=1}^{10} F(\Theta_{c,i} \Delta p_i)$. Ovaj broj predstavlja ukupni broj pokrenutih kamenih komada u odnosu na sve komade obloge. Izražen u procentima, predstavlja „stepen oštećenja” obloge pri datom tangencijalnom naponu τ_s .

(11) Ako je dobijeni stepen oštećenja manji od unapred zadatog („dozvoljenog”) stepena oštećenja, proračun se obustavlja i konstatuje da data granulometrija ispunjava postavljeni zahtev. U protivnom, treba korigovati granulometriju (vrednosti parametara d_{50} i σ_g) i ponoviti postupak od koraka (3).

Za primenu opisane metode, neophodno je poznavanje veze između lokalne brzine u blizini obale (\tilde{u}) i srednje profilske brzine (V) u krivini. Tu vezu definiše empirijski obrazac [229]:

$$\tilde{u} = V \left[1,74 - 0,52 \log \left(\frac{R_{ko}}{B} \right) \right] \quad (3.33)$$

gde je: R_{ko} – centralni poluprečnik krivine (u odnosu na osovinu toka), a B – širina vodnog ogleдалa.

■ **Primer 3.5.** Ispitati održivost postojeće obaloutvrde od kamenog nabačaja, koja se nalazi u krivini centralnog poluprečnika $R_{ko} = 420$ m. Pri merodavnom protoku, širina vodnog ogleдалa iznosi $B = 60$ m, a srednja profilska brzina, $V = 2,16$ m/s. Dubina u podnožju obaloutvrde iznosi $h=8$ m. Ugao kosine iznosi 27° .

Granulometrijska kriva je podeljena na 10 klasa (prve dve kolone Tabele 3.11). Parametri ove granulometrije su: $d_{50} = 0,4$ m i $\sigma_g = 1,41$. Kamen je nepravilnog, uglastog oblika ($\Delta = 1,65$). Dozvoljeni stepen oštećenja: 10%.

Rešenje. Izraz (3.33) daje vrednost srednje brzine po vertikali: $\tilde{u} = 3,61$ m/s. Ova brzina odgovara dubini $0,8h = 0,8 \cdot 8 = 6,4$ m i merodavna je proveru stabilnosti kamenog nabačaja. U Tabeli 3.11 su dati rezultati proračuna.

Može se konstatovati da je ukupno pokrenutih zrna oko 2%, što znači da je stepen potencijalnog oštećenja manji od dozvoljenog (10%) i da će troškovi sanacije biti u prihvatljivim granicama.

Tabela 3.11: Rezultati proračuna u primeru 3.5

i [-]	d [m]	Δp [-]	ϕ [°]	Θ_c^M [-]	β [-]	k_2 [-]	τ_o [kPa]	Θ_c [-]	$F(\Theta_c)$ [-]	$F \cdot \Delta p$ [-]
1	0,25	0,10	90,00	0,88	1,40	0,891	0,129	0,027	0,008	0,0008
2	0,30	0,10	90,00	0,64	1,42	0,891	0,129	0,027	0,011	0,0011
3	0,32	0,10	81,81	0,57	1,43	0,890	0,129	0,025	0,011	0,0011
4	0,35	0,10	77,80	0,48	1,44	0,888	0,130	0,023	0,013	0,0013
5	0,40	0,10	72,45	0,36	1,46	0,885	0,130	0,020	0,015	0,0015
6	0,45	0,10	68,29	0,27	1,48	0,882	0,130	0,018	0,018	0,0018
7	0,50	0,10	64,96	0,21	1,50	0,879	0,131	0,016	0,021	0,0021
8	0,60	0,10	59,97	0,13	1,54	0,873	0,132	0,014	0,029	0,0029
9	0,70	0,10	56,40	0,10	1,58	0,867	0,133	0,012	0,035	0,0035
10	0,80	0,10	53,72	0,08	1,62	0,863	0,133	0,010	0,038	0,0038
$\Sigma:$										0,0198

Debljina obloge od kamenog nabačaja. Preporuka je da debljina obloge od kamenog nabačaja ne sme biti manja od: $D_o = 1,5 d_{100}$.

3.3.3.2 Filtri

Pri naglom opadanju nivoa vode u reci, nivo podzemne vode u zaleđu obaloutvrde ostaje na višoj koti, pa se uspostavlja filtracioni tok ka reci kao recipijentu. Uloga filtra je da omogući nesmetan prolaz podzemne vode kroz oblogu ka reci, a da pri tome spreči odnošenje čestica tla iz obale.

Filtri su od ključne važnosti za stabilnost obaloutvrda. Izrađuju se od prirodnog materijala – peska i šljunka, ili od veštačkog materijala – geotekstila. Moguće su i kombinacije ovih materijala (kompozitni filtri).

Peščani filtri. Filtri od peščanog i šljunčanog materijala imaju tako projektovan granulometrijski sastav da spreče ispiranje čestica osnovnog tla (iz obale) i stvaranje velikih šupljina (kaverni) u tlu koje destabilizuju obalu. Sličnu ulogu imaju i *drenaže*, koje se koriste za smanjenje filtracionog pritiska. U nastavku se prikazuje metodologija za projektovanje filtara i drenaža, preuzeta iz tehničkih standarda [233, 249]. Neka pravila su sadržana i u našim standardima [219]. U empirijskom određivanju granulometrijskog sastava filtra, sve krupnoće zrna su izražene preko prečnika *standarnih* otvora sita (Dodatak D1).

Polazi se od činjenice da je teško precizno komponovati i ugraditi jednu određenu granulometriju filterarskog materijala. Zbog toga se projektuje granulometrijski „pojas” unutar koga sve granulometrijske krive zadovoljavaju postavljene uslove, a bilo koja od njih se može proglasiti „projektnom” krivom. Širinu granulometrijskog pojasa određuju karakteristične krupnoće zrna $\min d_{15}^F, \max d_{15}^F, \min d_{60}^F, \max d_{60}^F$ itd., pri čemu se prefiks „min” odnosi na levu granicu pojasa (sitnijeg materijala), a prefiks „max”, na desnu granicu (krupnijeg materijala).

Procedura:

- (1) Nacrtati granulometrijsku krivu (KI-8.2.2.1-Sl:8.6) osnovnog tla (obale).
- (2) Ako osnovno tlo ne sadrži čestice krupnije od 4,75 mm (šljunak), prelazi se odmah na korak (4).
- (3) Ako osnovno tlo sadrži čestice krupnije od 4,75 mm, potrebno je korigovati granulometriju tako da se iz razmatranja izostave sve krupnoće iznad 4,75 mm (videti Primer 3.6).
- (4) Sa originalne ili korigovane granulometrijske krive osnovnog tla očitava se procentualno učešće čestica sitnijih od 0,075 mm. Ovaj podatak služi da se osnovno tlo svrsta u jednu od kategorija datih u Tabeli 3.12.

Tabela 3.12: *Klasifikacija osnovnog tla* [233]

Kategorija osnovnog tla	Opis osnovnog tla	% čestica sitnijih od 0,075 mm
1	glina i fina prašina	> 85
2	glina, prašina, pesak, glinoviti i prašinski pesak	40 ÷ 85
3	glinoviti i prašinski pesak i šljunak	15 ÷ 39
4	pesak i šljunak	< 15

- (5) *Prvi kriterijum filtracije.* Koriste se preporuke za najveću dozvoljenu krupnoću zrna $\max d_{15}^F$ (Tabela 3.13). Tačka $\max d_{15}^F$ na dijagramu granulometriskog sastava označava se kao kontrolna tačka KT1.

Tabela 3.13: *Kriterijum filtracije* [233]

Kategorija osnovnog tla	$\max d_{15}^F$
1	$\leq 9 d_{85}^O$ ($\geq 0,2$ mm)
2	$\leq 0,7$ mm
3	$\leq [(40 - A)/(40 - 15)] (4 d_{85}^O - 0,7 \text{ mm}) + 0,7$ mm
4	$\leq 4 d_{85}^O$
	* Krupnoća d_{85}^O se očitava sa (korigovane) granulom. krive; * A – % prolaska kroz sito otvora 0,075 mm; (ako je $4 d_{85}^O < 0,7$ mm, usvojiti 0,7 mm).

- (6) *Drugi kriterijum filtracije.* Za ocenu permeabilnosti (vodopropustljivosti) koristi se i krupnoća $\min d_{15}^F$:

$$\min d_{15}^F \geq 4 d_{15}^O \quad (\geq 0,1 \text{ mm}), \quad (3.34)$$

pri čemu je d_{15}^O – krupnoća osnovnog materijala zastupljenosti 15%, očitana sa originalne granulometrijske krive (pre njene eventualne korekcije).

Izraz (3.34) se može primeniti na sve vrste osnovnog materijala (1–4 u Tabeli 3.12). Tačka $\min d_{15}^F$ na krivoj granulometrijskog sastava označava se kao kontrolna tačka KT2.

(7) *Kriterijum širine granulometrijskog pojasa* primenjuje se na sve frakcije sa procentom prolaska $\leq 60\%$; za frakciju 15% biće:

$$\frac{\max d_{15}^F}{\min d_{15}^F} \leq 5. \quad (3.35)$$

U slučaju da uslov (3.35) nije zadovoljen, nužna je korekcija; ako je primarna funkcija filtarska, zadržava se vrednost $\min d_{15}^F$ (KT2), a koriguje se $\max d_{15}^F = \min d_{15}^F/5$ (KT1). Ako je primarna funkcija drenažna, postupa se obrnuto, koriguje se $\min d_{15}^F = \max d_{15}^F/5$ (KT2), a zadržava se $\max d_{15}^F$ (KT1).

(8) *Kriterijum uniformnosti sastava* treba da osigura što pravilniji oblik graničnih granulometrijskih krivih, kroz uslov za koeficijent uniformnosti:

$$\frac{\max d_{60}^F}{\max d_{10}^F} \leq 6. \quad (3.36)$$

Krupnoća $\max d_{10}^F$ može se dobiti kao: $\max d_{10}^F = \max d_{15}^F/1,2$, pri čemu faktor 1,2 proizilazi iz pretpostavke da nagib prave koja povezuje tačke $\max d_{10}^F$ i $\max d_{15}^F$ obezbeđuje vrednost koeficijenta uniformnosti od oko 6. Iz uslova (3.36) sledi: $\max d_{60}^F = 6 \max d_{10}^F$ (KT3), a iz uslova u koraku (7): $\min d_{60}^F = \max d_{60}^F/5$ (KT4).

(9) *Kriterijum najmanjeg i najvećeg zrna* (važi za sve kategorije osnovnog tla): $\min d_5^F = 0,075$ mm (KT5) i $\max d_{100}^F = 75$ mm (KT6).

(10) *Kriterijum sprečavanja segregacije* (važi za sve kategorije osnovnog tla), služi da se mogućnost segregacije (razdvajanje zrna po krupnoći) tokom ugradnje filtra svede na najmanju meru. Za krupnoću $\min d_{10}^F = \min d_{15}^F/1,2$ iz Tabele 3.14 očitava se vrednost $\max d_{90}^F$ (KT7).

Tabela 3.14: *Kriterijum sprečavanja segregacije zrna* [233]

$\min d_{10}^F$ [mm]	< 0,5	0,5÷1,0	1,0÷2,0	2,0÷5,0	5,0÷10,0	> 10
$\max d_{90}^F$ [mm]	20	25	30	40	50	60

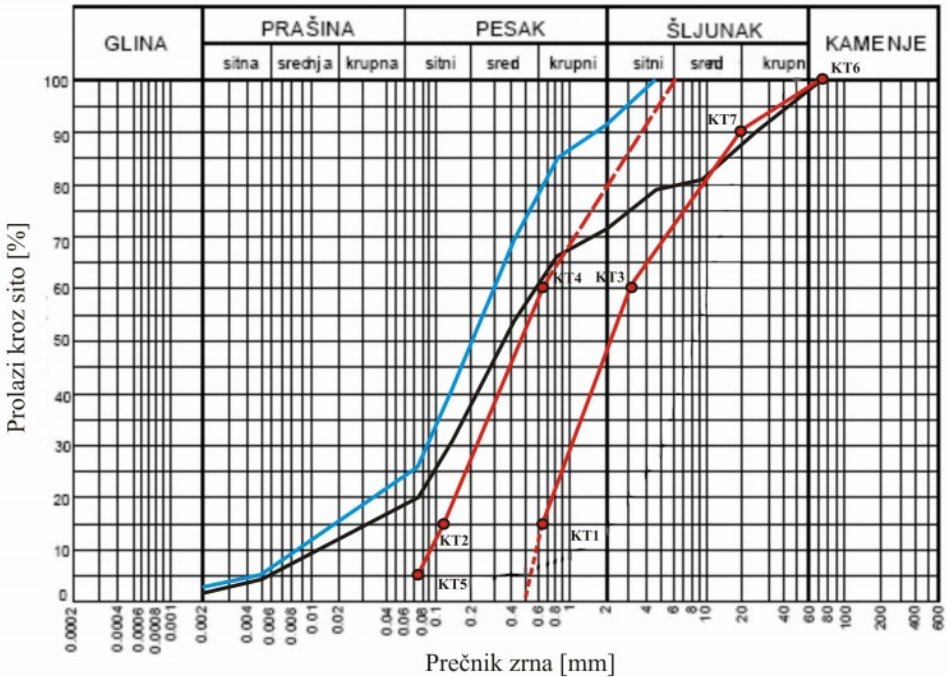
(11) Povezivanjem tačaka KT2, KT4 i KT5 dobija se leva granična kriva granulometrijskog pojasa, koja definiše najsitniji filtarski materijal. Povezivanjem tačaka KT1, KT3, KT6 i KT7 dobija se desna granična kriva koja definiše najkrupniji filterski materijal. Obe krive se ekstrapoluju naviše do 100%, odnosno naniže koliko god je moguće, sa završetkom na krupnoćama koje odgovaraju prečnicima standardnih otvora sita (Dodatak D1). Granulometrijska kriva filtarskog materijala koji će se ugraditi treba da bude između ovako definisanih graničnih krivih.

■ **Primer 3.6.** Projektovati filtar za osnovno tlo čiji je granulometrijski sastav dat u Tabeli 3.15.

Tabela 3.15: *Granulometrijska kriva osnovnog tla* [233].

Otvor sита [mm]	75	25	9,5	4,75	2,00	0,85	0,425	0,150	0,075	0,005	0,002
% prolaska	100	90	82	78	72	66	54	32	20	4	2

Rešenje. Rezultati slede iz prethodno opisanih koraka.



Slika 3.20: *Granulometrijske krive: osnovnog tla (crna), korigovana kriva (plava); krive najsitnijeg i najkrupnijeg filtarskog materijala (crvena); isprekidana: ekstrapolacija do standardnog otvora sита.*

(1)–(4) Crta se granulometrijska kriva osnovnog tla (Slika 3.20). Razmatra se samo 78% zrna sitnijih od 4,75 mm, dok se krupnija zrna ne uzimaju u obzir. Formira se „korigovana granulometrijska kriva” (Slika 3.20) tako što se procenti prolaska zrna sitnijih od 4,75 mm množe faktorom: $100/78 = 1,28$ (Tabela 3.16).

Tabela 3.16: *Korigovana granulometrijska kriva osnovnog tla*

Otvor sита [mm]	75	25	9,5	4,75	2,00	0,85	0,425	0,150	0,075	0,005	0,002
% prolaska	-	-	-	100	92	85	69	41	26	5	3

(4)–(5) Prema korigovanoj granulometriji, zastupljenost čestica $\leq 0,075$ mm iznosi 26%. Podaci iz Tabele 3.12 pokazuju da je osnovno tlo u kategoriji 3: „glinoviti i prašinsti pesak i šljunak”. Prvi kriterijum filtracije za ovu vrstu tla daje: $\max d_{15}^F = 2,2$ mm ($A = 26\%$, Tabela 3.13).

(6) Drugi kriterijum filtracije (permeabilnosti): $\min d_{15}^F \geq 4 d_{15}^O$ daje: $\min d_{15}^F \approx 0,13$ mm ($> 0,1$ mm), pri čemu se vrednost d_{15}^O (0,032 mm) očitava sa originalne (a ne sa korigovane) granulometrijske krive.

(7) Kriterijum širine granulometrijskog pojasa: $\max d_{15}^F / \min d_{15}^F = 2,2 / 0,13 = 16,9 > 5$ pokazuje da je potrebna korekcija! Kako je u ovom primeru filtarska funkcija merodavna, krupnoća $\min d_{15}^F = 0,13$ mm se zadržava kao kontrolna tačka KT2. Koriguje se: $\max d_{15}^F = \min d_{15}^F \cdot 5 = 0,13 \cdot 5 = 0,65$ mm i ova krupnoća postaje kontrolna tačka KT1 (Slika 3.20).

(8) Kriterijum uniformnosti: $\max d_{10}^F = \max d_{15}^F / 1,2 = 0,65 / 1,2 = 0,54$ mm, pa sledi: $\max d_{60}^F = \max d_{10}^F \cdot 6 = 0,54 \cdot 6 = 3,24$ mm (KT3) i $\min d_{60}^F = \max d_{60}^F / 5 = 3,25 / 5 = 0,65$ mm (KT4).

(9) Kriterijum najmanjeg i najvećeg zrna daje: $\min d_5^F = 0,075$ mm (KT5), kao i $\max d_{100}^F = 75$ mm (KT6).

(10) Kriterijum sprečavanja segregacije (Tabela 3.14): $\min d_{10}^F = \min d_{15}^F / 1,2 = 0,11$ mm ($< 0,5$ mm); $\max d_{90}^F = 20$ mm (KT7).

(11) Povezivanjem KT2, KT4 i KT5 dobija se granulometrijska kriva najsitnijeg filtarskog materijala (leva granica granulometrijskog pojasa), a povezivanjem KT1, KT3, KT6 i KT7, granulometrijska kriva najkrupnijeg filtarskog materijala (desna granica pojasa). Obe krive se ekstrapoluju (Slika 3.20). Usvojena granulometrija filtarskog materijala za ugradnju je data u Tabeli 3.17.

Tabela 3.17: *Projektovana granulometrija filtra (otvori standardnih sita).*

Otvor sita [mm]	75	19	12,5	4,75	2,00	0,85	0,425	0,25	0,15	0,075
% prolaska	-	-	100	80 ÷ 100	60 ÷ 100	20 ÷ 100	0 ÷ 60	0 ÷ 35	0 ÷ 17	0 ÷ 5

* * *

Kada se radi o *peščanom i šljunčanom osnovnom tlu* (kategorija 4), može se koristiti nešto lakši i kraći postupak [42, 133]. Filtar je neophodan ako je ispunjen uslov: $d_{15}^K / d_{85}^O > 5$, gde je K – oznaka kamene obloge, a O – osnovnog tla (obale). U tom slučaju, shodno kriterijumima stabilnosti i permeabilnosti, treba da budu zadovoljeni sledeći uslovi:

$$\boxed{\frac{d_{50}^F}{d_{50}^O} < 40; \quad 5 < \frac{d_{15}^F}{d_{15}^O} < 40; \quad \frac{d_{15}^F}{d_{85}^O} < 5.} \quad (3.37)$$

Naglašava da izrazi (3.37) *ne važe* kada je u osnovnom tlu veliki sadržaj prašinstog i glinovitog materijala ($> 15\%$).

■ **Primer 3.7.** Odrediti granulometrijski sastav peščanog filtra ako su dati podaci u Tabelama 3.18 i 3.19.

Tabela 3.18: *Granulometrijski sastav osnovnog tla*

Otvor sita [mm]	1,00	0,425	0,25	0,10	0,05	0,02
% prolaska	100	95	50	15	6	2

Tabela 3.19: *Granulometrijski sastav kamene obloge*

Krupnoća [mm]	400	200	100
Zastupljenost [%]	85	50	15

Rešenje. Sa granulometrijske krive osnovnog tla (Slika 3.21 može se očitati karakteristična krupnoća: $d_{85}^O = 0,4$ mm, pa je uslov neophodnosti filtra zadovoljen: $d_{15}^K/d_{85}^O = 100/0,4 = 250 \gg 5$. Ovo potvrđuje i provera: $d_{15}^K/d_{15}^O = 100/0,1 = 1000 \gg 40$.

(i) Potrebna granulometrija filtra *u odnosu na osnovno tlo*:

$$\begin{aligned} d_{50}^F/d_{50}^O < 40 &\Rightarrow d_{50}^F < 40 \cdot 0,25 < 10 \text{ mm} \\ d_{15}^F/d_{15}^O > 5 &\Rightarrow d_{15}^F > 5 \cdot 0,10 > 0,5 \text{ mm} \\ d_{15}^F/d_{15}^O < 40 &\Rightarrow d_{15}^F < 40 \cdot 0,10 < 4,0 \text{ mm} \\ d_{15}^F/d_{85}^O < 5 &\Rightarrow d_{15}^F < 5 \cdot 0,40 < 2,0 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Usvajaja se: $0,5 \text{ mm} < d_{15}^F < 4,0 \text{ mm}$ i $d_{50}^F < 10 \text{ mm}$.

(ii) Potrebna granulometrija filtra *u odnosu na kamenu oblogu*:

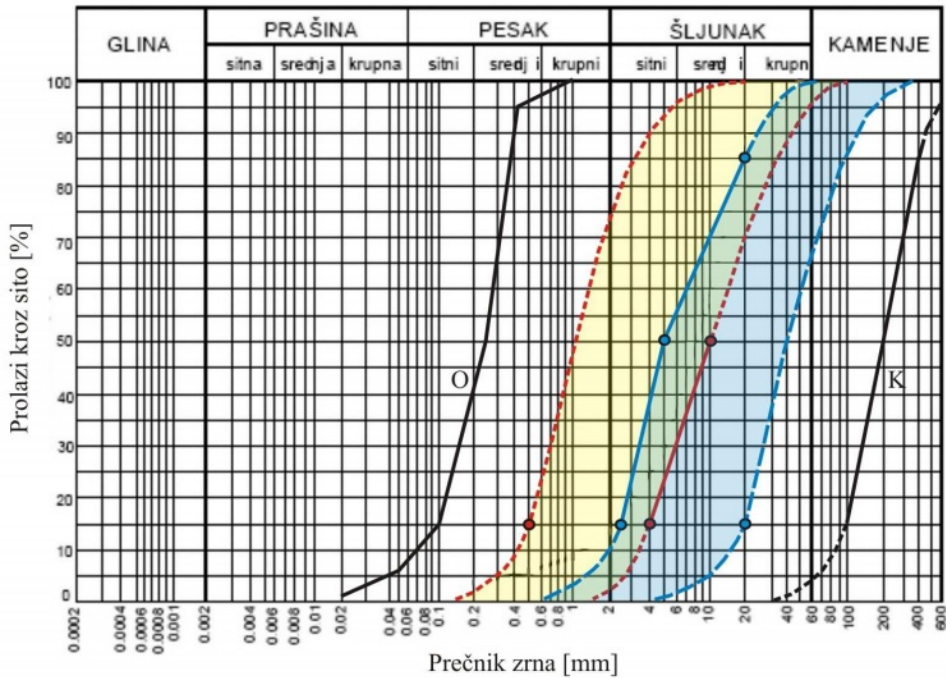
$$\begin{aligned} d_{50}^K/d_{50}^F < 40 &\Rightarrow d_{50}^F > 200/40 > 5 \text{ mm} \\ d_{15}^K/d_{15}^F > 5 &\Rightarrow d_{15}^F < 100/5 < 20 \text{ mm} \\ d_{15}^K/d_{15}^F < 40 &\Rightarrow d_{15}^F > 100/40 > 2,5 \text{ mm} \\ d_{15}^K/d_{85}^F < 5 &\Rightarrow d_{15}^F > 100/5 > 20 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Usvaja se: $2,5 \text{ mm} < d_{15}^F < 20 \text{ mm}$, $d_{50}^F > 5 \text{ mm}$ i $d_{85}^F > 20 \text{ mm}$.

Na Slici 3.21 prikazane su sračunate granulometrijske krive filtarskog materijala. Oblast preklapanja predstavlja granulometrijski pojas projektovanog filtra. Za ugradnju je pogodna bilo koja granulometrija unutar ovog pojasa. Na primer, ugrađeni filter može imati ovakav sastav: $d_{15}^F = 3 \text{ mm}$, $d_{50}^F = 7 \text{ mm}$, $d_{85}^F = 25 \text{ mm}$.

Debljina filtarskog sloja treba bude: $\min \delta_F = 4 d_{50}^F$, ili bar 20 cm.

Treba istaći da je posledica pogrešno projektovanog peščanog filtra deformacija obloge, o čemu upečatljivo govore primeri na Slici 3.22.



Slika 3.21: Granulometrijske krive: osnovnog tla (O) kamene obloge (K); filtar projektovan za osnovno tlo (crvene linije, pojas žute boje); filtar projektovan za kamenu oblogu (plave linije, pojas plave boje); konačno rešenje – zelena oblast dobijena preklapanjem žutog i plavog pojasa.



Slika 3.22: Primer deformacije obloge od slaganih kamenih blokova usled ispiranja peščanog filtra i stvaranja kaverni u osnovnom tlu (reka Sava u Beogradu).

Filtri od geotekstila. Izbor tipa geotekstilnog filtra i njegovih karakteristika zasniva se na podacima o hidrauličkim uslovima i granulometrijskom sastavu tla obale, kao i specifikaciji geotekstila koju daje proizvođač. U tački 3.2 opisana je namena geotekstila i definisana su njegova glavna fizička svojstva. Način ugradnje kamene obloge na podlozi od geotekstila prikazan je na Slici 3.23.



Slika 3.23: Kameni nabačaj na podlozi od geotekstila (kanal „Evropa” na plovnom putu Rajna–Majna–Dunav).

Projektovanje geotekstilnog filtra sastoji se od 8 koraka.

(1) Provera opravdanosti

Polazi se od kvalitativnog razmatranja: (a) kakav je sastav osnovnog tla? (b) kakvo je hidrodinamičko opterećenje (naglo promenljivo, ciklično)? (c) Kolika je opasnost od kolmiranja geotekstilnog filtra? (d) Da li troškovi obnove oštećenog filtra prevazilaze troškove nabavke i ugradnje novog filtra? (d) Kolika je u slučaju rušenja obaloutvrde potencijalna šteta?

(2) Svojstva osnovnog tla

Potrebno je uzeti što više uzoraka tla obale u cilju utvrđivanja granulometrijskog sastava (KI-8.2.2.1). Važni podaci su: procentualno učešće čestica sitnijih od 0,075 mm, karakteristična krupnoća d_{85} i vrednost koeficijenta uniformnosti $S_u = d_{60}/d_{10}$.

Vodopropusnost osnovnog tla kvantifikuje se vrednostima koeficijenta filtracije (hidrauličke provodljivosti) K (Dodatak D4). Za određivanje tih vrednosti koriste se standardizovani laboratorijski postupci [134, 14].

Za peskovita tla sa manje od 5% zrna sitnijih od 0,075 mm, uniformnosti $S_u < 5$, može se koristiti Hazenova (Hazen) formula [46]:

$$K = d_{10}^2 \quad [\text{cm/s}], \quad (3.38)$$

u kojoj se d_{10} unosi u mm. Formula važi za: $(0,1 \text{ mm} < d_{10} < 3 \text{ mm})$.

(3) Svojstva obloge

Ako krupnoća *najmanjeg* komada obloge od kamenog nabačaja premaši 100 mm, veličina slobodnog prostora (zazora) u oblozi može biti reda veličine 100 mm, pa treba predvideti sloj šljunka debljine 15 cm između obloge i geotekstila. Krupnoću šljunka treba birati tako da se spreči njegovo odnošenje kroz šupljine obloge [46]:

$$d_{85} \text{ šljunka} \geq \frac{1}{5} d_{15} \text{ kamenog nabačaja.} \quad (3.39)$$

(4) Filtracioni protok

Reč je o protoku kroz tlo od koga je formirana obala. Definiše se na već poznati način [134]: $q = K I_{\pi} A$, gde je K – koeficijent filtracije, I_{π} – prosečni hidraulički gradijent u tlu i A – proticajna površina (po dužnom metru obale).

(5) Zahtevana svojstva geotekstila.

Obuhvataju se četiri kriterijuma: A. Zadržavanje tla (sprečavanje sufozije), B. Vodopropusnost (permeabilnost i permitivnost), C. kolmiranje i D. Održivost. Svojstva A–C su definisana u tački 3.2.2.1.

A. *Kriterijum zadržavanja tla.* Merodavna je karakteristična veličina pora geotekstila O_{95} (ili prividna veličina otvora AOS):

$$\boxed{O_{95} < B d_{85}} \quad (3.40)$$

gde je: B – empirijski koeficijent (Tabela 3.20), a d_{85} – krupnoća osnovnog tla.

Tabela 3.20: Vrednosti koeficijenta B [46].

Procenat čestica sitnijih od 0,075 mm		
< 50%		≥ 50%
$B = 8/S_u$	$4 < S_u < 8$	$B = 1,8$ - netkani geotekstil $B = 1,0$ - tkani geotekstili
$B = 0,5 S_u$	$2 < S_u \leq 4$	
$B = 1$	$2 \geq S_u \geq 8$	

Za vezana, koherentna tla sa koeficijentom plastičnosti $PI > 7$ preporučuje se: AOS , odnosno $O_{95} \leq 0,3$ mm, a za nekoherentna tla, $B = 0,5$.

U literaturi [146] predlaže se kriterijum efikasnosti zadržavanja čestica iz obale na osnovu relativne gustine tla Δ , uniformnosti $S_u = d_{60}/d_{10}$ i krupnoće d_{50} (Tabela 3.21).

Tabela 3.21: Kriterijum za sprečavanja sufozije [146].

Gustina tla	$1 < S_u < 3$	$S_u > 3$
$\Delta < 50\%$	$O_{95} < S_u d_{50}$	$O_{95} < 9 d_{50}/S_u$
$\Delta = 50\% \div 80\%$	$O_{95} < 1,5 S_u d_{50}$	$O_{95} < 13,5 d_{50}/S_u$
$\Delta > 80\%$	$O_{95} < 2 S_u d_{50}$	$O_{95} < 18 d_{50}/S_u$

B. *Kriterijum vodopropusnosti.* Vrednost koeficijenta K_g (videti tačku 3.2) treba da bude za red veličine veća od vrednosti koeficijenta filtracije osnovnog tla K :

$$\boxed{K_g \geq 10 K.} \quad (3.41)$$

Permitivnost $\Psi_g = K_g/\delta_g$ (tačka 3.2) određuje se shodno izrazima (3.42) [46].

$$\Psi_g \geq \begin{cases} 0,7 \text{ s}^{-1} & \text{- ako je } \leq 15\% \text{ zrna sitnije od } 0,075 \text{ mm} \\ 0,2 \text{ s}^{-1} & \text{- ako je } 15 \div 50\% \text{ zrna sitnije od } 0,075 \text{ mm} \\ 0,1 \text{ s}^{-1} & \text{- ako je } \geq 50\% \text{ zrna sitnije od } 0,075 \text{ mm.} \end{cases} \quad (3.42)$$

Na osnovu veličine Ψ_g proverava se propusna moć geotekstila: $q_n = \Psi_g \Delta\Pi A'_g$, gde je: $\Delta\Pi$ – pijezometarski pad, a A'_g – efektivna filtraciona površina (površina geotekstila A_g umanjena za deo ispod kamene obloge; npr. ako je 50% površine pod kamenom: $A'_g = 0,5 A_g$). Propusna moć geotekstila (q_n) mora biti značajno veća od filtracionog protoka osnovnog tla (q).

C. *Kriterijum kolmiranja (zapušnja)*. U nedostatku podataka od proizvođača, preporučuju se laboratorijska ispitivanja da bi se stekao uvid u brzinu smanjenja vodopropusnosti izabranog filtra tokom vremena. Može se koristiti i ovaj opšti kriterijum:

$$O_{95} \geq 3 d_{15} \quad (3.43)$$

gde je: d_{15} – karakteristična krupnoća osnovnog tla. Kriterijum (3.43) važi za slučaj $S_u = d_{60}/d_{10} > 3$. U protivnom ($S_u \leq 3$), uzeti geotekstil sa najvećim otvorom na osnovu kriterijuma A.

Kolmiranju filtra pogoduju izraženi hidraulički gradijenti i specifičan sastav tla (veliki procenat mulja ili nevezanog peska), u kom slučaju treba razmisliti da li uopšte koristiti geotekstilni filter, ili filter od peska i šljunka. Imajući u vidu progresivno kolmiranje i opadanje propusne moći filtra, pri izboru tkanih geotekstila treba naročito obratiti pažnju na parametar POA , a kod netkanih, na poroznost λ_g (tačka 3.2). Preporuke su sadržane u Tabeli 3.22.

Tabela 3.22: *Izbor geotekstila na osnovu veličine otvora i poroznosti [46].*

Tip geotekstila	Udeo zrna sitnijih od 0,075 mm	
	$\geq 5\%$	$< 5\%$
tkani, monovlaknasti: POA	$\geq 4\%$	$\geq 10\%$
netkani: poroznost λ_g	$\geq 50\%$	$\geq 70\%$

D. *Kriterijum održivosti*. Pored hidrauličkih svojstava geotekstila, proizvođači navode i razna mehanička svojstva, kao što su: otpornost na pritisak, zatezanje, zamor, probijanje (Tabela 3.23 i Dodatak D7). Trajnost geotekstila se meri i otpornošću na ultraljubičasto zračenje (posle 500 sati neprekidne izloženosti, geotekstil mora da zadrži 50% čvrstoće na cepanje/probijanje).

(6) Troškovi filtra.

Obuhvataju se: (a) troškovi ravnjanja tla i (b) jedinični (po m^2) troškovi nabavke i ugradnje geotekstila (po potrebi, dodaje se sloj šljunka između kamene obloge i geotekstila).

Tabela 3.23: Najmanje vrednosti nekih osnovnih svojstava geotekstila [46].

Čvrstoća na	Izduženje < 50%	Izduženje ≥ 50%
kidanje	1400 N	900 N
ušivke	1260 N	810 N
cepanje	500 N	350 N
probijanje	500 N	350 N

(7) Specifikacija izabranog geotekstila.

Obuhvata: (a) zahteve u pogledu funkcije, testiranja i ugradnje (b) kvantifikovana svojstva, (c) način i proceduru ugradnje (polaganje, preklopi, ankerovanje i dr.) i (d) proceduru popravke.

(8) Ugradnja i eksploatacija.

Pre ugradnje, neophodna je provera da li uzorak dopremljenog geotekstila odgovara projektovanom. Pri ugradnji neophodan je nadzor, a tokom eksploatacije, inspekcija posle svakog značajnog plavnog događaja.

■ **Primer 3.8.** Projektovati filter od geotekstila u sklopu obaloutvrde od kamenog nabačaja krupnoće 50÷300 mm. Ispitivanjem dva uzorka tla iz obale utvrđen je granulometrijski sastav osnovnog tla i rezultati su dati u Tabeli 3.24.

Tabela 3.24: Ulazni podaci u primeru 3.8 [46].

Uzorak br.	Sitnije od 0,075 mm [%]	d_{10}	d_{15}	d_{60}	d_{85}
		[mm]			
1	25	0,045	0,057	0,20	0,44
2	15	0,060	0,079	0,30	0,54

Rešenje. Nakon razmatranja opravdanosti u koraku (1), slede računski koraci.

(2) Svojstva osnovnog tla. Koficijent uniformnosti: $S_u = d_{60}/d_{10} = 4,4$ za uzorak 1, odnosno 5,0 za uzorak 2. Vodopropusnost nije merena. Procena na osnovu Hazenovog izraza (3.38): $K = d_{10}^2 = 2,0 \times 10^{-3}$ cm/s za uzorak 1, odnosno $3,6 \times 10^{-3}$ cm/s za uzorak 2. Merodavna je veća vrednost: $K = 3,6 \times 10^{-3}$ cm/s.

(3) Svojstva obloge. Krupnoća kamena: 50÷300 mm; pri ugradnji, kamen se ne sme izručivati na geotekstil sa visine veće od 1 m.

(4) Filtracioni protok osnovnog tla. U ovom slučaju se ne računa, geotekstil se postavlja po celoj kosini obale.

(5) Svojstva geotekstila:

A. Zadržavanje čestica tla. Na osnovu Tabele 3.20 je: $B = 8/S_u = 1,82$ za uzorak 1, odnosno 1,6 za uzorak 2. Na osnovu (3.40): $O_{95} \leq 0,80$ mm za uzorak 1, odnosno 0,86 mm za uzorak 2. Merodavna je manja vrednost 0,80 mm, kojoj odgovara krupnoća $d_{85} = 0,44$ mm (uzorak 1).

B. Vodopropusnost. Prema kriterijumu (3.41): $K_g > 10 \cdot 3,6 \times 10^{-3}$ cm/s, usvaja se: $K_g = 4 \times 10^{-2}$ cm/s. Na osnovu (3.42), za zastupljenost $15 \div 25\%$ čestica sitnijih od 0,075 mm, dobija se: $\Psi_g \geq 0,2$ s⁻¹. Debljina geotekstila je: $\delta_g = K_g / \delta_g = 0,2$ cm = 2 mm. U katalogu proizvođača pronaći odgovarajući tip geotekstila.

C. Kolmiranje. Prema (3.43), za $S_u > 3$ treba da je: $O_{95} \geq 3 \cdot 0,057 \geq 0,17$ mm za uzorak 1, odnosno 0,24 mm za uzorak 2. Vrednost $O_{95} = 0,8$ mm, usvojena po kriterijumu A zadovoljava oba uslova. Kako je udeo čestica sitnijih od 0,075 mm veći od 5%, prema podacima iz Tabele 3.22, od tkanog geotekstila se zahteva površina otvora $POA > 4\%$, a od netkanog, da mu poroznost bude: $\lambda_g > 50\%$.

D. Održivost. Izbor geotekstila se zasniva na podacima iz Tabele 3.23.

(6)–(8) Troškovi, specifikacija, ugradnja i eksploatacija. Shodno lokalnim uslovima.

■ **Primer 3.9.** Projektovati filter od geotekstila za obaloutvrdu od kamenog nabačaja, ako su na osnovu 6 uzoraka utvrđene sledeće karakteristične krupnoće osnovnog tla: $d_{10} = 0,001 \div 0,002$ mm; $d_{15} = 0,0015 \div 0,004$ mm; $d_{50} = 0,01 \div 0,025$ mm; $d_{60} = 0,015 \div 0,03$ mm; $d_{85} = 0,03 \div 0,05$ mm. Udeo čestica sitnijih od 0,075 mm iznosi 43%. Osnovno tlo spada u kategorije: „glina/prrašina” i „prašinsti peskovi”, sa vrednostima: $\Delta > 80\%$ i $K = 10^{-9} \div 10^{-4}$ cm/s.

Rešenje. Rezultati se odnose na svojstva geotekstila A-C.

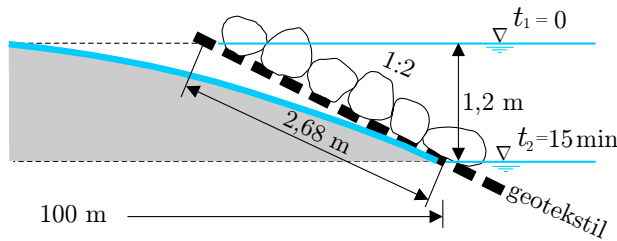
A. Zadržavanje čestica. $S_u = d_{60}/d_{10} = 0,015/0,001 = 15$ i $0,030/0,002 = 15$. $B = 1$, $O_{95} < 0,03 \div 0,05$ mm. Usvaja se manja vrednost: $O_{95} < 0,03$ mm ($d_{85} = 0,03$ mm). Tabela 3.21: $O_{95} < 18 d_{50}/S_u < 18 \cdot 0,01/15 < 0,012$ mm i $18 \cdot 0,025/15 < 0,03$ mm. Rezultat $O_{95} < 0,03$ mm je zajednički za oba pristupa.

B. Vodopropusnost. Prema kriterijumu (3.41): $K_g \geq 10^{-8} \div 10^{-3}$ cm/s. Usvojena vrednost: $K_g = 4 \times 10^{-2}$ cm/s. Na osnovu (3.42): $\Psi_g \geq 0,2$ s⁻¹. Debljina geotekstila: $\delta_g = 0,04/0,2 = 0,2$ cm = 2 mm.

C. Kolmiranje. Za $S_u = 15$, $O_{95} \geq 3 d_{15} \Rightarrow$ opseg vrednosti: $0,0045 \div 0,012$ mm. Usvaja se: $O_{95} \geq 0,012$ m. Kako po kriterijumu A mora biti $O_{95} < 0,03$ mm, opseg prihvatljivih vrednosti je: $O_{95} = 0,012 \div 0,030$ mm. Tkani geotekstil: $POA > 4\%$. Netkani geotekstil: $\lambda_g > 5\%$.

■ **Primer 3.10.** Proveriti prikladnost filtra od geotekstila sledećih karakteristika: $\delta_g = 0,9$ mm, $K_g = 0,04$ cm/s, $O_{95} = 0,2$ mm, ispod obloge od kamenog nabačaja. Obala: nagib 1:2, tlo peskovito, $d_{10} = 0,12$ mm, $d_{50} = 0,37$ mm, $d_{60} = 0,42$ mm, $\Delta = 75\%$ pri poroznosti od 40%. Merodavan hidraulički uslov za proveru filtra je brzo sniženje nivoa u reci od $\Delta Z = 1,2$ m, u vremenu od $\Delta t = 15$ min.

Rešenje. Na Slici 3.24 prikazan je poprečni presek obale, sa položajem provirne linije koja odgovara najvećem filtracionom protoku. Horizontalna dužina ispod provirne linije iznosi 100 m.



Slika 3.24: Skica za proveru vodopropusnosti filtra od geotekstila u primeru 3.10.

Najveći jedinični filtracioni protok (po dužnom metru rečnog korita) može se grubo proceniti kao odnos zapremine vode u šupljinama tla u oblasti ispod provirne linije i vremena sniženja nivoa u reci: $q_{\max} \approx (0,5 \cdot 100 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 0,4) / (0,25 \cdot 3600) = 0,0267 \text{ m}^3/(\text{s m})$.

Ako se zanemari prisustvo kamena, jedinična površina geotekstila iznosi približno: $A'_g = 2,68 \cdot 1,0 \text{ m}^2/\text{m}$, pa je potrebna permitivnost:

$$\Psi_g = q_{\max} / \Delta Z / A'_g = 0,0267 / 1,2 / 2,68 = 0,0083 \text{ s}^{-1}.$$

Na osnovu datih podataka, stvarna permitivnost datog geotekstila iznosi: $\Psi_g = K_g / \delta_g = 0,04 \cdot 0,01 / (0,9 \cdot 0,001) = 0,4444 \text{ s}^{-1}$. Odnos stvarne i potrebne permitivnosti $0,4444 / 0,0083 \approx 53$ predstavlja faktor sigurnosti. Ova vrednost nije preterana, jer kameni komadi obloge smanjuju prolazak vode. (Pravilo je da faktor sigurnosti ne sme biti manji od 10 [146]).

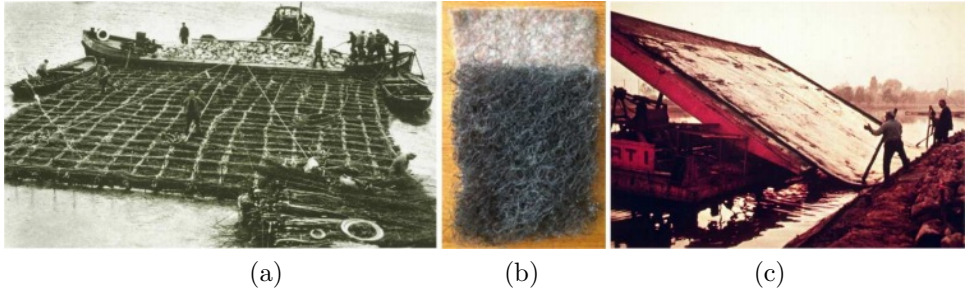
Provera zadržavanja čestica osnovnog tla. Tabela 3.21: za $S_u = 0,42 / 0,12 = 3,5 > 3$ i $\Delta = 75\%$: $O_{95} < 13,5 d_{50} / S_u < 1,4 \text{ mm}$. Kako je otvor O_{95} izabranog geotekstila (0,2 mm) manji od potrebnog otvora (1,4 mm), dati geotekstil je dovoljno gustog tkanja da spreči ispiranje finih čestica iz obale.

3.3.3.3 Nožica obaloutvrde

Svrha nožice obaloutvrde je da prihvati opterećenje obloge i da ga prenese na dno rečnog korita. Najjednostavnija konstrukcija je od krupnih kamenih komada. Telo nožice ima poprečni presek trapeznog oblika. Nožica može biti ukopana u dno, ili izgrađena na dnu, sa kotom krune približno na nivou male vode (Z_{mv}).

Podloga nasute nožice mora biti elastična i prilagodljiva deformaciji korita. Ovu podlogu može da čini tradicionalni fašinski madrac, ojačani geotekstil (Slika 3.25), ili, kao što se praktikuje kod nas na Dunavu, tepih od tucanika debljine oko 0,5 m.

Fašinski madrac od vrbovog pruća je zbog svoje savitljivosti i trajnosti veoma dobar fundament za nožice regulacionih građevina. Gradi se na obali, otprema ploveći do mesta ugradnje, gde se optereti kamenom i potapa. Nažalost, ovaj tip podloge je danas sve manje u upotrebi, zbog nedostatka kvalifikovane radne snage i skupog manuelnog rada. Ojačani geotekstil je takođe relativno skupo, ali lakše dostupno, rešenje. Tepih od tucanika je ekonomično rešenje tamo gde sastav tla u podnožju obale to dozvoljava.



Slika 3.25: Podloge za nožicu: (a) fašinski madrac; (b) geotekstil sa ojačanjem od najlonskih vlakana; (c) polaganje geotekstila sa plovila ili pontona [2].

Na spoju nožice i obloge nalazi se tzv. „uporna greda” – betonski element koji se lije na licu mesta (Slika 3.26) i ravnomerno prenosi opterećenje obloge na nožicu.



Slika 3.26: Primeri upornih greda; levo: Dunav – Grocka; desno: Sava – Beograd.

Temeljna podloga na kojoj se formira nožica mora imati prepust koji garantuje da nožica neće biti podlokana u slučaju erozije korita:

$$\boxed{L_p = h_{ke} / \sin \phi'} \quad (3.44)$$

gde je: L_p – dužina prepusta, h_{ke} – očekivana eroziona dubina u zoni nožice, ϕ' – ugao unutrašnjeg trenja nanosa na dnu.

Problem je kako odrediti „očekivanu” erozionu dubinu. U ranoj fazi projektovanja, odgovor se može potražiti u empirijskim izrazima iz literature, kao što je [33]:

$$\frac{h_{ke}}{H} = \begin{cases} 2,07 - 0,19 \ln \left(\frac{R_k}{B} - 2 \right); & (\text{važi za: } R_k/B > 2) \\ 1,8 - 0,051 \ln \left(\frac{R_k}{B} \right) + 0,0084 \left(\frac{B}{H} \right); & \\ (\text{važi za: } R_k/B = 1,5 \div 10 \text{ i } B/H = 20 \div 125), & \end{cases} \quad (3.45)$$

gde je: B – širina korita uzvodno od krivine, $H = A/B$ – srednja dubina uzvodno od krivine, a R_k – poluprečnik krivine.

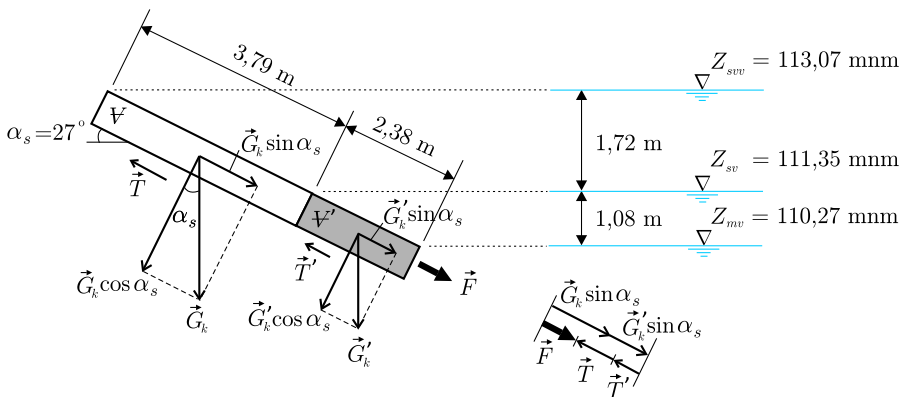
Dimenzionisanje tela nožice zasnovano je na proveru njene stabilnosti na klizanje. Postupak će se najbolje prikazati kroz konkretan primer.

■ **Primer 3.11.** Odrediti potrebne dimenzije nožice na dnu, koja prima opterećenje obloge od kamenog nabačaja ($\rho_s = 2,7 \text{ t/m}^3$), prema shemi prikazanoj na Slici 3.27. Debljina obloge iznosi 0,25 m. Nagib kosine je za 5° manji od ugla mirovanja materijala iz obale i iznosi $\alpha_s = 27^\circ$. Neka su vrednosti koeficijenta trenja: u suvom $f = 0,30$, a pod vodom $f' = 0,15$.

Rešenje. Analiza opterećenja treba da obuhvati tri slučaja: (1) potpuno potopljena obloga (nivo vode na koti Z_{svv}); (2) obloga u suvom (nivo vode na koti Z_{mv}) i (3) delimično potopljena obloga (nivo vode na koti Z_{sv}).

U prva dva slučaja radi se o ekstremnim opterećenjima (najmanjem i najvećem), dok treći slučaj daje opterećenje u „normalnim” hidrološkim uslovima. Za dimenzionisanje nožice merodavno je, naravno, najveće opterećenje. Ovde se daju rezultati proračuna samo za slučaj delimično potopljene obloge.

Sila opterećenja nožice jednaka je rezultanti komponente sopstvene težine obloge i sile trenja. Ove sile se računaju po dužnom metru obale, posebno za delove obloge iznad i ispod nivoa vode (Slika 3.27).



Slika 3.27: Opterećenje na nožicu obaloutvrde.

Filterski sloj je opterećenje od sekundarnog značaja, pa se neće uzeti u obzir. Kako je obloga položena po kosini čiji je ugao manji od ugla mirovanja (i unutrašnjeg trenja) materijala obale, ne postoji aktivan zemljani pritisak na oblogu.

Sile za deo obloge *iznad nivoa vode*:

- Sopstvena težina: $G_k = \rho_s g \forall = 2,7 \cdot 9,81 \cdot 3,79 \cdot 0,25 = 25,10 \text{ kN/m}$
- Komponenta težine: $G_k \sin \alpha_s = 25,10 \cdot 0,454 = 11,39 \text{ kN/m}$
- Komponenta težine: $G_k \cos \alpha_s = 25,10 \cdot 0,891 = 22,36 \text{ kN/m}$
- Sila trenja: $T = f G_k \cos \alpha_s = 0,30 \cdot 22,36 = 6,71 \text{ kN/m}$.

Sile za deo obloge ispod nivoa vode:

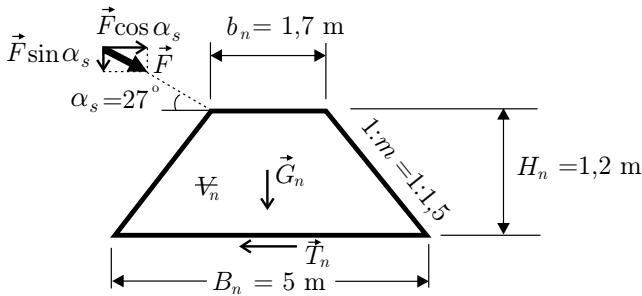
- Sopstvena težina: $G'_k = (\rho_s - \rho) g V' = 1,7 \cdot 9,81 \cdot 2,38 \cdot 0,25 = 9,92 \text{ kN/m}$
- Komponenta težine: $G'_k \sin \alpha_s = 9,92 \cdot 0,454 = 4,50 \text{ kN/m}$
- Komponenta težine: $G'_k \cos \alpha_s = 9,92 \cdot 0,891 = 8,84 \text{ kN/m}$
- Sila trenja: $T' = f' G'_k \cos \alpha_s = 0,15 \cdot 8,84 = 1,33 \text{ kN/m}$.

Rezultujuća sila koja deluje na nožicu (Slika 3.27):

$$F = G_k \sin \alpha_s + G'_k \sin \alpha_s - T - T' = 11,39 + 4,50 - 6,71 - 1,33 = 7,85 \text{ kN/m}.$$

- Horizontalna komponenta: $F \cos \alpha_s = 7,85 \cdot 0,891 = 6,99 \text{ kN/m}$.
- Vertikalna komponenta: $F \sin \alpha_s = 7,85 \cdot 0,454 = 3,56 \text{ kN/m}$.

Sila $F \cos \alpha_s$ teži da „odgurne” nožicu od obale, a sila trenja T'_n teži da spreči horizontalno pomeranje nožice (Slika 3.28).



Slika 3.28: Shematski prikaz tela nožice sa merodavnim silama.

Uslov stabilnosti nožice je:

$$KS = \frac{T'_n}{F \cos \alpha_s} \geq 1,2 \quad (3.46)$$

gde je: KS – koeficijent sigurnosti na klizanje.

Pretpostavlja se da je trup nožice trapeznog poprečnog preseka, zadatih dužina u osnovi i kruni, sa nagibom kosina 1:1,5, koji odgovara uglu mirovanja krupnog kamena. Za tako usvojene dimenzije proverava se uslov (3.46), pa ako nije zadovoljen, dimenzije nožice se povećavaju.

Brži pristup je inverzan i podrazumeva da se za unapred usvojenu vrednost koeficijenta sigurnosti odredi potrebna sila trenja, a preko ove sile, potrebna sopstvena težina, a odavde, veličina nožice. Evo kako to izgleda u konkretnom slučaju. Za usvojenu vrednost $KS = 1,5$ potreban intenzitet sile trenja na kontaktu nožice i podloge iznosi: $T'_n = 1,5 F \cos \alpha_s = 1,5 \cdot 6,99 = 10,49 \text{ kN/m}$.

Sila trenja se dobija kada se rezultanta vertikalnih sila pomnoži odgovarajućim koeficijentom trenja. Zanimajući težinu tla iznad kosine nožice i silu pritiska rečne vode, rezultujuća vertikalna sila je: $G'_n + F \sin \alpha_s$, gde je: $G'_n = (\rho_s - \rho) g V_n$ sopstvena olakšana težina nožice, a V_n – njena zapremina (po dužnom metru obale, Slika 3.28). Ako se pretpostavi da je vrednost koeficijenta trenja $f' = 0,15$, sledi:

$$T'_n = (G'_n + F \sin \alpha_s) f' = 10,49 \text{ kN/m};$$

$$G'_n = T'_n / f' - F \sin \alpha_s = 10,49 / 0,15 - 3,56 = 66,37 \text{ kN/m};$$

$$V_n = G'_n / (\rho_s - \rho) / g = 66,37 / 1,7 / 9,81 = 3,98 \approx 4 \text{ m}^2/\text{m}.$$

Usvaja se trapezni poprečni presek nožice kao na Slici 3.28, sa visinom $H_n = 1,2$ m, dužinama u osnovi 5 m i kruni 1,7 m, uz nagib kosina od 1:1,5 ($V_n = 4,02 \text{ m}^2/\text{m}$).

Kao što je rečeno, betonska uporna greda prenosi opterećenje obloge na nožicu, a njene dimenzije se određuju na osnovu opterećenja i veličine nožice.

Nasuta nožica je svojstvena velikom aluvijalnom vodotoku. Manjem vodotoku sa uskim koritom, prikladna je nožica u vidu *ukopane kamene deponije* (Slika 3.29). Izvodi se tako što se na prethodno pripremljenu kosinu polaže filtarski sloj i na njemu obloga od kamenog nabačaja⁴.

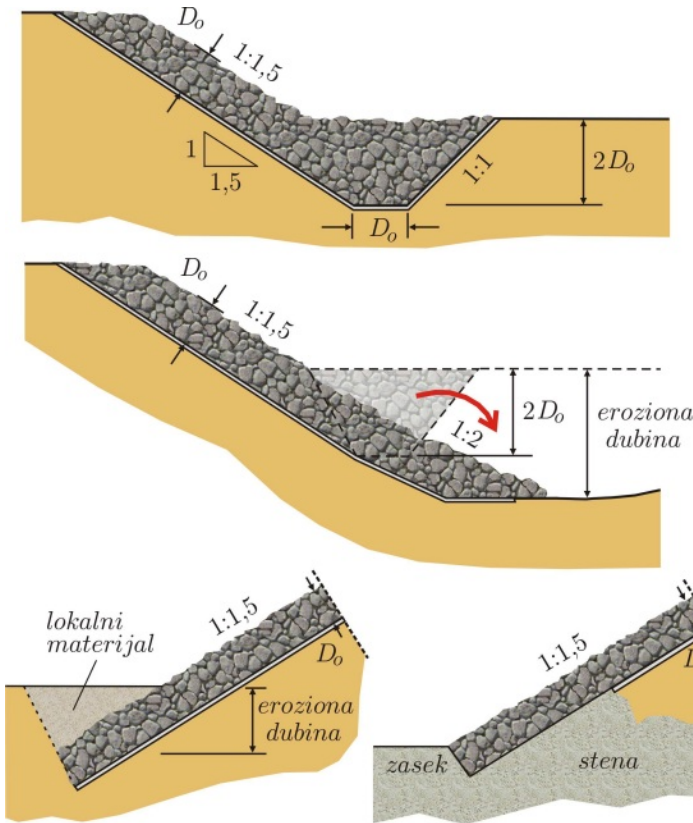
Na Slici 3.29 prikazana je tzv. „standardna” ukopana nožica za oblogu debljine D_o , sa nagibom kosine 1:1,5 [180, 238]. Najmanja dubina ukopavanja ove nožice ($2D_o$) treba da bude u granicama očekivanih erozionih dubina (Tabela 3.25).

Tabela 3.25: Podaci za projektovanje standardne ukopane nožice [180].

Granulometrija	d_{50} [m]	M_{50} [kg]	d_{100} [m]	M_{100} [kg]	D_o [m]	Dopuštena eroziona dubina [m]
1	0,17	6,8	0,25	22,7	0,4	0,6
2	0,20	11,3	0,32	45,4	0,5	0,9
3	0,28	31,7	0,40	90,7	0,6	1,2
4	0,40	90,7	0,60	317,5	0,9	1,8
5	0,60	317,5	0,87	907,2	1,2	2,4

Ako je očekivana eroziona dubina veća od $2D_o$, zapremina ukopane nožice treba da bude određena tako da kamen, koji je inicijalno činio ukopanu nožicu, kada se otkotrlja u erozionu jamu, formira produžetak obloge debljine D_o do samog dna erozione jame (Slika 3.29). Sračunata zapremina se obično uveća za 50% zbog mogućnosti da voda odnese deo kamena pri njegovom obrušavanju. Ovaj tip „prilagodljive nožice” podesan je ako je korito formirano u nevezanom ili umereno vezanom materijalu, gde je kosina erozione jame blaga, najčešće u nagibu 1:2. Nije podesna u slučaju glinovitog materijala, kada su erozione jame strme i nepravilne.

⁴Filtarski sloj nije potreban ako samo tlo ispunjava granulometrijske zahteve prirodnog zrnastog filtra u odnosu na kamenu oblogu.



Slika 3.29: Ukopane kamene nožice (prema [180, 238]); odozgo na dole: „standardna” ukopana nožica za erozione dubine manje od $2D_0$; prilagodljiva nožica za erozione dubine veće od $2D_0$; fundiranje obloge od kamenog nabačaja bez ukopane nožice, sa nadslojem od lokalnog materijala i na stenovitoj podlozi.

U Tabeli 3.26 dati su iskustveni podaci za najveće dopuštene erozione dubine kod prilagodljivih ukopanih nožica, za granulometrije kamena iz Tabele 3.25.

Tabela 3.26: Dopuštene erozione dubine [m] kod prilagodljivih nožica [180].

Granulometrija	1	2	3	4	5	
Nagib	1:1,5	0,82	1,25	1,65	2,50	3,30
obale	1:2	0,95	1,40	1,85	2,80	3,70

3.3.3.4 Završni delovi obaloutvrde

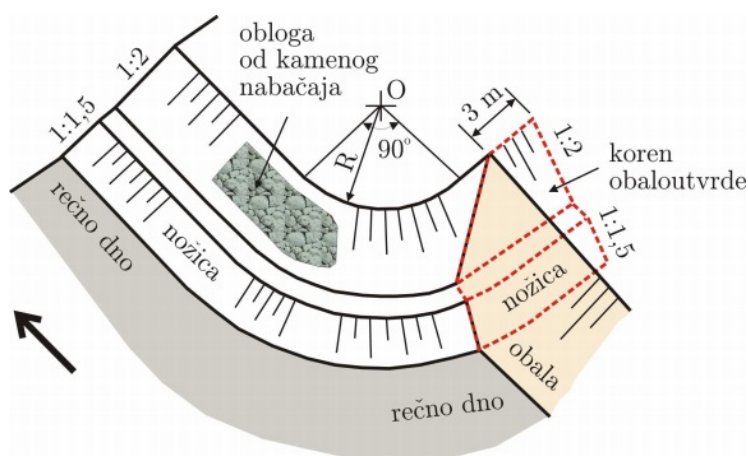
Završni venac. Ovaj element se gradi po celoj dužini obaloutvrde na njenoj završnoj koti (Z_{svv}). Može biti od betona livenog na licu mesta, ili od ređanih tesanih kamenih blokova („kamena završca”, Slika 3.30).

Kvalitetno, paživo izvođenje ovog elementa obezbeđuje održivost obaloutvrde (pod uslovom da je dobro izveden filtarski sloj). Povremena sanacija završnog venca je neizbežna, što treba predvideti u troškovima održavanja obaloutvrde.



Slika 3.30: Primeri završnog venca po kruni obaloutvrde; levo: greda od livenog betona (reka Bolečica kod Beograda); desno: venac od tesanog kamena (Dunav u Apatinu).

Ukorenjenje obaloutvrde. Uzvodni i nizvodni krajevi obaloutvrde moraju biti posebno zaštićeni od podlokavanja. To se postiže „ukorenjenjem” obaloutvrde. Ovaj deo ima krivolinijski oblik (završna „kegla”) sa ukopanim delom unutar obale (Slika 3.31). Ukorenjenje se izvodi zasecanjem obale (najčešće upravno na liniju obale) i iskopom rova u kome se gradi završni deo obaloutvrde u suvom.



Slika 3.31: Skica ukorenjenja obaloutvrde od kamenog nabačaja.

Primer. Povezivanje u celinu elementa obaloutvrde od kamenog nabačaja ilustruje se projektnim rešenjem za reku Vrbas [102]. Prikazan je slučaj kada regulaciona linija zalazi u rečno korito, što zahteva nasipanje obale (ugradnju tzv. „balasta“). Za to se može koristiti zemljani materijal iz obližnjeg pozajmišta, ili šljunčani materijal iz rečnog korita (Slika 3.32).

3.3.3.5 Održivost kamenih obaloutvrda

Obaloutvrde od kamena su najviše zastupljene; u ruralnim područjima se po pravilu grade od kamenog nabačaja, a u urbanim, od kamena zalivenog cementnim malterom ili od krupnih tesanih blokova (Slika 3.33).

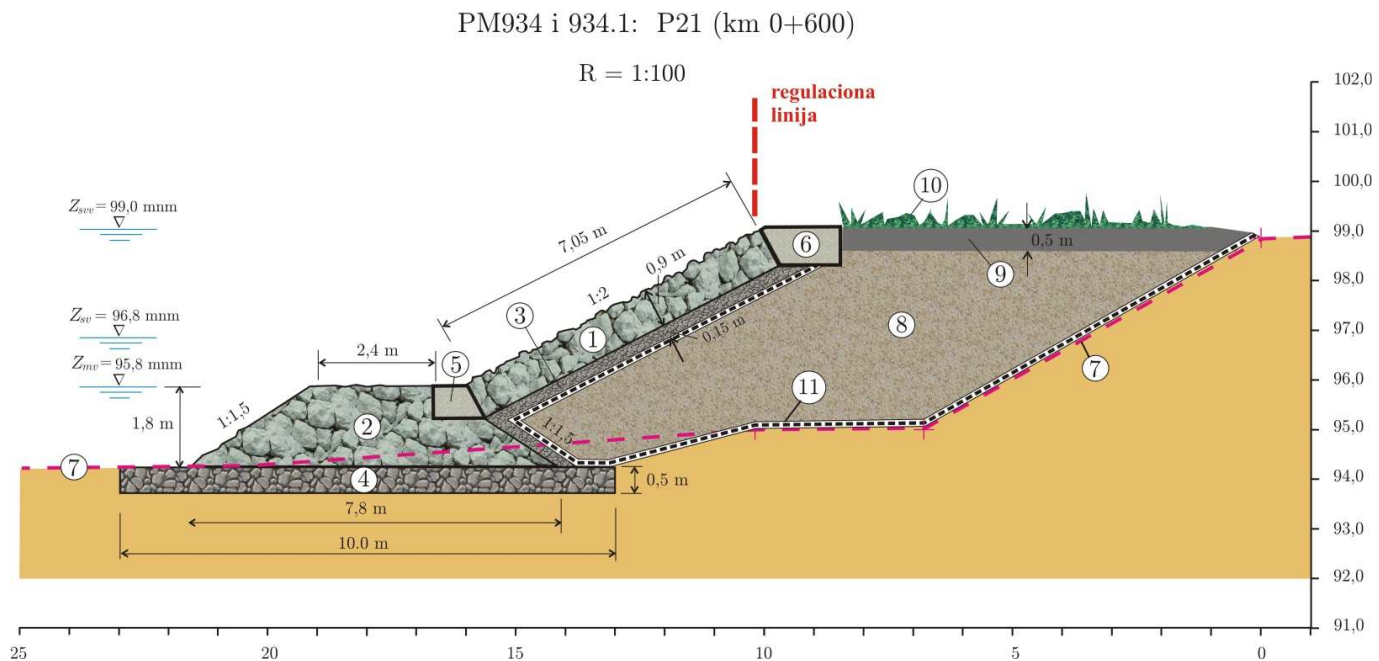


Slika 3.33: Primeri obaloutvrda od kamena: (a) kameni nabačaj na Velikoj Moravi; (b) kameni nabačaj na Jadru; (c) kamen zaliven cementnim malterom na Dunavu kod Grocke; (d) tesani kameni blokovi na Savi kod Beograda.

Često je u praksi prisutna dilema da li je bolja obloga od zalivenog kamena od obloge u vidu kamenog nabačaja? Obloga od zalivenog kamena vizuelno deluje kompaktnije i čvršće. Međutim, takve obloge su krute i osetljive na deformacije korita i oštećenja filterske podloge, pa ih ne treba po svaku cenu favorizovati, pogotovo ne u vangradskim područjima, o čemu svedoči primer na Slici 3.34.



Slika 3.34: Obaloutvrde na reci Ribnici; na deonici sa kamenim nabačajem (levo), obaloutvrda je u toku poplave 2014. god. pretrpela male deformacije; kruta obloga od zalivenog kamena (desno) je propala usled ispiranja filtra i obrušavanja nožice.



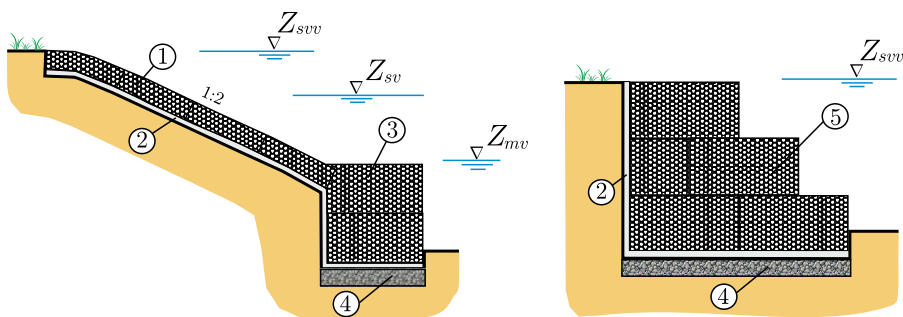
Slika 3.32: Poprečni presek obaloutvrde od kamenog nabačaja u nasipu: 1 - obloga; 2 - nožica; 3 - podloga od šljunka $d_{50} = 50 \text{ mm}$; 4 - podloga nožice od tucanika ili šljunka; 5 - uporna greda; 6 - završni venac; 7 - linija terena pre izgradnje obaloutvrde; 8 - balast od nabijenog šljunka iz rečnog korita $d_{50} = 6 \text{ mm}$; 9 - humusni sloj $0,3 \div 0,5 \text{ m}$; 10 - travnati pokrivač; 11 - geotekstil [102].

3.3.4 Obaloutvrde od slaganih elemenata

Ovaj tip obaloutvrda koristi sledeće konstruktivne elemente: kutijaste gabione, gabionske madrace (i njihovu kombinaciju), razne vrste betonskih blokova i elemente od sintetičkog geomaterijala.

3.3.4.1 Gabioni

Konstruktivni elementi obaloutvrda u vidu kutijastih gabiona i gabionskih madraca su dobro rešenje na područjima koja oskudevaju krupnim kamenom, ili u slučajevima kada ekonomska analiza pokaže da su pribavljanje i transport krupnog kamena previše skupi. U kombinaciji sa vegetacijom, gabioni imaju nesumnjive ekološke i estetske vrednosti. Nedostatak im je što su podložni vandalizmu i zahtevaju češću inspekciju i popravke. Na Slici 3.35 shematski je prikazana obaloutvrda od gabiona.



Slika 3.35: Poprečni preseki tipičnih obaloutvrda od gabiona; 1 - obloga u vidu gabionskog madraca; 2 - filtar od geotekstila; 3 - nožica od kutijastih gabiona; 4 - podloga od tucanika 0,5 m; 5 - zid od kutijastih gabiona.

Podaci za izbor gabiona i gabionskih („Reno”) madraca mogu se naći u katalozima proizvođača (Tabela 3.27).

Tabela 3.27: Podaci za izbor Reno madraca i gabiona Maccaferri [140].

Tip obloge	Debljina madraca Visina gabiona [m]	Kamena ispuna		Kritična brzina V_{c1} [m/s]	Granična brzina V_{c2} [m/s]
		d [mm]	d_{50} [m]		
Reno madrac	0,15 ÷ 0,17	70 ÷ 100	0,085	3,5	4,2
		70 ÷ 150	0,110	4,2	4,5
	0,23 ÷ 0,25	70 ÷ 100	0,085	3,6	5,5
		70 ÷ 150	0,120	4,5	6,1
	0,30	70 ÷ 120	0,100	4,2	5,5
100 ÷ 150		0,125	5,0	6,4	
Gabioni	0,50 ÷ 1,0	100 ÷ 200	0,150	5,8	7,6
		120 ÷ 250	0,190	6,4	8,0

Za stabilnost gabiona merodavne su dve brzine toka: „kritična brzina” toka V_{c1} pri kojoj još ne dolazi do pokretanja kamene ispunje gabiona i „granična brzina” V_{c2} pri kojoj je pomeranje kamene ispunje u prihvatljivim granicama. Treći važan parametar je srednji prečnik kamena d_{50} .

Izbor kutijastih gabiona i gabionskih madraca obuhvata: (1) dimenzije žičanih korpi (npr. $3 \times 2 \times 1$ m), (2) karakteristike heksagonalne mreže od pocinkovane žice ($\emptyset = 2,7 \div 3,2$ mm, PVC obloga 0,5 mm, veličina okaca, npr. 8×10 cm) i (3) krupnoću kamena za ispunju (npr. $d_{50} = 0,15$ m, $d_{90} = 0,19$ m). Izbor se zasniva na podacima iz Tabele 3.27, rukovodeći se uslovom da srednja profilska brzina toka mora biti manja od granične brzine V_{c2} . Sledi provera načinjenog izbora.

(1) Provera tangencijalnih napona. Naponi na dnu (τ_o) i na kosinama obala (τ_s) računaju se pomoću poznatih izraza (K1-2.13-Sl:1.18):

$$\tau_o = \rho g h I_d; \quad \tau_s = 0,75 \tau_o,$$

gde je: h – dubina toka, a I_d – uzdužni nagib dna (alternativno se mogu koristiti srednja dubina A/B i nagib linije energije I_e).

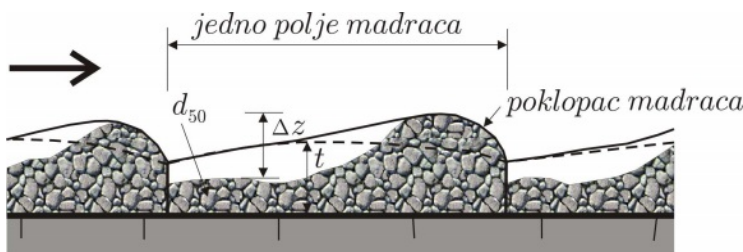
Kritični tangencijalni napon na dnu (τ_{oc}) računa se na osnovu kritičnog Šildsovog broja Θ_c (K1-9.2.2-Sl:9.2). Za kamen u žičanoj korpi je $\Theta_c = 0,1$ [140]. Kritični napon na kosinama obala (τ_{sc}) je određen korekcijom vrednosti Θ_{oc} faktorom nagiba obale k_2 (K1-9.2.5-(9.56)):

$$\tau_{oc} = 0,1 g (\rho_s - \rho) d_{50}; \quad \tau_{sc} = \tau_{oc} k_2 = \tau_{oc} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_s}{\sin^2 \phi'}},$$

gde je: α_s – ugao kosine obale u odnosu na horizontalu, a ϕ' – ugao unutrašnjeg trenja kamena.

Za stabilnu oblogu potrebno je da bude zadovoljen uslov: $\tau_o < \tau_{oc}$ i $\tau_s < \tau_{sc}$, ali se toleriše i izvesno prekoračenje kritičnog napona: $\tau_o \leq 1,2 \tau_{oc}$ i $\tau_s \leq 1,2 \tau_{sc}$, pod uslovom da je deformacija kamene ispunje u prihvatljivim granicama [140].

(2) Provera deformacije gabiona. Reč je o vertikalnom pomeranju Δz kamene ispunje unutar korpe gabiona (Slika 3.36).



Slika 3.36: Deformacija kamene ispunje u korpi gabiona (prema [140]).

Uslov je [140]:

$$\boxed{\frac{\Delta z}{d_{50}} = 0,31 \ln(\Theta_{o,e}) + 2,36 \leq 2 \left(\frac{t}{d_{50}} - 1 \right)}, \quad (3.47)$$

gde je t – projektovana visina kutijastog gabiona, odnosno debljina gabionskog madraca, a $\Theta_{o,e}$ – „efektivni” Šildsov broj:

$$\begin{aligned} \Theta_{o,e} &= \frac{\tau_o - \tau_{oc}}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (\tau_o > \tau_{oc}) \quad \text{- rečno dno} \\ \Theta_{s,e} &= \frac{\tau_s - \tau_{sc}}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (\tau_s > \tau_{sc}) \quad \text{- kosina obale.} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Ako je $\Theta_{o,e} < 0$, odnosno $\Theta_{s,e} < 0$, nema pomeranja kamene ispune, niti deformacije žičanih korpi.

(3) Provera brzine. Nakon postavljanja gabionske obloge, rapavost korita se menja; koeficijent rapavosti je jednak (KI-3.2-(3.23)):

$$n = d_{90}^{1/6} / 26, \quad (3.49)$$

gde je: d_{90} – karakteristična krupnoća kamena unutar gabiona.

Potrebno je ponovo sračunati brzinu toka: $V = \frac{1}{n} R^{2/3} I_d^{1/2}$ i proveriti da li je manja od granične brzine V_{c2} . Ukoliko je nova vrednost koeficijenta rapavosti manja od one sa kojom je prvobitno računata brzina toka, nova brzina će biti veća. Ako se gabionima štite samo obale (ili deo korita), poprečni presek se deli na segmente (KI-6.4), a korekcija rapavosti i brzine se primenjuje samo na segmente sa gabionskom zaštitom.

(4) Provera deformacije tla ispod gabiona. Cilj je procena da li je potreban filtarski sloj i ako jeste, koji tip filtra je odgovarajući. Izraz za grubu procenu merodavne („rezidualne”) brzine pri dnu ima oblik [140]:

$$v_b = \frac{1}{n} \left(\frac{d_{50}}{2} \right)^{2/3} I_d^{1/2}, \quad (3.50)$$

gde je: $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ u slučaju peskovite, a $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}$, šljunkovite podloge. Brzina v_b se poredi sa kritičnom brzinom za eroziju (ne)vezanog tla (Dodaci D2 i D3). Za lako pokretni materijal (pesak i šljunak), kritična brzina se može proceniti i pomoću empirijskog izraza [140]:

$$v_{bc} = 16,1 d_{50}^{1/2}. \quad (3.51)$$

Kriterijum je: $v_b/v_{bc} \leq 2 \div 4$. Ukoliko ovaj uslov nije zadovoljen, treba postaviti geotekstilni filter (koji smanjuje brzinu v_b $2 \div 4$ puta), ili geotekstil na tankom sloju ($5 \div 10$ cm) sitnog šljunka. U obzir može doći i šljunčani filter bez geotekstila.

Gabionski madraci. Namenjени su pokrivanju velikih površina obale (Slika 3.37). Ugrađuju se u suvom i pod vodom. Korpe gabionskih madracа su подељене poprečnim „dijafragmama” u cilju sprečavanja prevelikog pomeranja kamene ispune (Dodatak D6). Postupak proračuna илустrovaće se јednim primerom.



Slika 3.37: Gabionski madraci; a – ugradnja [2]; b – obaloutvrda na reci Jadar.

■ **Primer 3.12.** Poprečni presek korita јednog bujičnog vodotoka ima trapezni oblik, sa širinom u dnu $b = 10$ m i nagibom kosina obala $1:m = 1:2$ ($\alpha_s = 26,56^\circ$). Dubina toka iznosi $h = 2$ m, a uzdužni nagib linije energije $I_e = I_d = 0,01$ (јednoliko tečenje). Korito je formirano u sitnom šljunku, srednjeg prečnika 5 mm. Procenjena rapavost iznosi $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Razmotriti oblaganje korita (obala i dna) Reno madracima.

Rešenje. Hidraulički elementi poprečnog preseka za dubinu $h = 2$ m su:

$$\begin{aligned}
 A &= h(b + mh) = 2(10 + 2 \cdot 2) = 28,0 \text{ m}^2; \\
 B &= b + 2mh = 10 + 4 \cdot 2 = 18,0 \text{ m}; \\
 O &= b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 10 + 2 \cdot 2\sqrt{1 + 4} = 18,94 \text{ m}; \\
 R &= A/O = 28,0/18,94 = 1,48 \text{ m}; \\
 V &= (1/n) R^{2/3} I_d^{1/2} = 3,71 \text{ m/s} \text{ (Fr} = 0,89) \\
 Q &= V A = 104 \text{ m}^3/\text{s}.
 \end{aligned}$$

Razmatranjem podataka iz Tabele 3.27 i Dodatka D6, izabran je Reno madrac debljine $t = 0,25$ m, sa okcima mreže 5×7 mm, od žice prečnika 2 mm. Ispuna je od kamena krupnoće $70 \div 150$ mm, $d_{50} = 0,12$ m, $d_{90} = 0,15$ m, $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$, $\phi' = 40^\circ$. Dimenzije јednog madraca su: $4,5 \times 2$ m. Dno korita se može „pokriti” sa 5 madraca postavljenih po širini ($5 \times 2 = 10$ m), dok se svaka od obala „pokriva” јednim madracom postavljenim po dužini (4,5 m). Madraci se međusobno vezuju.

(1) Provera tangencijalnog napona

Rečno dno:

$$\begin{aligned}
 \tau_o &= 1,0 \cdot 9,81 \cdot 2,0 \cdot 0,01 = 0,196 \text{ kPa}; \\
 \tau_{oc} &= 0,1 \cdot 9,81 (2,65 - 1,0) 0,12 = 0,194 \text{ kPa}; \\
 \tau_o/\tau_{oc} &= 1,01 < 1,20.
 \end{aligned}$$

Kosine obala:

$$\begin{aligned}\tau_s &= 0,75 \tau_o = 0,143 \text{ kPa}; \\ k_2 &= \sqrt{1 - (\sin^2 26,56^\circ / \sin^2 40^\circ)} = 0,71; \\ \tau_{sc} &= k_2 \tau_{oc} = 0,71 \cdot 0,194 = 0,138 \text{ kPa}; \\ \tau_s / \tau_{sc} &= 1,04 < 1,20.\end{aligned}$$

Zaključak: izabrani Reno madrac debljine $t = 0,25$ m je prihvatljiv, tangencijalni naponi su manji od dozvoljenih.

(2) Provera deformacije madraca

Granična relativna deformacija iznosi: $2(t/d_{50} - 1) = 2,17$. Rezultati proračuna prosečne deformacije ($\Delta z/2$) i efektivne debljine gabionskog madraca posle deformacije ($t - \Delta z/2$) dati su u Tabeli 3.28.

Tabela 3.28: Rezultati proračuna u primeru 3.12.

Položaj gabionskog madraca	$\Theta_{s,e}$ (-)	$\Delta z/d_{50}$ (-)	Δz (m)	$\Delta z/2$ (m)	$t - \Delta z/2$ (m)
Rečno dno	0,0010	0,22	0,027	0,013	0,237
Kosine obala	0,0029	0,55	0,066	0,033	0,217

Zaključak: Shodno shemi na Slici 3.36, posle deformacije će efektivna debljina madraca na rečnom dnu (0,237 m) i obalama (0,217 m) biti još uvek dovoljna za efikasnu zaštitu od erozije.

(3) Provera brzine

Oblaganjem korita gabionskim madracima, rapavost i brzina će se promeniti:

$$\begin{aligned}n &= d_{90}^{1/6} / 26 = 0,15^{1/6} / 26 = 0,028 \text{ m}^{-1/3}\text{s}; \\ V &= (1/n) R^{2/3} I_d^{1/2} = 4,63 \text{ m/s (Fr} = 1,40).\end{aligned}$$

Zaključak: iz Tabele 3.27 proizilazi da je $V = 4,63 \text{ m/s} > V_{c1} = 4,5 \text{ m/s}$ (što je razlog za pomeranje kamene ispune), ali je $V = 4,63 \text{ m/s} < V_{c2} = 6,1 \text{ m/s}$, tako da je kriterijum stabilnosti gabionskih madraca zadovoljen.

(4) Provera deformacije podloge

Podloga gabionskih madraca je sitno šljunčano tlo. Kritična brzina za pomeranje ovog tla iznosi, shodno (3.51): $v_{bc} = 1,14 \text{ m/s}$. Kako je vrednost koeficijenta rapavosti za šljunčano tlo približno $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, „rezidualna” brzina strujanja pri dnu, prema (3.50), iznosi: $v_b = 0,61 \text{ m/s}$.

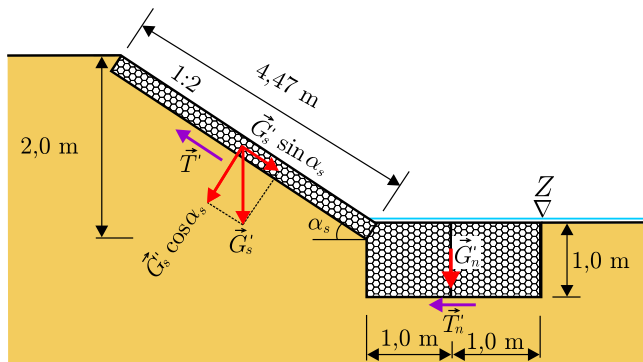
Zaključak: imajući u vidu kriterijum: $v_b/v_{bc} = 0,5 \leq 2 \div 4$, može se smatrati da u ovom slučaju nije potrebno postavljati bilo kakav filtarski sloj ispod gabionskih madraca.

Napomena: Za određivanje krupnoće kamena za madrace debljine 30 cm, pod nagibima do 1:2, može se koristiti i obrazac (3.18), sa eksperimentalno utvrđenom vrednošću koeficijenta $C = 0,13$ (videti Tabelu 3.8). Preporuka je da za brzine toka do 3,5 m/s, debljina madraca ne sme biti manja od 15 cm, a za brzine toka iznad 4 m/s, 30 cm [42].

* * *

Opterećenje gabionskih madraca prima nožica od gabiona. Dimenzionisanje nožice je zasnovano na uslovu stabilnosti na klizanje, kao što ilustruje sledeći primer.

■ **Primer 3.13.** Na Slici 3.38 prikazana je obaloutvrda od gabionskih madraca iz primera 3.12. Odrediti dimenzije nožice za najnepovoljniji slučaj opterećenja, pri izuzetno niskom nivou vode i gabionskim madracima u suvom ($f = 0,3$).



Slika 3.38: Skica uz primer 3.13.

Rešenje. Za visinu obale od 2 m i nagib 1:2 ($\alpha_s = 26,56^\circ$), dužina obloge po kosini iznosi 4,41 m. Intenziteti sila su:

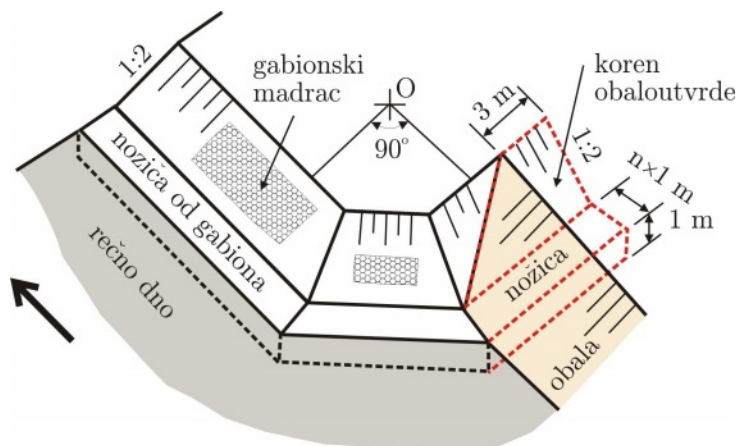
- jedinična težina madraca: $G_s = g \rho_s \nabla = 9,81 \cdot 2,65 \cdot 4,47 \cdot 0,25 = 29,07 \text{ kN/m}$;
- komponenta težine: $G_s \sin \alpha_s = 29,07 \cdot 0,447 = 13,00 \text{ kN/m}$;
- komponenta težine: $G_s \cos \alpha_s = 29,07 \cdot 0,894 = 26,00 \text{ kN/m}$;
- sila trenja: $T = f \cdot G_s \cos \alpha_s = 0,3 \cdot 26,00 = 7,80 \text{ kN/m}$;
- sila na nožicu: $F = G_s \sin \alpha_s - T = 13,00 - 7,80 = 5,20 \text{ kN/m}$;
- vertikalna komponenta: $F \sin \alpha_s = 5,20 \cdot 0,447 = 2,32 \text{ kN/m}$;
- horizontalna komponenta: $F \cos \alpha_s = 5,20 \cdot 0,894 = 4,65 \text{ kN/m}$.

Pretpostaviće se da je nožica od kutijastih gabiona ukopana i da je nivo vode pri samom dnu. Nožica je izložena potisku, a horizontalni pritisci su u ravnoteži. Za vrednost koeficijenta trenja pod vodom: $f' = (2/3)f = 0,2$ i koeficijenta sigurnosti na klizanje $KS = 1,2$:

- potrebna sila trenja nožice: $T_n' = 1,2 F \cos \alpha_s = 1,2 \cdot 4,65 = 5,58 \text{ kN/m}$;
- težina nožice: $G_n' = T_n' / f' - F \sin \alpha_s = 5,58 / 0,2 - 2,32 = 25,58 \text{ kN/m}$;
- zapremina nožice: $\nabla_n' = G_n' / g / (\rho_s - \rho) = 25,58 / 9,81 / 1,65 = 1,58 \text{ m}^2/\text{m}$.

Usvaja se nožica od 2 kutijasta gabiona dimenzija: $1,0 \times 1,0 \times 2 \text{ m}$ (Slika 3.38).

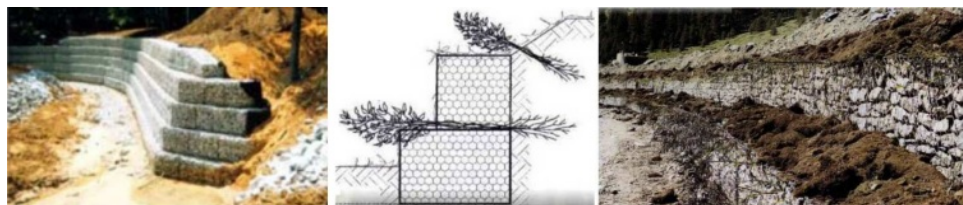
Ukorenjenje. Kao obaloutvrde od kamenog nabačaja i obaloutvrde od gabiona zahtevaju ukorenjenje. Skica završetka obaloutvrde sa oblogom od gabionskih madraca i nožicom od kutijastih gabiona data je na Slici 3.39.



Slika 3.39: Skica ukorenjenja obaloutvrde od gabiona.

Na Slici 3.40 prikazana je, primera radi, obaloutvrda od gabiona kao alternativno rešenje onom na Slici 3.32 [102].

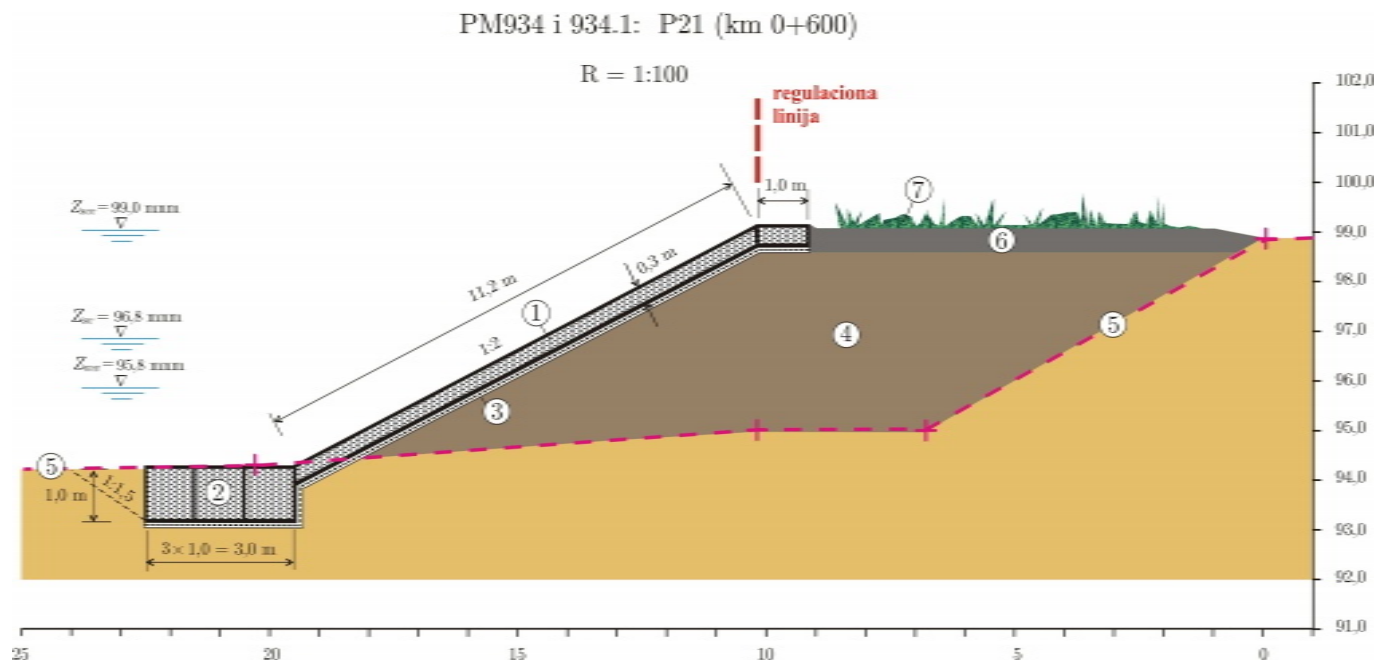
Kutijasti gabioni. Koriste se za izgradnju vertikalnih obaloutvrda i potpornih zidova (Slika 3.41).



Slika 3.41: Kutijasti gabioni kao obaloutvrde; dodatak sadnica pomaže da se objekat uklopi u ambijent [137].

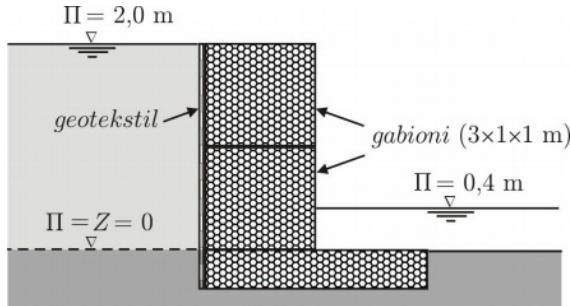
Kutijasti gabioni se koriste za obaloutvrde samo kada su u pitanju veoma strme obale. Koriste se uglavnom za zaštitu propusta, preliva i slapišta. Dimenzije gabiona i žičanih korpi se unapred usvajaju (Tabela 3.27).

Građevine od kutijastih gabiona mogu podneti velike brzine toka ($5 \div 6$ m/s). U okviru projekta gravitacionih zidova od kutijastih gabiona, potrebno je proveriti njihovu stabilnost na smicanje i preturanje. Gabioni imaju povoljno drenažno svojstvo, a od karakteristika osnovnog tla zavisi da li zahtevaju ugradnju filtarske podloge.



Slika 3.40: Poprečni presek obaloutvrde od gabiona u nasipu: 1 - obloga: Reno madrac dimenzija H:B:L = 0,3×2×6 m; 2 - nožica: kutijasti gabioni dimenzija H:B:L = 1×1×2 m; 3 - filtarska podloga (geotekstil); 4 - balast od zemljanog materijala; 5 - linija terena pre izgradnje obaloutvrde; 6 - humusni sloj 0,3÷0,5 m; 7 - travnati pokrivač [102].

■ **Primer 3.14.** Na Slici 3.42 prikazana je vertikalna obaloutvrda od gabiona. Za određivanje tipa geotekstila merodavan je slučaj naglog opadanja nivoa u reci i pojave najveće razlike pijezometarskih kota. Zbog nedostatka informacija u vezi sa vremenskom razmerom pojave i dinamičkim uslovima kretanja vode kroz tlo i geotekstil, razmatra se problem *ustaljene* filtracije.



Slika 3.42: Filtar od geotekstila u sklopu zaštite obale gabionima ima dvojaku ulogu: da omogući slobodan prolaz vode kako bi se izbegao porast hidrostatičkog pronaog pritiska u osnovnom tlu i da spreči ispiranje čestica iz obale.

Ulazni podaci: Obala: $d_{50} = 0,05$ mm; $S_u = 2,5$; $\Delta = 70\%$; $K = 1$ cm/s. Odrediti optimalnu vrstu geotekstila prema podacima iz kataloga proizvođača (Tabela 3.29).

Tabela 3.29: Podaci za izbor geotekstila

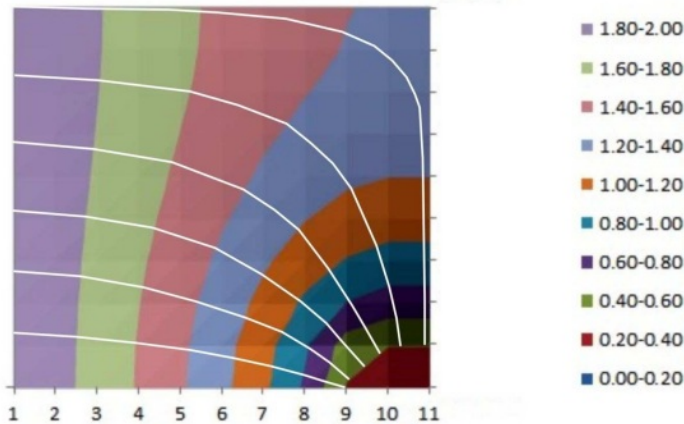
Karakteristike geotekstila	Tip geotekstila		
	1 – netkani	2 – tkani	3 – netkani
K_g [cm/s]	0,300	0,036	0,020
δ_g [mm]	1,5	0,8	0,4
$\Psi_g = K_g/\delta_g$ [1/s]	2,00	0,45	0,50
O_{95} [mm]	0,15	0,21	0,15

Rešenje. Prvi korak je određivanje filtracionog protoka kroz tlo ka reci usled razlike nivoa. Iz hidraulike je poznato da se ovaj protok može odrediti crtanjem mreže strujnica i ekvipotencijalnih linija [134], ili numerički, metodama konačnih razlika, konačnih elemenata i graničnih elemenata [127]. Rešenje konkretnog problema prikazano je na na Slici 3.43.

Pretpostavljajući da se voda uglavnom kreće upravno na ravan geotekstila, jedinični protok (po dužnom metru rečnog korita) biće jednak [293]:

$$q = K \Delta \Pi (N_f/N_p), \quad (3.52)$$

gde je: N_f – broj strujnih cevi, N_p – broj polja između evipotencijalnih linija, a $\Delta \Pi$ – razlika pijezometarskih kota (ukupni pad pritiska). U datom slučaju se sa crteža na Slici 3.43 mogu očitati vrednosti: $N_f = 6$ i $N_p = 8$, tako da je na osnovu



Slika 3.43: Mreža strujnica (bele linije) za slučaj ustaljene filtracije ka reci u primeru 3.14 (polja u boji prikazuju promenu potencijala).

(3.52): $q = 0,01 \cdot 1,6 \cdot (6/8) = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}$. Zahtevana permitivnost (po dužnom metru obaloutvrde) iznosi:

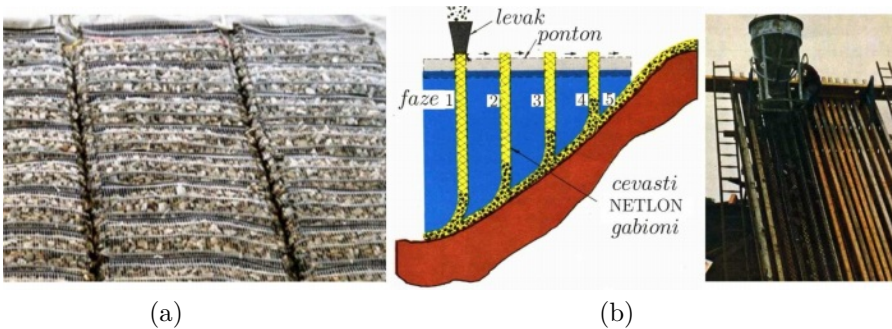
$$\Psi_g = \frac{q}{\Delta \Pi A} = \frac{0,012}{1,6(1,6 \times 1,0)} = 0,0045 \text{ s}^{-1}.$$

Upoređujući ovu vrednost sa vrednostima K_g/δ_g u Tabeli 3.29, može se konstatovati da sva tri tipa geotekstila zadovoljavaju kriterijum vodopropusnosti.

Za proveru veličine otvora u geotekstilu, koriste se podaci iz Tabele 3.21 i dobija se najveća veličina otvora $O_{95} = 1,5 S_u \cdot d_{50} = 1,5 \cdot 2,5 \cdot 0,05 = 0,19 \text{ mm}$. Upoređenjem ove vrednosti sa vrednostima iz Tabele 3.29, može se zaključiti da netkani geotekstili tipa 1 i 3 zadovoljavaju kriterijum zadržavanja čestica (sprečavanja sufozije), dok tkani geotekstil tipa 2 ovaj kriterijum ne zadovoljava.

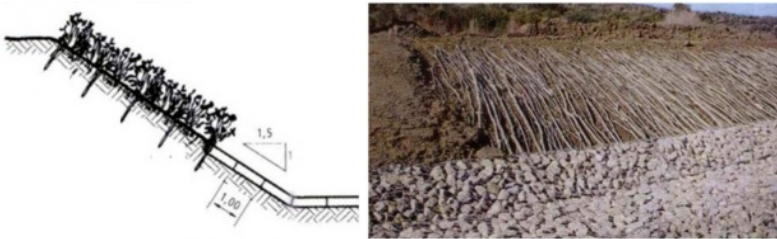
Cevasti i vrećasti gabioni. Pored kamena, ispunjena ovih gabiona može biti i od drobljenog betona. Vrećasti gabioni se dobro prilagođavaju neravninama podloge, pa su idealni za popunjavanje proloka i izradu nožica obaloutvrda. Cevasti elementi se postavljaju duž obale pomoću kranova, u suvom ili pod vodom. Ako je po visini naslagano više cevi, mora se osigurati njihovo čvrsto povezivanje (Slika 3.44-a). Kada služe kao nožica obaloutvrde, vrećasti gabioni se mogu vezati za obalu pomoću drvenog kolja ili metalnih ankera. Mreža cevastih/vrećastih gabiona može biti izrađena od standardne pocinkovane žice, ili od veoma čvrstog najlona (Slika 3.44-b).

Biološki gabionski sklopovi. Sve vrste gabiona imaju odlična hidraulička i statička svojstva i obezbeđuju dogotrajnu zaštitu od fluvijalne erozije. Međutim, u novije vreme se smatra da to nije dovoljno i da građevine od gabiona moraju da ispune i ekološko-estetske zahteve. Težnja je da se masivni oblici gabionskih tvorevina prikriju i da se one vremenom potpuno uklope u okolni ambijent. To je



Slika 3.44: Dva načina formiranja obaloutvrda od gabionskih cevi; (a) naslagane gabionske žičane vreće; (b) punjenje šljunkom gabionskih cevi od netlona [135].

relativno lako postići, jer poroznost i vodopropusnost gabionske ispune omogućava opstanak trave i žbunja. Unutar gabiona se mogu ugraditi biorazgradljivi elementi ispunjeni zemljom i sadnicama (Slika 3.10). Kada se gabioni kombinuju sa biološkom zaštitom kosina, vremenom vegetacija prekrije celu građevinu, ili deo kosine iznad nivoa srednje vode (Slike 3.41, 3.45).



Slika 3.45: Kombinacija biološke zaštite kosine i gabiona [137].

3.3.4.2 Betonski blokovi

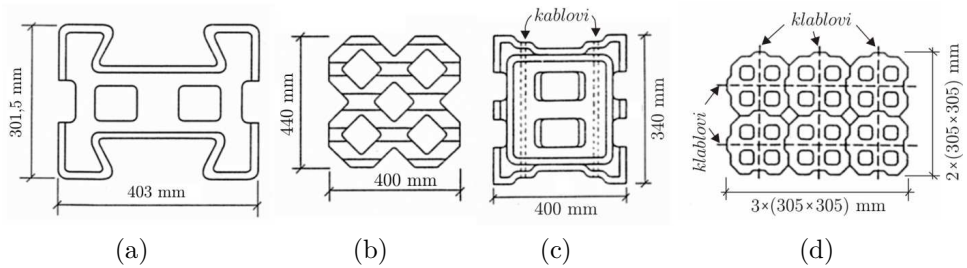
Kada je kamen teško ili skupo nabaviti, ili kada postoje posebni estetski zahtevi, za obloge obaloutvrda se mogu koristiti prefabrikovani betonski blokovi raznih oblika, dimenzija, površinske teksture, sa otvorima ili bez njih, kao i načina povezivanja (slobodni ili povezani blokovi, Slika 3.46).

Slobodni blokovi. Obloga se formira ređanjem i uklapanjem blokova (Slike 3.46-b) i 3.47). Ovi blokovi su relativno malih dimenzija i ugrađuju se ručno, ili uz pomoć posebnih uređaja. Ugradnja ispod vode je ograničena na dubine do 0,5 m.

Stabilnost slobodnih betonskih blokova zavisi od njihove mase, brzine toka i gustine betona. Ako su blokovi postavljeni pod nagibom manjim od 1:2,5 i ako su pažljivo uravnati, za potrebnu debljinu bloka se može koristiti empirijski obrazac [42]:

$$d_b = (0,037 \div 0,048) \tilde{u}^2 / \Delta, \quad (3.53)$$

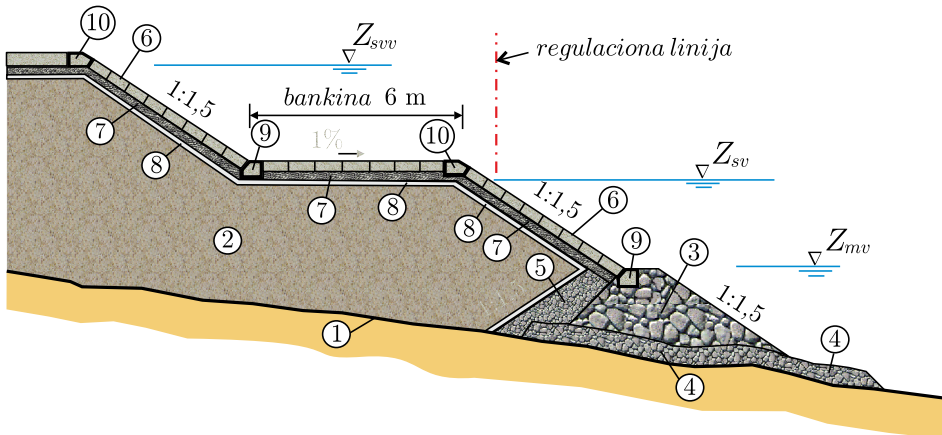
gde je: $\Delta \approx 1,3$ – relativna gustina betona, a \tilde{u} – srednja brzina toka po dubini u podnožju obaloutvrde (alternativno, srednja profilska brzina $V = Q/A$.)



Slika 3.46: Razni tipovi prefabrikovanih betonskih blokova; (a) slobodni blokovi tipa Armorloc: debljina 90 mm, masa 12,8 kg, otvori 20%; (b) slobodni blokova tipa Grasscel: debljina 125 mm, masa 30 kg, otvori 70%; (c) vezani blokovi tipa Armorflex140: debljina 85 mm, masa 17,7 kg, otvori 20%; vezani blokovi tipa Petraflex: debljina 90÷220 mm, masa 13÷21 kg, otvori 18÷24% [42].



Slika 3.47: Tipovi slobodnih betonskih blokova



Slika 3.48: Tipski poprečni presjek obaloutvrde od slobodnih betonskih blokova; 1 – postojeća obala; 2 – refulisani pesak; 3 – nožica od lomljenog kamena 150÷500 mm; 4 – podloga od tucanika 50÷150 mm; 5 – sloj tucanika 30÷60 mm; 6 – obloga od betonskih blokova 300÷400 mm; 7 – podloga od tucanika 4÷16 mm; 8 – filtar of geotekstila; 9 – uporna greda AB MB30; 10 – završna greda AB MB30.

Za stabilnost betonskih blokova je važno i dreniranje osnovnog tla, pa se kao podloga mogu koristiti peščani ili geotekstilni filtri. Za sprečavanje klizanja blokova niz kosinu, po kruni nožice se postavlja betonska uporna greda (Slika 3.48).

Slobodni betonski blokovi sa zatravnatim otvorima mogu odoleti velikoj brzini toka; eksperimentalno je utvrđeno da takvi blokovi debljine 100 mm mogu opstati pri brzini od 4 m/s 1÷2 sata [42].

Povezani blokovi. Povezivanjem betonskih blokova formiraju se betonski madraci, čija je prednost u odnosu na slobodne blokove, veća kompaktnost, mogućnost podvodne ugradnje i kraće vreme izvođenja radova. Za povezivanje blokova koriste se čelični kablovi (Slika 3.46-c), ili užad od sintetičkih materijala. Tipične dimenzije madraca od povezanih blokova su: 7÷30 m. Povezani blokovi po pravilu imaju veću jediničnu masu od slobodnih blokova: 140 kg/m² na manjim i srednjim vodotocima, a 200÷500 kg/m² na velikim plovnim rekama.

Betonske ploče. Armirane betonske ploče su najčešće prefabrikovani elementi pravougaonog oblika, raznih veličina. Odnos debljine i površine ploča je tipično < 0,075 m⁻¹ (za razliku od betonskih blokova, gde je taj odnos tipično > 0,6 m⁻¹). Debljina betonskih ploča za oblaoutvrde obično iznosi 10÷15 cm, a najveći nagib pod kojim se polažu je 1:1,5.

Zbog male vodopropusnosti, važno je odgovarajućom drenažom betonske ploče što više osloboditi pritiska podzemne vode. Razdelnice omogućavaju da se ploče prilagode temperaturnim promenama i deformaciji terena.

Nedostaci betonskih obloga su: osetljivost na ispiranje podloge (koje ostavlja ploče bez oslonca) i nepovoljan estetski utisak. Kod nas su korita malih vodotoka često oblagana betonskim pločama radi lakšeg održavanja – uklanjanja otpada dospelog poplavom ili neodgovornim postupanjem stanovništva (Slika 3.49).



Slika 3.49: Regulacija Topčiderske reke u Beogradu.

3.3.4.3 Ostale vrste obloga

Obloge sa bitumenskim vezivom. Bitumen (katran) je prirodni hemijski inertan materijal (dobijen suvom destilacijom fosilnih goriva – uglja, treseta i drveta). Zbog svoje plastičnosti veoma je pogodan kao vezivni materijal za nasuti kamen.

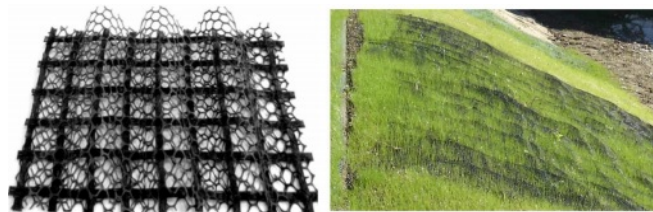
Pri istom hidrauličkom opterećenju, omogućava manji utrošak kamena i njegovu manju krupnoću od klasičnog kamenog nabačaja. Nedostaci su mu relativno visoki troškovi nabavke/ugradnje i nepovoljni ekološko-estetski efekti.

Obloge od sintetičkih geomaterijala. Za povećanje otpornosti tla na smicanje i stabilizaciju kosina najviše se koriste saćasti geoelementi, geomreže i geotepisi. Kao rezultat, potrebna je manja debljina obloge. Geosintetici tipa „geosaća” izrađuju se od plastičnih traka, povezuju se na licu mesta varenjem. Kada se koriste za zaštitu kosina, pune se zemljom i zatravljuju, a kada se koriste za stabilizaciju rečnog dna, pune se kamenom ili betonom (Slika 3.50). Moguća je i kombinacija ispune (u gornjem delu obaloutvrde trava, u donjem delu kamen ili beton). Preporučuje se ugradnja na filterskoj podlozi. Pri većim nagibima, ovakve mreže se dodatno vezuju za obalu čeličnim ankerima ($1/m^2$).



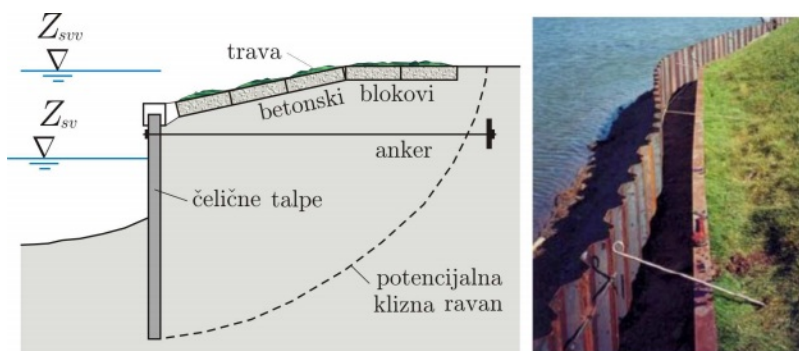
Slika 3.50: *Primena geosaća tipa „ArmaTer[©]” [136].*

Geomreže se izrađuju od plastičnih materijala, a geotepisi, od geotekstila. Njihovo tkanje je dovoljno gusto da zadrži tlo, a omogućava nesmetani rast vegetacije kroz omotač (Slika 3.51). Sa razvojem korenog sistema biljaka, raste otpornost tla na eroziju. Praktikuje se i pokrivanje ovih elemenata slojem humusa debljine $3\div 5$ cm. Pričvršćivanje geomreža i geotepiha obavlja se pomoću čeličnih ankeri, ili ukupavanjem u obalu ($20\div 30$ cm) po kruni i u podnožju. Ovakve obloge mogu kratkotrajno da izdrži brzine do $3,5$ m/s.



Slika 3.51: *Geomereže raznih proizvođača [142].*

Čelične, betonske i plastične talpe. Talpe se koriste za formiranje vertikalnih zidova koji sprečavaju eroziju obale tamo gde nema dovoljno prostora za kose obaloutvrde (čest slučaj u urbanim sredinama). Zidovi od talpi mogu biti trajnog ili privremenog karaktera, kao zagati pri izgradnji ili rekonstrukciji drugih objekata (pragova, pregrada i dr.). Čelične i betonske talpe se mogu pobijati sa obale ili sa plovnih objekata i obično zahtevaju ankerovanje van zone potencijalne klizne ravni. Mogu se kombinovati sa biotehničkom zaštitom radi povoljnijeg estetskog izgleda (Slika 3.52).



Slika 3.52: Vertikalni obalni zidovi od čeličnih talpi.

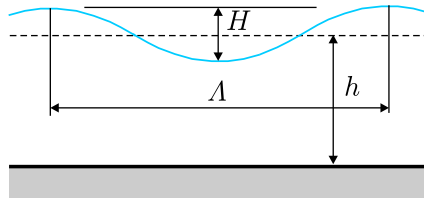
Najčešće se koriste čelične talpe, zbog velike čvrstoće i malih deformacija. Dužine im mogu biti veće od 25 m, pri debljinama od preko 10 mm. Smatra se da je životni vek čeličnih talpi bar 50 godina, s tim da je brzina korozije u evropskim uslovima oko 0,05 mm/god. Nizvodno od objekata kao što su: ispusti, prevodnice i dr., gde se javljaju velike lokalne brzine toka (do 5 m/s), zaštita obala čeličnim talpama predstavlja jedino održivo rešenje.

Alternativa čeličnim talpama su talpe od armiranog betona tamo gde je tlo povoljno i gde zid od talpi ne mora biti vodonepropusan. Dimenzije ovakvih talpi su: dužina, 15÷20 m, širina, oko 0,5 m, debljina, 0,15÷0,40 m. Na malim vodotocima se, iz estetskih i finansijskih razloga, mogu koristiti drvene (ređe plastične) talpe. Radi se o talpama male dužine (obično do nivoa srednje vode), dok se za ostatak obale koristi biološka zaštita.

3.3.5 Uticaj talasa izazvanih vetrom

Talasi izazvani vetrom mogu biti od interesa za projektovanje obaloutvrda i nasipa u uslovima velikih vodenih površina izloženih jakim vetrovima. Od primarnog je značaja da se odredi visina izdizanja nivoa usled talasa, kako bi se odredila potrebna kota krune obaloutvrde.

Poznato je da se gravitacioni talasi karakterišu: visinom H , dužinom Λ , periodom T i brzinom prostiranja $c = \sqrt{gh}$ gde je g – gravitaciono ubrzanje, a h – srednja dubina vode (Slika 3.53). Veza između talasne dužine i periode je: $\Lambda = gT^2/(2\pi)$.



Slika 3.53: Parametri talasnog kretanja.

Strujanje vazduha izaziva tangencijalni napon na površini vode, a sa povećanjem brzine vetra raste poremećaj vodene površine, sve do uspostavljanja talasnog kretanja. Visina talasa je na većini reka relativno mala (do 0,3 m), tako da se u projektovanju obaloutvrda uticaj vetra obično zanemaruje. Izuzetak čine prirodna jezera i akumulacije na kanalisanim rekama (na primer đerdapska akumulacija), gde, zbog velike vodene površine i jakog vetra, postoje uslovi za pojavu talasa značajne visine.

U teoriji talasnog kretanja, razlikuju se dva slučaja: talasi u „dubokoj vodi” i talasi u „plitkoj vodi”. Kriterijum plitke vode definisan je uslovom: $h < (1/4 \div 1/5) \Lambda$, ili $h \ll \Lambda$ (KI-5.1). Osnovna razlika je u tome što je u dubokoj vodi uticaj trenja po dnu zanemarljiv, pa talasna visina ne zavisi od dubine, dok u plitkoj vodi to nije slučaj. Brzina talasa male amplitude u plitkoj vodi je: $c = \sqrt{gh} \approx \sqrt{g(A/B)}$ (Ki-5.1).

Visina talasa zavisi od: brzine vetra (V_a), njegovog trajnja (T_a), dužine zaleta (F_a) i srednje dubine (h). Dužina zaleta, ili „feč”, predstavlja najduže pravolinijsko odstojanje duž vodene površine u pravcu merodavnog vetra, do razmatrane obaloutvrde.

Za projektovanje obaloutvrda merodavan je vetar povratnog perioda 25 godina (izuzetno 50, ili čak 100 godina). Vrednosti navedenih parametara utvrđuju se statističkom obradom podataka o intenzitetu, pravcu, smeru i trajanju vetra, izmerenih u meteorološkim stanicama. Brzina V_a je osrednjena u vremenskom intervalu T_a – projektnom trajanju vetra ($T_a \leq F_a/c$). Kod akumulacija je praksa da se visina talasa računa sa srednjom brzinom vetra trajanja 1 sat [216]. Može se očekivati da brzine vetra budu veće za trajanja manja od jednog sata, a manje za duža trajanja.

Brzina vetra se po pravilu meri na $z=10$ m iznad vodene površine. Ta brzina je merodavna za proračun visine talasa. Ukoliko se raspolaže podatkom o brzini vetra izmerenoj na nekoj drugoj visini, potrebno je izvršiti preračunavanje, shodno empirijskoj zavisnosti [199]:

$$V_a = K_z K_v V_{a10}, \quad (3.54)$$

gde je V_{a10} brzina vetra na $z = 10$ m iznad vodene površine, a K_z i K_v su korekcionni koeficijenti čije su vrednosti date u Tabeli 3.30.

Tabela 3.30: Vrednosti korekcionih koeficijenta za brzinu vetra.

z [m]	5	≥ 20	V_a [m/s]	20	30	40	50
K_z	1,1	0,9	K_v	1,00	0,92	0,88	0,85

Teorija talasnog kretanja usled vetra je veoma razrađena za velike vodene zapremine – mora i jezera. Kada su reke u pitanju, teorijska podloga je skromna, a uglavnom se nude empirijski obrasci, u čemu prednjači ruska literatura. Ovde se navodi obrazac Zairova i dr. [199], zbog toga što uzima u obzir specifičnosti rečnih tokova i što je uvršćen u ruske tehničke standarde (SNIP, 1983). Prema ovom obrascu, srednja visina talasa usled vetra određuje se na osnovu empirijske zavisnosti:

$$H = 6 \times 10^{-4} V_{a10}^{1,1} F_a^{0,45} \quad (3.55)$$

gde je brzina vetra V_{a10} data u m/s, a dužina zaleta F_a u metrima. Kada je: $g F_a / V_{a10}^2 < 10^3$, ovaj obrazac važi za plitke i duboke vodotoke, sa greškom do 10% [199]. U prvoj aproksimaciji zanemaruje se brzina rečnog toka. Odgovarajuća srednja vrednost talasne periode je:

$$T = 8,27 H^{0,625} V_{a10}^{-0,25}. \quad (3.56)$$

Uticao širine vodotoka. Kada je pravac vetra približno paralelan sa linijom obala, uticaj širine rečnog korita postaje značajan. Tada u obrascu (3.55) treba izvršiti zamenu poslednjeg člana: $F_a^{0,45}$ proizvodom $\psi B^{0,45}$, gde je B – širina korita, a ψ korekcionni koeficijent (Tabela 3.31).

Tabela 3.31: Vrednosti korekcionog koeficijenta ψ u izrazu Zairova [199].

F_a/B	1	10	20	30	40	50	>50
ψ	0,90	1,53	1,69	1,76	1,79	1,80	1,90

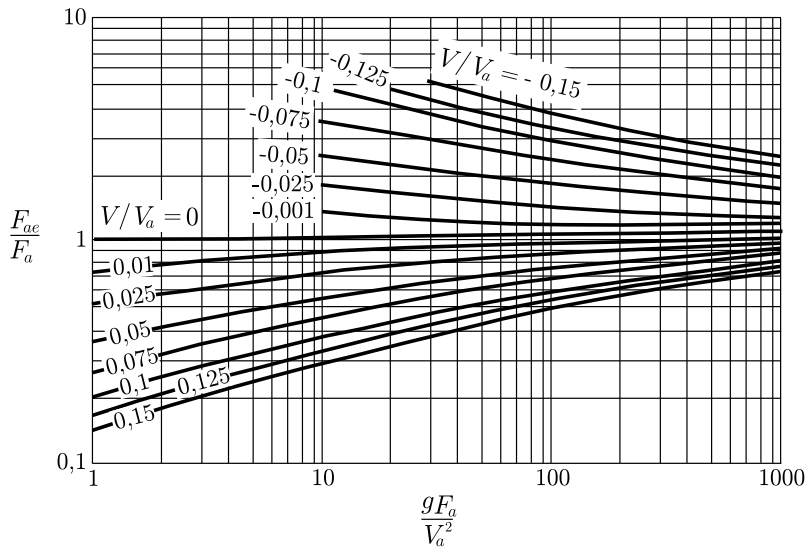
Uticao brzine rečnog toka. Kada je feč kolinearan sa pravcem glavnog toka, uticaj brzine toka je obuhvaćen empirijskim obrascima:

$$H' = H \exp\left(-4,145 \frac{V}{c}\right) \quad (3.57)$$

$$T' = T \exp\left(-1,704 \frac{V}{c}\right), \quad (3.58)$$

gde su H' i T' korigovana visina talasa i njegova perioda, V – srednja profilaska brzina toka, a $c = \sqrt{g h} = \sqrt{g \Lambda / 2\pi}$ – brzina prostiranja talasa. Navedeni obrasci važe u opsegu: $-0,5 < V/c < 0,5$.

Utica j brzine toka na dužinu zaleta (feč) može se odrediti i pomoću empirijskog nomograma na Slici 3.54, koji daje vrednost *efektivnog* feča F_{ae} , kao veličine koja odražava promenu energije talasa [199]. Parametar na ovom nomogramu je odnos brzine toka i brzine vetra V/V_a . Kada pravci rečnog toka i vetra nisu kolinearni, brzina toka se projektuje na pravac vetra kao: $V \cos \theta$, gde je θ – ugao koji zaklapaju vektori \vec{V} i \vec{V}_a .



Slika 3.54: Uticaj brzine toka na dužinu zaleta – feč; kada su vetar i rečni tok istog smera ($V/V_a > 0$), efektivni feč je kraći od feča u mirnoj vodi ($F_{ae}/F_a < 1$), što znači da je i visina talasa manja; obrnuto važi kada su vetar i rečni tok suprotnog smera ($V/V_a < 0$); dovoljno velika brzina toka može da zaustavi talase usled vetra.

Kada je reč o projektovanju obaloutvrda, nisu merodavne prosečne visine talasa, već one maksimalne. Polazeći od toga daje visina talasa slučajna veličina sa određenom teorijskom raspodelom, srednja visina talasa bilo koje verovatnoće pre-vazilažnja je:

$$H(P) = H \sqrt{-4 \ln P/\pi} \quad (3.59)$$

Tako je: $H_{1\%} = H \sqrt{-4 \ln 0,01/\pi} = 2,41 H$ i $H_{2\%} = 2,23 H$.

Za procenu kote krune obaloutvrde često se koristi i tzv. „značajna” visina talasa: $H_s \approx 1,6 H$.

■ **Primer 3.15.** Na Slici 3.55 prikazano je ušće Save u Dunav u Beogradu. Odrediti prosečnu i ekstremnu visinu talasa usled vetra na datoj lokaciji. Vetar duva iz pravca NNE i ima dužinu zaleta od oko 1800 m. Visine talasa sračunati za brzine vetra $V_a = 5, 10, 15$ i 20 m/s. Brzina rečnog toka: $V = 0,5$ m/s.



Slika 3.55: Pravac, smer i dužina zaleta vetra u primeru 3.15.

Rešenje. Rezultati proračuna su dati u Tabeli 3.32.

Tabela 3.32: Visina talasa usled vetra na ušću Save u Dunav.

Mirna voda				Uticaj rečnog toka				Ekstremi	
V_{a10} [m/s]	$g F_a / V_a^2$	H [m]	T [s]	V / V_a	F_{ae} / F_a	F_{ae} [m]	H [m]	$H_{1\%}$	$H_{2\%}$
5	706,3	0,10	1,33	-0,100	2,10	3780	0,14	0,35	0,32
10	176,6	0,22	1,81	-0,050	1,80	3240	0,29	0,69	0,64
15	78,5	0,34	2,16	-0,033	1,75	3150	0,44	1,07	0,99
20	44,1	0,47	2,45	-0,025	1,70	3060	0,60	1,45	1,34

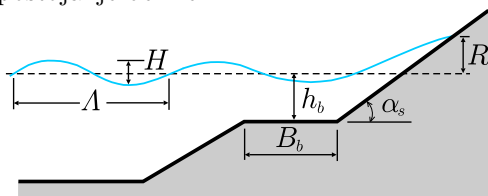
Prosečne visine talasa, sračunate pomoću izraza (3.55), odražavaju stanje bez uticaja strujanja vode u Savi („mirna voda”); ove visine talasa su zatim korigovane pomoću nomograma na Slici 3.54. Na kraju su primenom obrasca (3.59) sračunate visine talasa verovatnoće pojave 1% i 2%. (Uticaj širine korita je zanemaren.)

Izdizanje nivoa uz kosinu obaloutvrde. Kada talas izazvan vetrom dospe do obale, dolazi do izdizanja nivoa uz kosinu obaloutvrde. Visina ovog izdizanja zavisi od visine i dužine talasa, nagiba i rapavosti kosine, kao i ugla pod kojim talas deluje na obalu. Prema holandskim normama, visina izdizanja nivoa R (Slika 3.56) računa se pomoću izraza [190, 191]:

$$R = r_n r_\beta r_b R_n \quad (3.60)$$

gde je: R_n – izdizanje nivoa u odnosu na nivo mirne vode u slučaju glatke obloge,

r_n – koeficijent koji uzima u obzir rapavost i propusnost obloge, r_β – koeficijent napadnog ugla (β – ugao između pravca vetra i normale na obalu), r_b – koeficijent koji uzima u obzir postojanje berme.



Slika 3.56: Izdizanje nivoa uz kosinu obaloutvrde izazvano vetrom.

Sve veličine u izrazu (3.60) definisane su empirijski. Tako je [190]:

$$R_{n,2\%} = \begin{cases} (1,5 \div 1,75) \xi_p H_s & \text{za } \xi_p \leq 2,5 \\ (3,0 \div 3,50) H_s & \text{za } \xi_p > 2,5 \end{cases} \quad (3.61)$$

gde je parametar talasnog prelamanja:

$$\xi_p = \operatorname{tg} \alpha_s (H/\lambda)^{-0,5}. \quad (3.62)$$

Vrednosti koeficijenta r_n date su u Tabeli 3.33.

Tabela 3.33: Vrednosti koeficijenta r_n u izrazu (3.60).

Tip obloge	r_n
asfalt, gladak beton	1,00
betonski blokovi, lomljen kamen, trava	0,95
slagan kamen	0,90
propusni elementi, šljunak, gabionski madraci	0,7÷0,8
kameni nabačaj sloja debljine $2 d_{50}$	0,5÷0,6

Vrednosti koeficijenta r_β se određuju na osnovu empirijske relacije:

$$r_\beta = \begin{cases} 0 & \text{za } \beta \leq 30^\circ \\ 0,8 & \text{za } \beta = 50^\circ \div 80^\circ. \end{cases} \quad (3.63)$$

Ukoliko je kosina obaloutvrde presečena bermom, mora se u (3.60) uvesti koeficijent ovog uticaja, r_b . U slučaju regularnih (pravilnih) talasa, najveće smanjenje izdizanja nivoa vode nastaje ako je berma u blizini nivoa srednje vode: $h_b \leq 0,5 H$ (Slika 3.56). Povećanje širine berme B_b smanjuje visinu izdizanja do izvesne granice; najmanje izdizanje nivoa R nastaje pri $B_b \approx 4H$ i $H/\lambda > 0,03$. Ako je širina berme $B_b \geq 4H$, a $h_b < 0,5 H$, vrednosti koeficijenta r_b mogu se usvojiti na osnovu podataka iz Tabele 3.34.

Tabela 3.34: Vrednosti r_b u izrazu (3.60) u slučaju regularnih talasa [190].

$m = \operatorname{ctg} \alpha_s$	2÷3	4	5÷7
r_b	0,5 ÷ 0,6	0,6 ÷ 0,7	0,75 ÷ 0,8

U slučaju neregulanih (nepravilnih) talasa mogu se koristiti empirijski izrazi [191]:

$$(a) \quad \xi_p < 86 H_s/\Lambda : r_b = \begin{cases} 1,0 - 0,06 \frac{\xi_p B_b}{H_s} & \text{za } \frac{\xi_p B_b}{H_s} \leq 7 \\ 0,6 \div 0,65 & \text{za } \frac{\xi_p B_b}{H_s} > 7 \end{cases} \quad (3.64)$$

$$(b) \quad \xi_p \geq 86 H_s/\Lambda : r_b = \begin{cases} 1,0 - 5 \frac{B_b}{\Lambda} & \text{za } \frac{B_b}{\Lambda} \leq 0,08 \\ 0,6 \div 0,65 & \text{za } \frac{B_b}{\Lambda} > 0,08. \end{cases} \quad (3.65)$$

■ **Primer 3.16.** Koristeći podatke iz primera 3.15: $V_{a10} = 10$ m/s, $T = 1,81$ s, $H = 0,29$ m, sračunati visinu izdizanja nivoa uz obaloutvrdu od slaganog kamena, koja ima nagib 1:2 i bankinu širine $B_b = 2$ m. Napadni ugao vetra je: $\beta = 65^\circ$.

Rešenje. Shodno datim podacima, biće:

$H_s = 1,6 \cdot 0,29 = 0,46$ m; $\Lambda = 9,81 \cdot 1,81^2/2/3,14 = 5,12$ m; $H_s/\Lambda = 0,46/5,12 = 0,09$; $\xi_p = 0,5 \cdot 0,09^{-0,5} = 1,67$; $R_{n2\%} = 1,5 \cdot 1,67 \cdot 0,46 = 1,15$ m; $r_n = 0,9$; $r_\beta = 0,8$;

- pravilni talasi: $r_b = 0,6$ (Tabela 3.34);
- nepravilni talasi: $\xi_p = 1,67 < 86 H_s/\Lambda = 7,73$; $\xi_p B_b/H_s = 7,26 > 7 \Rightarrow r_b = 0,6$;
- visina izdizanja nivoa: $R = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 1,15 \approx 0,5$ m.

Dimenzionisanje obloge na udar talasa. Projektovanje obloge koja je često izložena udarima talasa zahteva poseban pristup, zasnovan na empirijskim istraživanjima.

Jedna od predloženih formula za dimenzionisanje *zaštitnog elementa* obloge (nominalnog prečnika kamenog komada, debljine betonskog bloka, ili gabionskog madraca) ima ovakav oblik [199, 191]:

$$\boxed{d_{50} > \frac{H_s \sqrt{\xi_p}}{\Phi_T \Delta}} \quad (3.66)$$

gde je: d_{50} – krupnoća zaštitnog elementa, H_s – značajna talasna visina, Δ – relativna gustina elementa i Φ_T – faktor stabilnosti elementa pri udaru talasa.

U slučaju gabionskog madraca, relativna gustina je: $\Delta_m = \Delta(1 - \lambda_o)$, gde je λ_o – poroznost materijala ispune (peska, šljunka, kamena). Vrednosti faktora stabilnosti Φ_T date su u Tabeli 3.35.

Obrazac (3.66) važi za nagibe obaloutvrda $m = \text{ctg } \alpha_s \geq 1,5$.

Tabela 3.35: Vrednosti faktora stabilnosti u obrascu 3.66.

Materijal obloge	Φ_T
Kameni nabačaj	$2 \div 2,25$
Nevezani blokovi na geotekstilu	3,5
Zaliveni blokovi na geotekstilu	4,0
Blokovi povezani kablovima	$4,5 \div 5,0$
Zaliveni užlebljeni blokovi sa kablovima	$> 6,0$

3.3.6 Uticaj talasa izazvanih kretanjem brodova

Poremećaj nivoa usled prolaska brodova ispoljava se na dva načina:

(1) Na datoj lokaciji obaloutvrde, nivo se snižava sve dok brod prolazi tu lokaciju. Veličina i brzina sniženja nivoa zavisi od veličine rečnog korita i broda, a trajanje sniženja nivoa, od veličine broda i njegove brzine. (Na primer, za plovni put klase IV, projektno sniženje nivoa iznosi 0,6 m, sa trajanjem $3,3 \div 5$ s.)

(2) Kretanje broda generiše sekundarne talase, koji, kada dospeju do obaloutvrde, mogu destabilizovati površinski sloj kamenenog nabačaja.

Primećeno je da jači uticaj imaju brodovi tegljači/potiskivači od velikih teretnih plovila i barži. Ne postoji pouzdan način proračuna uticaja sekundarnih talasa, jer taj uticaj zavisi i od udaljenosti broda od obaloutvrde. Generalno, može se pretpostaviti da u najnepovoljnijem slučaju visina talasa izazvanih kretanjem brodova neće premašiti 1 m.

3.3.7 Uticaj leda

Prognoza dinamičkog opterećenja leda na konstrukciju, svodi se na procenu sile loma ledenih santi, što zahteva poznavanje fizičkih i mehaničkih svojstava leda.

Mehanička svojstva leda. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja svojstava leda pokazuju da je reč o veoma specifičnom materijalu na čiju čvrstoću utiče mnogo faktora (temperatura okoline, brzina deformacije, način formiranja unutrašnje strukture, starost i dr.).

Pod opterećenjem, led se ponaša kao elastično-plastičan materijal, u početku sa linearnom, a zatim nelinearnom vezom između napona (pritiska/zatezanja) i brzine deformacije. U plastičnoj zoni, deformacije leda su ireverzibilne. U praksi se najčešće led tretira kao idealno elastičan materijal, sa Jangovim (Young) modulom elastičnosti kao faktorom proporcionalnosti u linearnoj vezi između napona i brzine deformacije. Pri dovoljno velikom naponu, led se ponaša kao krt materijal.

Pored gustine (koja zavisi od poroznosti leda, odnosno od načina njegovog formiranja i starosti), za analizu dejstva leda na konstrukciju su od značaja sledeći parametri: modul elastičnosti (mera otpornosti na privremenu elastičnu deforma-

ciju pod uticajem aksijalne sile), Poasonov (Poisson) koeficijent (mera poprečnog širenja u zavisnosti od pritiska sabijanja), kao i čvrstoće leda – *graničnih napona* pri kojima naprezanja (pritisak, savijanje i dr.) lome led (Tabela 3.36).

Tabela 3.36: *Parametri mehaničkih svojstava leda.* [190, 191, 242].

Svojstvo leda	Oznaka	Vrednost
Gustina	ρ_i	915÷920 kg/m ³
Modul elastičnosti	E	8500÷9500 MPa
Čvrstoća na pritisak	σ_c	0,5÷20 MPa
Čvrstoća na savijanje	σ_f	0,5÷1,5 MPa
Adhezion čvrstoća	σ_a	140÷1050 kPa
Poasonov koeficijent	ν	1/3; 0,31÷0,35
Koeficijent linearnog širenja	α_i	$5 \cdot 10^{-5}/C^\circ$
Koeficijent trenja sa čvrstom podlogom	f_i	0,1÷0,5
Efektivni ugao unutrašnjeg trenja	ϕ_i	20° ÷ 45°

Izdrobljen led se ponaša kao Mor-Kulomov (Mohr-Coulomb) materijal sa linearnom vezom između tangencijalnog i normalnog napona, pri čemu efektivni ugao unutrašnjeg trenja (koji je manji od ugla mirovanja) zavisi od pritiska i istorije naprezanja, dok je kod nekonsolidovanog izdrobljenog leda kohezija zanemarljivo mala [242].

Površinske sile. Delovi ledenog pokrivača kreću se pod uticajem smičućeg napona koji izaziva strujanje vode i vetra po površini leda ispod i iznad vode. Izraz za površinske sile je [190, 242]:

$$F_d = C_d A_i \rho V^2, \quad (3.67)$$

gde je: C_d – koeficijent otpora (Tabela 3.37), A_i – površina sante (kod velikog ledenog pokrivača, dužina feča), ρ – gustina vazduha (1,225 kg/m³) ili vode (1000 kg/m³), V – brzina vazduha ili vode, definisane na referentnom odstojanju (za vetar, 10 m iznad površine vode, a za vodu, 1 m ispod nje).

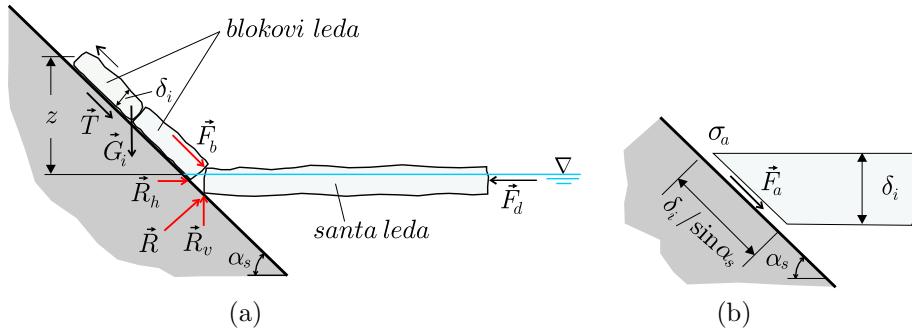
Tabela 3.37: *Vrednosti koeficijenta otpora za led* [190].

Fluid	Gladak led	Rapav led
Vazduh	0,001÷0,002	0,002÷0,003
Voda	0,002÷0,004	0,005÷0,008

Vektorskim sabiranjem sila usled strujanja vetra i vode dobija se rezultujuća sila, čiji intenzitet predstavlja horizontalno opterećenje na konstrukciju. Pri tome treba imati u vidu da ovu silu nije lako sračunati zbog velike neizvesnosti ulaznih podataka. To je još jedan od primera gde rezultate lake računске procedure treba primiti sa dosta rezerve.

Dejstvo leda na obaloutvrdu. Pri udaru sante leda o obaloutvrdu, opterećenje obloge je ograničeno čvrstoćom leda na savijanje. Naime, kada napon pri udaru

premaši čvrstoću leda na savijanje, dolazi do loma i blokovi leda se podižu uz obaloutvrdu (Slika 3.57-a).



Slika 3.57: Dejstvo leda na obaloutvrdu: (a) Sile koje deluju kao posledica udara sante i izdizanja islomljenih blokova uz kosinu obaloutvrde; (b) Adheziona sila pri zamrzavanju obloge.

Bilans sila koje deluju na kontaktu sante sa obaloutvrdom obuhvata komponente reaktivne sile (R_h, R_v) i komponente sile kojom blokovi lomljenog leda povratno deluju na santu (F_{bh}, F_{bv}) (indeksi „h” i „v” označavaju horizontalni i vertikalni pravac delovanja).

Ako je: δ_i – debljina ledenih blokova, z – visina izdizanja blokova uz kosinu koja je pod nagibom α_s , a veličine koje opisuju fizička i mehanička svojstva leda nose oznake iz Tabele 3.36, intenzitet relevantnih sila (po dužnom metru obaloutvrde [N/m]) može se računati pomoću izraza:

$$G_i = \rho_i g \delta_i \frac{z}{\sin \alpha_s} \quad - \text{težina blokova} \quad (3.68)$$

$$T_i = G_i \cos \alpha_s f_i \quad - \text{sila trenja leda o podlogu} \quad (3.69)$$

$$F_b = G_i \sin \alpha_s + T_i \quad - \text{opterećenje od blokova} \quad (3.70)$$

Komponente sile F_b su: $F_{bh} = F_b \cos \alpha_s$ i $F_{bv} = F_b \sin \alpha_s$. Vertikalna komponenta reaktivne sile definisana je poluempirijskim izrazom [242]:

$$R_v = \frac{\sigma_f \delta_i^2 + A F_{bv} + \delta_i F_{vhh}}{A - \delta_i \operatorname{tg}(\alpha_s + \phi_i)}, \quad (3.71)$$

gde su: σ_f – čvrstoća leda na savijanje, $\phi_i = \operatorname{arctg} f_i$ – ugao unutrašnjeg trenja.

Parametar $A = 6 l e^{-\pi/4}$ zavisi od dužine plutajuće sante [190, 242]:

$$l = \left[\frac{E \delta_i^3}{12 \rho g (1 - \nu^2)} \right]^{1/4}, \quad (3.72)$$

gde je: E – modul elastičnosti leda, a ν – Poasonov koeficijent (Tabela 3.36).

Horizontalna komponenta reaktivne sile je: $R_h = R_v \operatorname{tg}(\alpha_s + \phi_i)$, a ukupna horizontalna sila izazvana slomom sante leda i izdizanjem blokova uz kosinu: $F_h = R_h + F_{bh}$, jednaka je sili F_d koja deluje na santu (Slika 3.57-a).

Ukupna vertikalna sila je: $F_v = R_v - F_{bv}$. U datom računskom modelu zane-
maren je nepotpun kontakt blokova sa podlogom i nije uzeta u obzir mogućnost
akumulisanja izdobljenog leda iznad i ispod vode na mestu kontakta sante sa
konstrukcijom.

■ **Primer 3.17.** Razmatra se udar sante leda debljine $\delta_i = 0,5$ m o obaloutvrdu pod nagibom 1:2. Kriterijum je čvrstoća leda na savijanje. Neka je visina izdizanja ledenih blokova $z = 2$ m. Parametari leda imaju vrednosti: $\rho_i = 920$ kg/m³, $\nu = 0,33$, $E = 9,5 \times 10^9$ Pa, $\sigma_f = 0,7 \times 10^6$ Pa i $f_i = 0,2$. Sračunati horizontalnu i vertikalnu komponentu sile koja deluje na konstrukciju.

Rešenje. Intenzitet sila definisanih na Slici 3.57-a je: $G_i = 20181$ N/m, $G_i \cos \alpha_s = 18050$ N/m, $G_i \sin \alpha_s = 9025$ N/m, $T = 1805$ N/m, $F_b = 12635$ N/m, $F_{ah} = 11301$ N/m, $F_{av} = 5651$ N/m, $R_v = 12220$ N/m, $R_h = 9505$ N/m ($l = 10,32$ m). Ukupna vertikalna sila iznosi: $R_v - F_{bv} = 6570$ N/m, a ukupna horizontalna sila: $R_h + F_{bh} = 20806$ N/m.

Napomena: rešenje inverznog problema, kada je zadata ukupna horizontalna sila F_d , daje visinu izdizanja ledenih blokova uz obaloutvrdu z .

* * *

Drugi vid delovanja leda na obloutvrdu je zamrzavanje obloge, kada se javlja adhezija („lepljenje”) leda za oblogu. Nema puno podataka o veličini adhezionog napona; prema nekim izvorima, on kod svežeg leda iznosi: $\sigma_a = 140 \div 1050$ kPa [190]. Ako se pretpostavi da je do zamrzavanja obloge došlo na spoju sante sa obaloutvrdom (Slika 3.57-b), atheziona sila je:

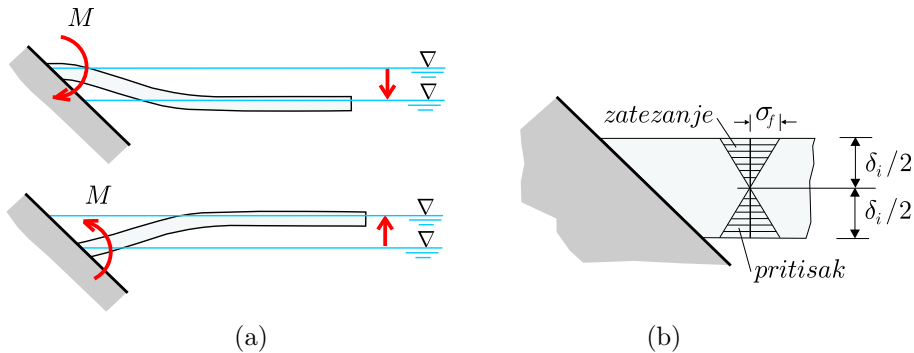
$$F_a = \sigma_a \delta_i / \sin \alpha_s \quad [\text{N/m}], \quad (3.73)$$

sa komponentama: $F_{ah} = F_a \cos \alpha_s = \sigma_a \delta_i / \operatorname{tg} \alpha_s$ i $F_{av} = F_a \sin \alpha_s = \sigma_a \delta_i$.

Za praksu može biti od interesa i slučaj nagle promene nivoa, kada se javlja moment u tački uklještenja ledene sante na zamrznutoj oblozi obaloutvrde, pri čemu usmerenje momenta zavisi od toga da li nivo raste ili opada (Slika 3.58-a). Pretpostavljajući linearni raspored napona u santi leda, najveći moment će se javiti kada napon zatezanja dostigne čvrstoću na zatezanje σ_f (Slika 3.58-b):

$$M = \sigma_f \delta_i^2 b / 6 \quad (3.74)$$

gde je: δ_i – debljina ledene sante, a b – dužina sante vezane za obalu. U projektne svrhe se može smatrati da je $\delta_i = 0,5$ m i $b = 5$ m [23]. (Ako se pretpostavi plastična deformacija, izraz za moment ima složeniji oblik.) Pucanje sante leda pod uticajem momenta savijanja povlači za sobom odvajanje elemenata obloge (ukoliko nisu dovoljno jaki) i oštećenje obaloutvrde.



Slika 3.58: Uticaj nagle promene nivoa: (a) rezultujući moment; (b) dijagrami naponskog stanja u santi leda pri naglom sniženju i podizanju nivoa vode.

Termičke sile. Kao i drugi materijali, led se širi sa povećanjem temperature i obrnuto. Međutim, za razliku od drugih materijala, voda se širi pri promeni agregatnog stanja. Ova svojstva, zajedno sa pojavom puzanja leda, objašnjavaju statičke sile koje se razvijaju pri promeni temperature leda. Slobodno linearno širenje leda kvantifikuje se kao:

$$\Delta L = \Delta T \alpha_i L, \quad (3.75)$$

gde je: L – jedna dimenzija ledene sante, ΔT – prosečna promena temperature leda i α_i – koeficijent linearnog širenja (Tabela 3.36). Kumulativno širenje leda usled temperaturnih promena doprinosi izdizanju leda uz obaloutvrdu, a između elemenata obloge (kamenih, betonskih blokova), gde je širenje leda ograničeno, razvija se pritisak koji teži da razdvoji elemente i tako naruši stabilnost obloge.

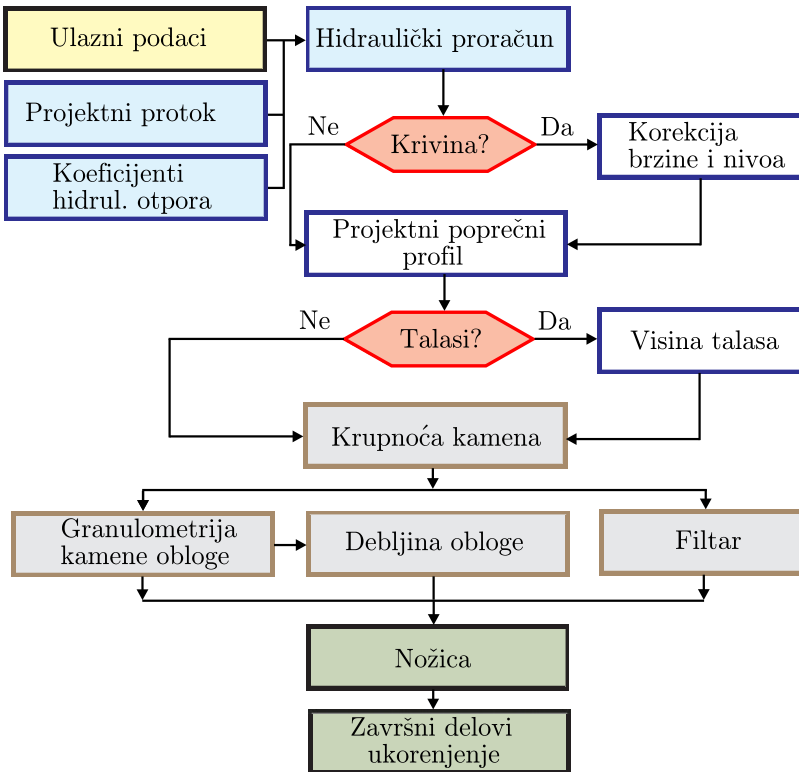
Sprečavanje nepovoljnih uticaja leda. Prethodno je pokazano da se nepovoljno dejstvo leda na obaloutvrde ogleda u oštećenju obloge usled dinamičkih sila (udara ledenih santi) i statičkih sila (athezije pri zamrzavanju elemenata obloge i sila pritiska usled temperaturnih promena). Male su mogućnosti da se nepovoljni uticaji leda u potpunosti spreče, ali se mogu formulisati neka načela kako da se ti uticaji svedu na prihvatljivu meru.

- obloga obaloutvrde sa filtarskim podslojem mora biti dovoljno masivna i kompaktna da odoli udaru ledenih santi;
- obloga treba da bude što glađa, bez mnogo izbočina za koje se led može zakačiti (pri tome, imati u vidu da glađa obloga omogućava veće izdizanje nivoa usled talasa);
- savitljiva obloga koja dozvoljava mala pomeranja elemenata (npr. kameni nabačaj), pogodna je za obaloutvrde izložene udaru santi leda;
- u zoni udara ledenih santi preporučuje se mali nagib obaloutvrde (do 15°), jer su tada sile savijanja i trenja manje; još je efikasnije rešenje da se na kritičnoj koti postavi horizontalna berma, na kojoj se nagomilava izlomljeni led, što štiti gornju kosinu obaloutvrde.

Treba napomenuti da uticaji talasa isključuju uticaje leda, pa pri projektovanju obaloutvrda ove uticaje treba odvojeno razmatrati.

* * *

Posle objašnjenja dimenzionisanja raznih tipova obaloutvrda, čini se uputno definisati i projektnu proceduru – redosled povezivanja proračuna pojedinih elemenata obalotvrde u celinu objekta (Slika 3.59).



Slika 3.59: Projektna procedura za obaloutvrde od kamenog nabačaja.

3.4 Prave paralelne građevine (PPG)

Prave paralelne građevine (PPG) grade se radi suženja korita, duž konkavne obale, ili na pravolinijskim deonicama. Pogodne su u regulaciji plovnih reka, jer suženjem korita i koncentracijom protoka, obezbeđuju neophodnu dubinu i povoljnu strujnu sliku. Poseban tip PPG su dugačke „usmeravajuće građevine” (Slika 3.60).



Slika 3.60: Usmeravajuće građevine za potrebe plovidbe na Dunavu; levo: telo PPG na sektoru Siga-Kazuk (km 1420); desno: ulegnuće krune i oštećenje usmeravajuće građevine kod Bezdana (km 1430) nastalo prelivanjem građevine u periodu velikih voda.

PPG se sastoje od tela građevine u rečnom koritu i traverzi koje vezuju telo za obalu (Slika 3.61). Kota krune PPG odgovara srednjoj vodi (Z_{sv}), što znači da se radi o prelivnoj građevini.

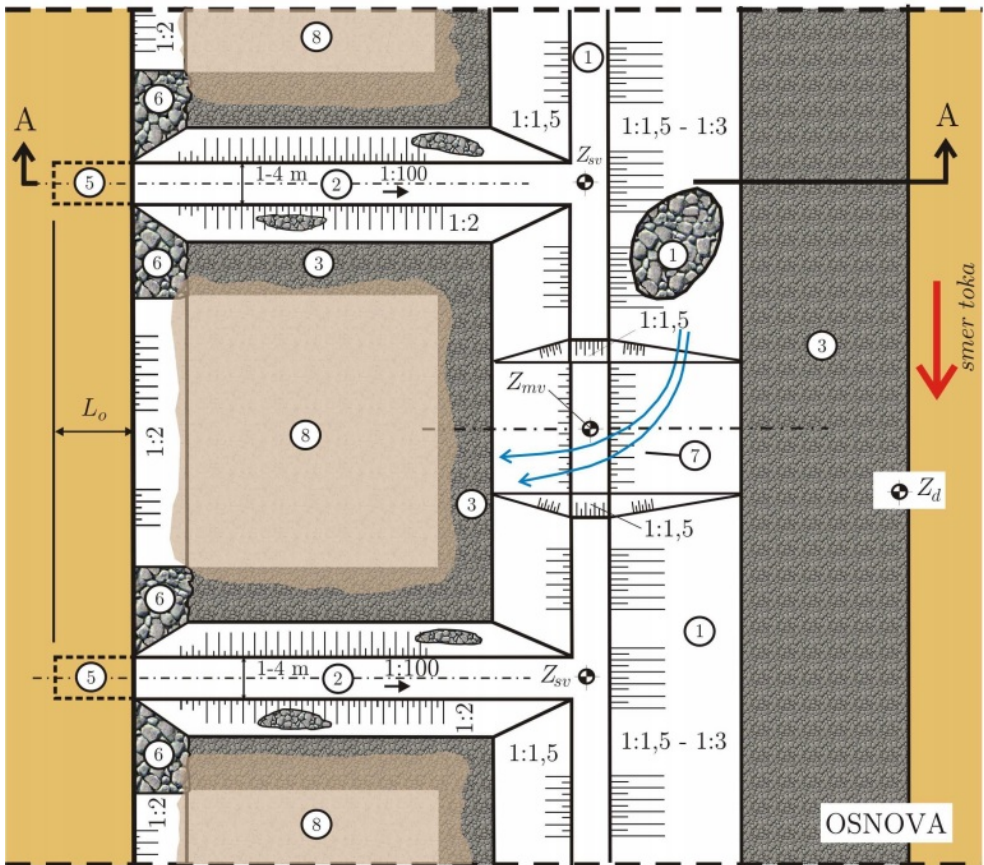
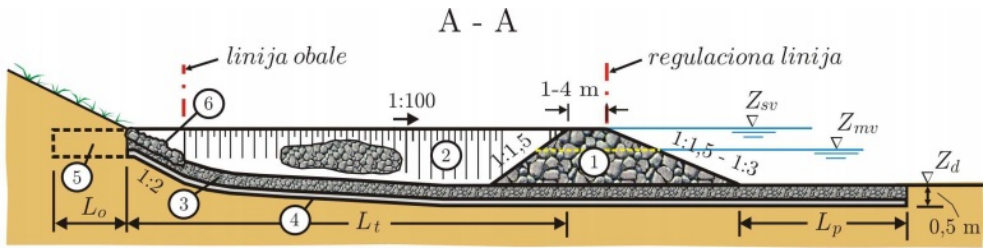
U telu građevine se ostavljaju „otvori”, sa dnom na nivou male vode (Z_{mv}), za upuštanje vode i nanosa u polja između traverzi. Dugotrajno istaložavanje nanosa u ovim poljima dovodi do formiranja „nove” obale.

Dodatnim nasipanjem do kote punog korita (Z_{svv}) stvaraju se uslovi za izgradnju obaloutvrde. U tom smislu, PPG se može shvatiti kao prelazno rešenje do izgradnje obaloutvrde.

Zbog velike dužine PPG, njeni konstruktivni elementi – telo i traverze, najčešće se grade od kamena, ređe od gabiona. Telo je trapeznog oblika, sa blažim nagibom kosine ka reci. Na Slici 3.61 prikazana je tipična prava paralelna građevina od kamena.

Kao kod nožice obaloutvrde, podloga je najčešće u vidu tepiha od tucanika (debljine 0,5 m), ređe u vidu fašinskog madraca, ili ojačanog geotekstila. Da bi se podloga mogla prilagoditi dubinskoj eroziji korita, projektuje se prepust dužine: $L_p = 3h_e + (2 \div 4)$ m, gde je h_e – prognozirana dubina erozije jame.

Zasecanjem obale, traverze su ukorenjene na dužini: $L_o = 3 \div 4$ m, sa lokalnom zaštitom obale u vidu kamenog nabačaja (Slika 3.61).



Slika 3.61: Prava paralelna građevina (PPG) od kamena: 1 – telo; 2 – traverza; 3 – tepih od šljunka; 4 – geotekstil; 5 – koren traverze; 6 – obaloutvrda za zaštitu korena traverze; 7 – otvor za upuštanje nanosa; 8 – polje između traverzi zasuto nanosom.

3.5 Naperi

Naperi su rečne regulacione građevine za suženje korita. Služe za postizanje određenih hidrauličkih efekata vezanih za preusmeravanje toka, povećanje dubine i zaštitu obale od erozije. Najbolji efekti se postižu *sistemom* napera; usamljene napere treba izbegavati.

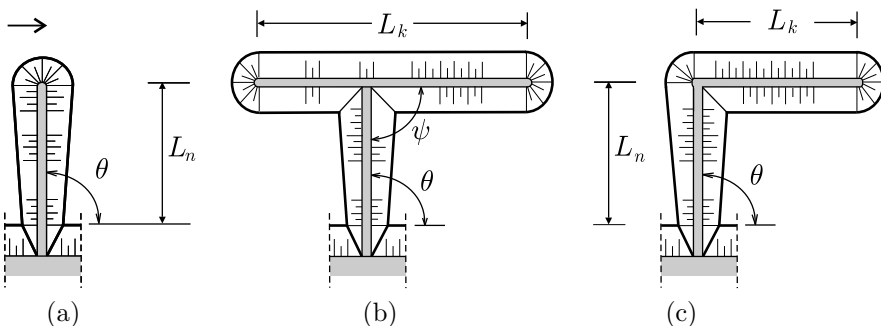
3.5.1 Tipovi, položaj i funkcija napera

Naperi se grade od kamena, gabiona, šipova i drugih materijala (Slika 3.62). Grade se upravno na obalu, ili pod određenim uglom u odnosu na obalu. Postavljaju se u pravolinijskim deonicama (duž jedne ili obe obale), kao i duž unutrašnje, konveksne obale u krivinama.



Slika 3.62: Naperi od: (a) kamena; (b) gabiona [137]; (c) cevastih šipova [268].

U projektovanju napera razmatraju se: oblik u osnovi (Slika 3.63), ugao u odnosu na obalu (θ), dužina (L_n), visina, poprečni presek i razmak (S). Naperi su *prelivne* građevine, sa kotom krune na nivou srednje vode (Z_{sv}). Od interesa su takođe materijal za telo napera (najčešće kamen) i temeljna podloga (fašinski madrac, tepih od tucanika, geotekstil).



Slika 3.63: Oblici napera: (a) prost naper; (b) naper sa krilima („T-naper“); (c) naper sa nizvodnim krilom („L-naper“).

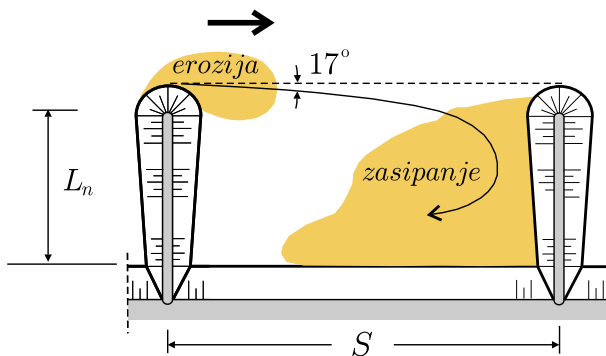
Prosti (pravi) naperi se grade pod uglom $\theta = 30^\circ \div 120^\circ$ u odnosu na obalu. Zaobljeni završni deo – „glava“ ovih napera predstavlja ojačanje građevine na mestu gde je najviše ugrožena lokalnom erozijom.

Naperi kod kojih je $\theta > 90^\circ$ zovu se „uzvodni naperi”, a kod kojih je $\theta < 90^\circ$, „nizvodni naperi”. Prvi izazivaju najveći poremećaj strujne slike kada su usmereni pod uglom $\theta = 100 \div 110^\circ$ [202] i nisu preporučljivi za plovne reke. Nizvodni naperi najmanje remete rečni tok i plovidbu. U praksi se najčešće koriste „upravni naperi” ($\theta = 90^\circ$), koji, ako su im dužina i razmak pravilno projektovani, u potpunosti daju željene hidrauličko-morfološke efekte, uz niže troškove izgradnje od troškova uzvodnih i nizvodnih napera.

Naper sa krilima (Slika 3.63), koji se skraćeno zove „T-naper”, obično ima duže uzvodno krilo od nizvodnog, da bi poremećaj strujne slike bio što manji. Grade se pod uglom $\theta = 70 \div 90^\circ$, dok se ugao krila $\psi \leq 10^\circ$ bira u zavisnosti od željenog skretanja glavnog toka.

Naperi samo sa nizvodnim krilom, u obliku slova „L”, imaju prednost u odnosu na proste napere jer izazivaju intenzivnije zasipanje međunaperskih polja i time bolje štite obalu od erozije. Manje koštaju od T-napera, a proizvode slične hidrauličke efekte, naročito kada dužina krila ispunjava uslov: $L_k = (0,45 \div 0,65) S$ [202]. Zakrivljeni naperi se kod nas retko projektuju i grade, pa se ovde neće razmatrati.

Dejstvo napera sastoji se u tome što izaziva skretanje strujnica u odnosu na osovinu glavnog toka, a prisustvo nizvodnog napera izaziva povratno (recirkulaciono) strujanje u prostoru između napera – „međunaperskom polju” (Slika 3.64). Povratno strujanje predstavlja vid sekundarnog strujanja, koje nije neprekidno, već se naizmenično stvara i nestaje. Sa porastom dužine povratnog strujanja opada brzina toka, a raste količina istaloženog nanosa. U relativno kratkom vremenu, međunaperska polja se popunjavaju nanosom i tako se spontano formira nova obala, što i jeste osnovni zadatak naperskih sistema.



Slika 3.64: Skretanja strujnica (pod tipičnim uglom od 17° kod upravnih napera) i lokalno povećanje brzine u zoni glave napera izaziva lokalnu eroziju, a posredstvom povratnog strujanja, iskopan materijal, kao i deo pristiglog suspendovanog nanosa, wlače se u međunapersko polje, gde se istaložavaju.

3.5.2 Dužina, visina i razmak napera

Već je rečeno da su naperi prelivne građevine (najčešće sa krunom glave na koti Z_{sv}), što znači da se recirkulaciona struktura toka u međunaperskim poljima može uočiti samo pri protocima koji su manji od srednje vode, dok pri prelivanju napera vlada veoma složeno *prostorno* strujanje.

Dužina napera L_n zavisi od više faktora: cilja, lokacije, konstrukcije i cene izgradnje. Razmak napera S takođe zavisi od nekoliko faktora: dužine L_n , brzine toka, uglova θ i ψ , kao i zakrivljenosti obale. Ustvari, projektni razmak napera je uslovljen dužinom recirkulacione zone, koja je teorijski reda veličine $7 \div 11$ dužine napera. Zato se razmak obično iskazuje u odnosu na dužinu napera: $S = \text{const } L_n$, pri čemu postoje iskustvene preporuke za vrednost konstante S/L_n (Tabela 3.38).

Tabela 3.38: *Iskustvene preporuke za razmak napera* [202].

Ciljevi izgradnje sistema napera	Relativni razmak napera S/L_n
Uređenje vodotoka	1,5 ÷ 8
Suženje korita za potrebe plovidbe	1,5 ÷ 2
Poboljšanje plovnih uslova, naperi sa krilima	3 ÷ 4
Zaštita obale od erozije naperima	2 ÷ 6
Kombinovana zaštita obale od erozije (naperi+obaloutvrda+vegetacija)	10 ÷ 100

Najekonomičniju zaštitu obale od erozije daje kombinacija napera, obaloutvrde i vegetacije (Tabela 3.38). Nisu preporučljivi veoma kratki naperi; npr. naperi dužine do 2 m štite svega $4 \div 12$ m obale, pa je u tom slučaju zaštita obale samo obaloutvrdom ekonomičnije rešenje.

S druge strane, ako su naperi veoma dugački, razmak može biti prevelik, tako da se između napera uopšte ne uspostavi povratno strujanje, već i dalje vlada aktivan (često meandrirajući) tok.

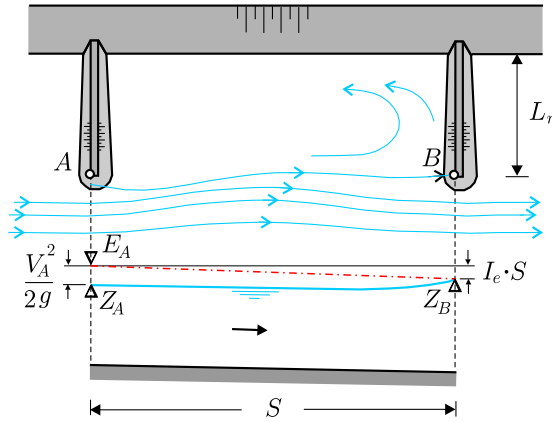
Kod malih vodotoka, postoji opasnost da suženjem korita, sistem napera izazove *opštu* eroziju korita, čak i eroziju suprotne obale. Zbog toga, relativna dužina napera u odnosu na širinu korita L_n/B predstavlja veoma važan hidraulički parametar kod projektovanja napera.

U našoj praksi važi iskustvena preporuka da razmak napera treba da bude približno jednak širini regulisanog korita: $S \approx B_r$. Primer iskustvenog projektovanja su naperi na Dunavu, gde je još pre jednog veka neko utvrdio da se željeni efekti postižu razmakom napera od $350 \div 400$ m, pa se taj podatak po inerciji decenijama koristio bez provere. Danas se efekti napera mogu efikasno proveriti pomoću numeričkih i fizičkih modela. U nastavku se pokazuje kako se za neprelivene napere može primeniti veoma jednostavna hidraulička analiza.

Upravni naperi. U početnoj fazi projektovanja ovih, u praksi najzastupljenijih napera, dovoljno je primeniti poznate zakone održanja mase i energije [31, 134]. Energetska jednačina, napisana za preseke sa tačkama A i B na Slici 3.65, ima oblik:

$$Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{V_B^2}{2g} + I_e S, \quad (3.76)$$

gde I_e predstavlja nagib linije energije na odstojanju S .



Slika 3.65: Hidraulička shema za određivanje razmaka napera; tačka B je zaustavna tačka u kojoj se kinetička energija toka transformiše u potencijalnu energiju, tako da u ovoj tački dolazi do lokalnog izdizanja nivoa koje dovodi do povratnog strujanja u međunaperskom polju.

Tačka B na glavi nizvodnog napera je zaustavna tačka u kojoj je: $V_B = 0$ i $V_B^2/2g = 0$, pa se izraz (3.76) svodi na:

$$Z_A - Z_B = -\frac{V_A^2}{2g} + I_e S. \quad (3.77)$$

Usled lokalnog izdizanja nivoa u tački B , član na levoj strani mora biti manji od nule, pa sledi uslov za pojavu povratnog strujanja u međunaperskom polju:

$$I_e S < \frac{V_A^2}{2g}. \quad (3.78)$$

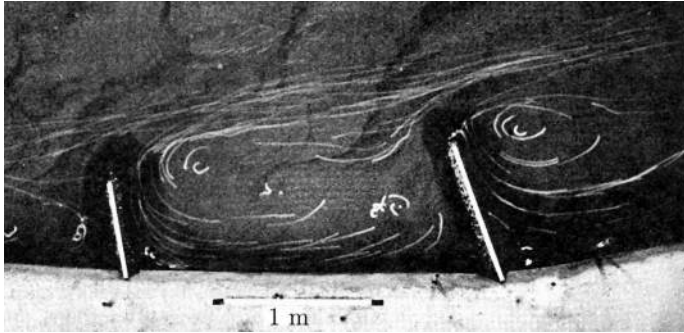
Ovaj uslov fizički znači da pad energije izazvan trenjem na odstojanju S ne sme biti veći od kinetičke energije po jedinici težine na mestu uzvodnog napera. Ako se nagib energetske linije definiše Manningovom jednačinom, sledi:

$$\frac{V_A^2 n^2 S}{R^{4/3}} < \frac{V_A^2}{2g}, \quad \text{odnosno: } S < \frac{R^{4/3}}{n^2 2g}. \quad (3.79)$$

Uvođenjem empirijskog faktora $\alpha < 1$, konačno je [92]:

$$S = \alpha \frac{R^{4/3}}{n^2 2g}. \quad (3.80)$$

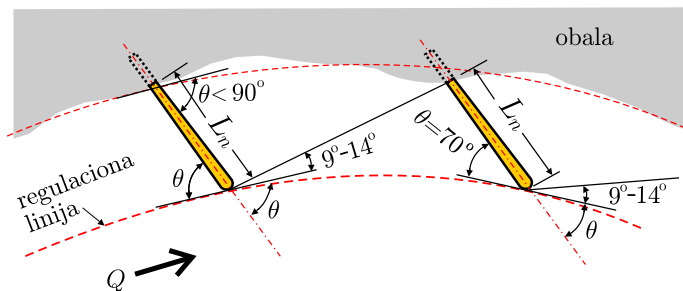
Optimalna vrednost parametra α utvrđuje se za svaki slučaj posebno. Ispitivanja pomoću fizičkih modela su pokazala da je u većini slučajeva: $\alpha \leq 0,6$ (Slika 3.66).



Slika 3.66: Strujna slika u zoni napera snimljena na fizičkom modelu [92]; ključnu ulogu ima povratno strujanje u međunapernom polju; modelska ispitivanja pokazuju da najbolje efekte daje samo jedan eliptični vrtlog, kod koga odnos duže i kraće ose nije veći od 2.

Na pravolinijskim deonicama mogu se postaviti naperi na jednoj, ili obe obale, u zavisnosti od željenog stepena suženja rečnog korita. U krivinama se, generalno, takođe mogu postavljati naperi duž jedne, ili obe obale. Međutim, u našoj praksi se u krivinama po pravilu primenjuje kombinovano rešenje: *konkavna obala se štiti obaloutrdom, a duž suprotne – konveksne obale se postavljaju naperi.*

Kosi naperi. Reč je o naperima koji se grade pod uglom $\theta \neq 90^\circ$ u odnosu na obalu. Već je rečeno da je kod „nizvodnih” napera $\theta < 90^\circ$ (Slika 3.67), a kod „uzvodnih”, $\theta > 90^\circ$. U Tabeli 3.39 su date preporučene vrednosti inklinacionog ugla θ kosih napera [199].



Slika 3.67: Shema nizvodnih napera sa inklinacionim uglom $\theta = 70^\circ$ [199].

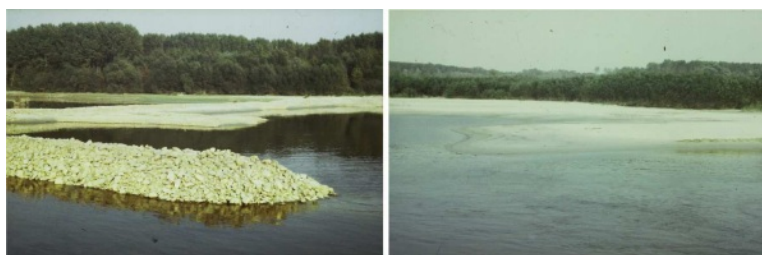
Tabela 3.39: Preporučeni inklinacioni uglovi kosih napera [199].

Autor	Tip napera	Obala u krivini	Ugao θ
United Nations (1953)	uzvodni	-	$100^\circ \div 120^\circ$
Mamak (1956)	uzvodni	-	$100^\circ \div 110^\circ$
Macura (1966)	-	konkavna	110°
		konveksna	90°
Akantisz i dr. (1989)	-	konveksna ($R/B = 8 \div 13.5$)	$45^\circ \div 65^\circ$
Maza Alvarez (1989)	nizvodni	-	70°

Naperi sa krilima. Koriste se na plovnim vodotocima (Slike 3.68 i 3.69). Naperi sa veoma dugačkim krilima omogućuju da strujna slika bude povoljna za plovidbu i predstavljaju rešenje između klasičnih napera i PPG.



Slika 3.68: Naper sa krilima na Dunavu, sektor „Neštin-Susek” (km 1290); tipična dužina uzvodnog krila iznosi $10 \div 30$ m, a nizvodnog, $20 \div 100$ m.



Slika 3.69: Naper sa krilima na Dunavu - sektor „Savulja”, (km 1350; levo: detalj završetka krila; desno: zasuto međunapersko polje.

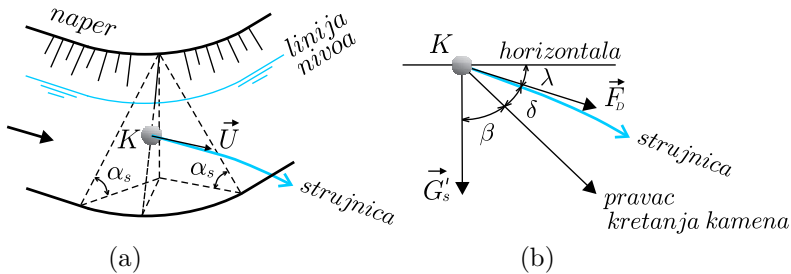
Napomena u vezi sa visinom napera. U načelu, kota krune i visina napera zavise od svrhe sistema napera, preliivanja napera tokom velikih voda i ledohoda, kao i ekonomskih uslova. Tako su na primer, na nekim sektorima Dunava kod nas naperi dimenzionisani na kotu $Z_{sv} - 1$ m, sa opravdanjem da se time postižu značajne uštede, a da su efekti isti kao kod onih napera u Mađarskoj koji su dimenzionisani na kotu srednje vode Z_{sv} .

U specifičnim slučajevima (razučena korita, proseci, rasteretni kanali, nestabilne obale), kota krune napera može da bude jednaka koti punog korita. Pri određivanju visine napera treba voditi računa o koti nivoa pri kojoj se može očekivati pojava ledenih santi, kako bi se sprečilo prelivanje santi preko tela napera i njegovo oštećenje.

3.5.3 Naperi od kamena

Telo napera. Za određivanje krupnoće kamena mogu se koristiti metode ranije opisane kod obaloutvrda. Ovde će se prikazati postupak koji je prikladan za analizu stabilnosti kamena na *zakrivljenim* delovima građevine. Tipičan primer je glava napera, koja je izložena najvećim brzinama toka.

Na Slici 3.70 prikazane su sile koje deluju na kamenu komad. Izložen dejstvu toka, ovaj komad ima tendenciju kotrljanja (pre nego klizanja), tako da se granični uslov ravnoteže definiše momentnom jednačinom (videti KI-9.2.3).



Slika 3.70: Skica za analizu stabilnosti komada kamena K na glavi napera: (a) \vec{U} – lokalna brzina toka; (b) delujuće sile: \vec{F}_D – hidrodinamička sila, \vec{G}'_s – težina kamena pod vodom.

Može se pokazati da srednju krupnoću kamena d_{50} daje rešenje sledećeg sistema jednačina [202, 220]:

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\tau_s}{\tau_{oc}} \\
 \eta' &= \eta \left(\frac{1 + \sin(\lambda + \beta)}{2} \right) \\
 \beta &= \frac{\cos \lambda}{\frac{2 \sin \alpha_s}{\eta \operatorname{tg} \phi'} + \sin \lambda} \\
 FS &= \frac{\cos \alpha_s \operatorname{tg} \phi'}{\eta' \operatorname{tg} \phi' + \sin \alpha_s \cos \beta}
 \end{aligned} \tag{3.81}$$

gde je: $\tau_{oc} = 0,047 g(\rho_s - \rho) d_{50}$ – kritični tangencijalni napon za pomeranje kamena prečnika d_{50} i gustine ρ_s ; τ_s – tangencijalni napon na kosini napera;

η – bezdimenzioni „indikator stabilnosti” – odnos tangencijalnih napona; η' – korigovani indikator stabilnosti; FS – faktor sigurnosti na prevrtanje kamenog komada (odnos momenta koji se suprostavlja rotaciji od obale ka reci i momenta koji izaziva tu rotaciju); ϕ' – ugao unutrašnjeg trenja potopljenog kamena; ostali karakteristični uglovi prikazani su na Slici 3.70.

Sistem jednačina (3.81) se rešava probanjem. Polazi se određivanjem tangencijalnog napona na kosini: $\tau_s = 0,75 \tau_o = 0,75 \rho g h I_e$ (KI-2.13). Za pretpostavljenu krupnoću kamena d_{50} , računaju se veličine: τ_{oc} , η , η' , β i FS . Postupak se ponavlja sve dok se ne dosigne željena vrednost faktora sigurnosti, npr. $FS = 1,5$.

■ **Primer 3.18.** Odrediti krupnoću d_{50} kamena za telo napera, ako su dati sledeći ulazni podaci: nagib kosine 1:3 ($\alpha_s = 18,4^\circ$); $\lambda = 20^\circ$; $\tau_o = 0,16$ kPa; $\rho_s = 2,65$ t/m³; $\phi' = 39^\circ \div 41^\circ$.

Rešenje. Tangencijalni napon na kosini je: $\tau_s = 0,75 \cdot 0,16 = 0,12$ kPa. Zadaju se vrednosti d_{50} dok se ne ispuni uslov: $FS = 1,5$, kao što je pokazano u Tabeli 3.40.

Tabela 3.40: Rezultati proračuna krupnoće kamena u primeru 3.18.

Pretp. d_{50} [m]	ϕ' [o]	tg ϕ' [-]	η [-]	tg β [-]	β [o]	η' [-]	FS [-]	Napomena
0,10	39	0,809	1,577	1,135	48,64	1,523	0,53	ne zadovoljava
0,25	41	0,869	0,631	0,637	32,53	0,566	1,09	ne zadovoljava
0,30	41	0,869	0,526	0,553	28,94	0,461	1,22	ne zadovoljava
0,45	41	0,869	0,351	0,395	21,56	0,291	1,51	zadovoljava

Napomena: Kako se obično ne raspolaže rezultatima merenja ili proračuna strujnog polja, veličina ugla skretanja strujnica λ je stvar slobodne procene. Srećom, neizvesnost tog podatka ne utiče bitno na rezultate proračuna. Inače, opisani postupak se može primeniti i za ravne površine regulacionih građevina (npr. obaloutvrda), kao specijalni slučaj kada je $\lambda = 0$.

Po određivanju vrednosti d_{50} , pristupa se definisanju granulometrijske krive, koja treba da bude glatka i ne previše razvučena: $d_{90}/d_{50} = 2$ i $d_{50}/d_{20} = 2$.

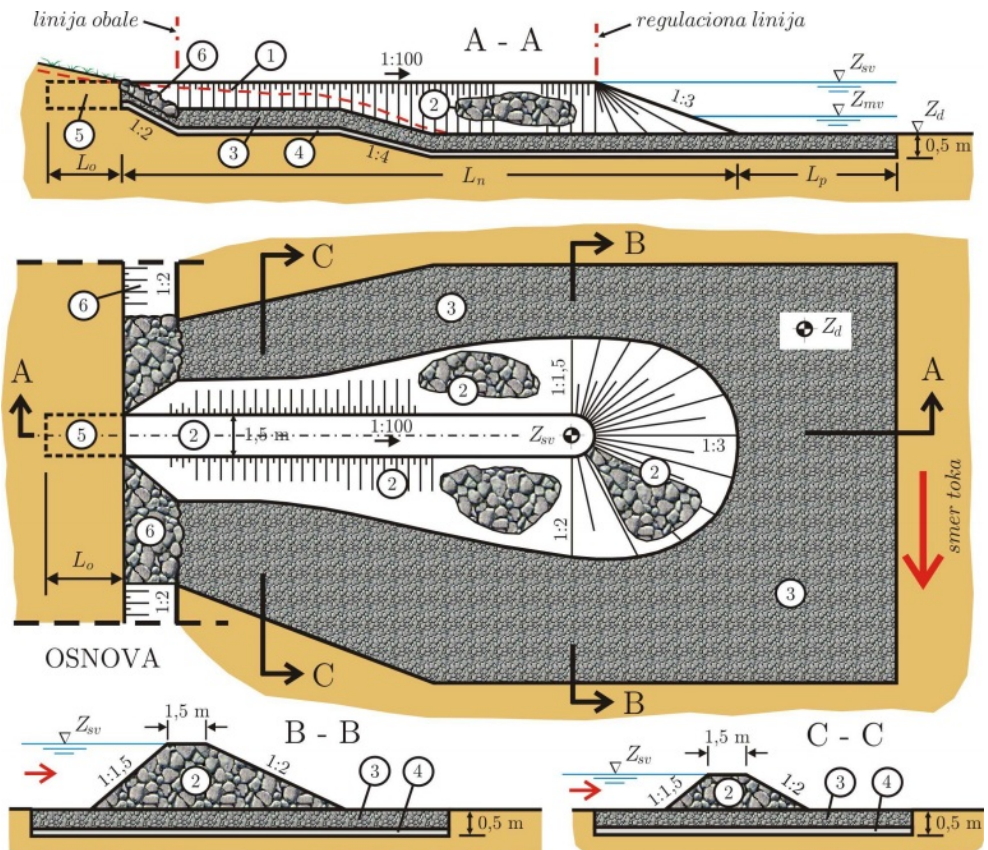
Težina najvećeg kamenog komada treba da bude 6,5 puta veća od težine kamena srednje krupnoće, dok najsitniji kamen treba da bude u kategoriji krupnog šljunka.

Filtri. Ispod kamenog tela napera postavlja se prirodni ili veštački filter. (Izuzetak je slučaj kada podloga, sama po sebi, ima karakteristike prirodnog filtra).

Peščani filtri, debljine ne manje od 0,25 m, imaju granulometrijski sastav koji se određuje na isti način kao kod obaloutvrda. Na primer, mogu se primeniti ranije definisani uslovi: $d_{50}^F/d_{50}^O < 40$; $d_{15}^F/d_{15}^O = 5 \div 40$; $d_{15}^F/d_{85}^O < 5$, gde simbol „F” označava filter, a simbol „O”, podlogu.

Filtri od geotekstila se ugrađuju u rolnama dimenzija $30 \times (3,5 \div 5,5)$ m. Krupni kameni blokovi se pri gradnji napera pažljivo polažu preko geotekstila da ga ne bi oštetili ili probili. Oblik poprečnog preseka tela napera od kamena je trapezni, sa širinom u kruni $1 \div 6$ m i nagibom kosina $1:1,25 \div 1:3$. Nagib nizvodne kosine je blaži, da bi hidraulički bio pogodan za prelivanje napera.

Završni delovi. Sastavni delovi napera su koren napera i njegovo osiguranje obaloutvrdom. Koren napera predstavlja produžetak napera ukupan u obalu. Formira se tako što se u obali, u pravcu ose napera, iskopa rov dužine nekoliko metara (zavisno od konkretnih uslova), koji se zatim ispuni kamenom. Desetak metara uzvodno i nizvodno od korena obala se štiti od erozije obaloutvrdom. Tip-ski crtež napera od kamena prikazan je na Slici 3.71. Može se zapaziti da je kruna napera u nagibu ($1:100$), kako bi se pri povlačenju velikih voda, prelivni tok usmerio ka matici reke.



Slika 3.71: Tipičan naper od kamena: 1 – linija terena; 2 – telo napera; 3 – tucanik; 4 – geotekstil; 5 – koren napera; 6 – osiguranje obaloutvrdom.

Kote krune napera na regulisanoj rečnoj deonici menjaju se u skladu sa promenom kote srednje vode, što znači da visina napera u sistemu može biti promenljiva.

3.5.4 Naperi od gabiona

Projektovanje napera od gabiona (Slika 3.72) je slično projektovanju gabionskih obaloutvrda, s tom razlikom da se mora voditi računa da su naperi prelivne građevine. Pored standardnih gabiona, za gradnju napera se mogu koristiti savitljive plastične cevi punjene peskom.



Slika 3.72: Naperi od gabiona; vremenom vegetacija ojačava vezu između naslaganih gabiona i unapređuje ekološko-estetski kvalitet ambijenta [137].

3.5.5 Uticaj napera na strujno polje i stabilnost korita

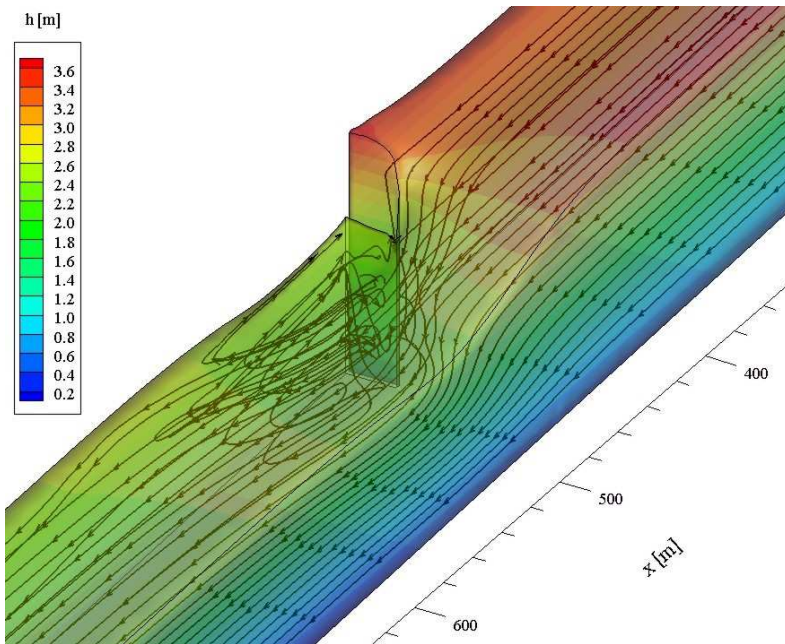
Naperi izazivaju lokalni poremećaj strujnog polja (vrtloženje i uzvodno usporenje toka), kao i lokalnu deformaciju korita (eroziju i zasipanje). Ove pojave su predmet intenzivnih izučavanja kako bi se poboljšale metode proračuna i unapredila načela projektovanja.

3.5.5.1 Vrtloženje

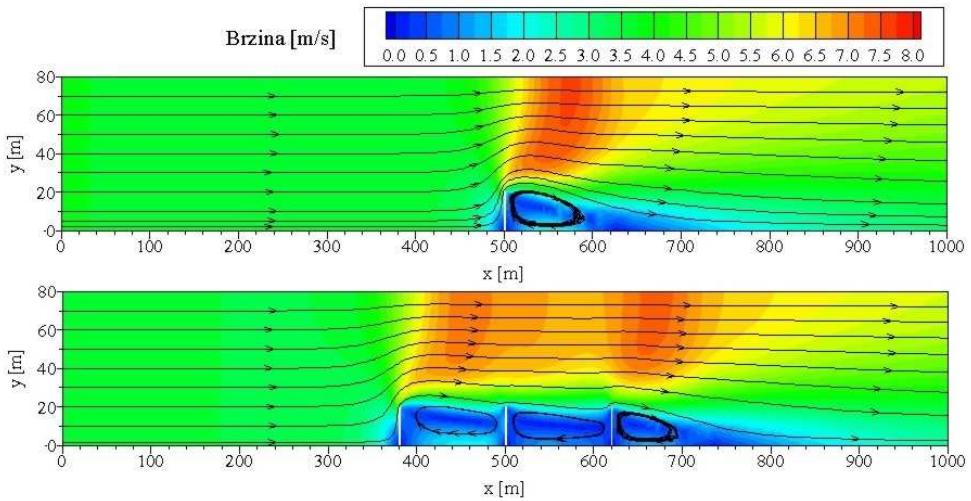
Prisustvo napera sužava korito i ubrzava glavni tok. Nizvodno od napera se formira recirkulaciona oblast (Slika 3.73). Hidraulički pokazatelj dužine recirkulacione oblasti je tzv. „*dužina pripajanja*” – odstojanje između glave napera i tačke u kojoj strujnica, skrenuta naperom, „pogađa” obalu nizvodno od napera⁵. Kvalitativno poređenje dužine pripajanja u slučaju usamljenog napera i sistema napera u istim geometrijskim i hidrauličkim uslovima prikazano je na Slici 3.74.

Na osnovu mnogih laboratorijskih ispitivanja ustanovljeno je da dužina pripajanja kod upravnih napera iznosi $7 \div 15$ dužina napera. Donja granica odgovara dugačkim naperima, a gornja, kratkim. Uzvodni naperi imaju kraće recirkulacione zone od upravnih i nizvodnih napera. U mirnom režimu tečenja, Fr broj nema velikog uticaja na dužinu i širinu recirkulacione zone. Ugao skretanja strujnice od vrha glave napera iznosi $10^\circ \div 20^\circ$. Neposredno uzvodno od napera formira se uspor; ugao pod kojim granična stujnica uspora pogađa obalu uzvodno od napera iznosi $30^\circ \div 60^\circ$, u zavisnosti od usmeranja napera.

⁵U stvarnosti, položaj „tačke pripajanja” se menja sa fluktuacijama toka izazvanim turbulencijom u graničnom sloju i gradijentima pritiska između glavnog i povratnog toka; ako se računa sa vremenski osrednjenim veličinama, tačka pripajanja je ona u kojoj brzina teži nuli.



Slika 3.73: Numerička 3D simulacija rasporeda dubine i strujnica pri ustaljenom opstrujavanju usamljenog napera u laboratorijskom kanalu (stepen suženja korita $L_n/B = 0,25$, Frudov broj $Fr = 0,27$) [110].



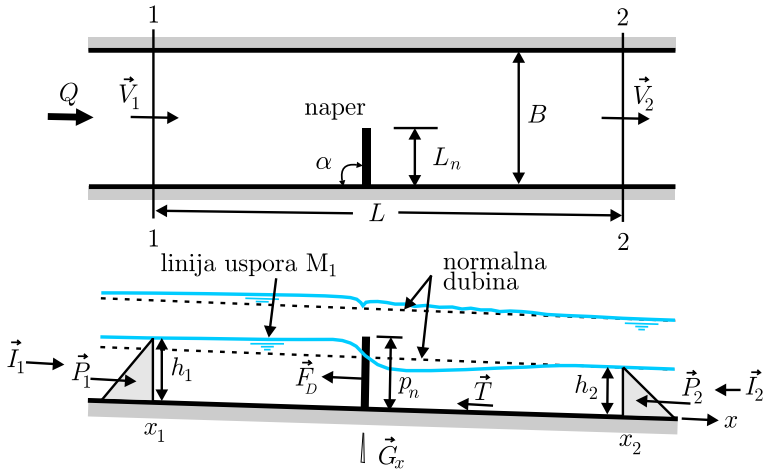
Slika 3.74: Recirkulacione zone u slučaju usamljenog napera i sistema upravnih napera [110]; prisustvo usamljenog napera ima efekat hidraulički kratkog lokalnog suženja, a sistem napera, dugačkog suženja, sa ubrzavanjem toka na dužem potezu.

Treba napomenuti da se i oko same glave napera stvaraju sekundarni horizontalni vrtlozi koji se povremeno „otkidaju” i putuju nizvodno prosečnom brzinom koja je za 1,5% veća od srednje brzine toka. Ova pojava ima za posledicu periodično oscilovanje nivoa, koje se nizvodno može registrovati na odstojanju od oko 10 dužina napera.

3.5.5.2 Usporavanje toka

Eksperimentalna istraživanja uticaja napera na uzvodno usporavanje toka zasnovane su na dve pretpostavke [9]: (i) strujanje je linijsko, ustaljeno i jednoliko, u mirnom režimu i (ii) korito je široko, prizmatično i pravolinijsko. Obe premise su uslovljene potrebom da eksperimenti budu ponovljivi, a računski model, jednostavan za širu primenu u praksi.

Polazi se od jednačine bilansa sila koje deluju na fluid unutar nepokretne kontrolne zapremine u čijem se središtu nalazi naper (Slika 3.75).



Slika 3.75: Računska shema za usamljen naper; gore: osnova; dole: uzdužni profil sa linijama nivoa pri (ne)potopljenom opstrujavanju i silama u pravcu toka koje deluju na fluid unutar kontrolne zapremine između preseka 1-1 i 2-2.

Ravnoteža sila u pravcu toka (x) definisana je izrazom:

$$P_1 - P_2 - F_D - T + G_x = I_2 - I_1, \quad (3.82)$$

gde su: P_1, P_2 – sile pritiska, F_D – sila kojom kontura deluje na fluid (u slučaju prizmatičnog korita jednaka je reakciji sile kojom tok deluje na naper), T – sila trenja, G_x – komponenta težine vode u pravcu x , $I_1 = \rho Q V_1$, $I_2 = \rho Q V_2$ – inercijalne sile, ρ – gustina vode, Q – protok, V_1 i V_2 – srednje profilske brzine.

Poznato je da je u uslovima jednolikog tečenja sila trenja u ravnoteži sa komponentom težine fluida u pravcu toka: $T = G_x$. Ova jednakost važi i u slučaju blago poremećenog (nejednolikog) toka u mirnom režimu.

Za pravougaoni poprečni presek korita (velike reke!), iz (3.82) sledi:

$$F_D = P_1 - P_2 - I_2 + I_1 = \frac{1}{2} \rho g B h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g B h_2^2 + \rho Q V_1 - \rho Q V_2, \quad (3.83)$$

gde je: B – širina korita, h_1 – dubina uspora uzvodno od napera, a h_2 – dubina nizvodno od napera, jednaka normalnoj dubini.

Sila otpora kojom naper deluje na tok jednaka je:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_n V_n^2, \quad (3.84)$$

gde je: C_D – koeficijent sile otpora, V_n – prosečna brzina onog dela toka koji „udara” naper, A_n – projekcija konture napera na vertikalnu ravan. U slučaju neprelivenog napera: $A_n = L_n h_1$, a u slučaju da je naper preliven: $A_n = L_n p_n$ (Slika 3.75). Generalno je: $V_n = \theta V_1$, gde je: V_1 – srednja profilska brzina neporemećenog toka uzvodno od napera, a faktor $\theta = 1 \div 1,2$.

Kombinujući jednačine (3.83) i (3.84), uz jednačinu kontinuiteta [9], dobija se:

$$\boxed{2 \text{Fr}_1 \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^3 - [2 \text{Fr}_1 - C_D A_r \theta^2 \text{Fr}_1 + 1] \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^2 + 1 = 0,} \quad (3.85)$$

gde je: $\text{Fr}_1 = V_1^2 / (g h_1)$ – Frudov broj, a $A_r = A_n / (h_1 B)$ – stepen suženja („blokiranja”) proticajnog profila.

Za zadate vrednosti protoka, nagiba dna, širine i rapavosti korita (na osnovu kojih se može sračunati normalna dubina h_2), kao i *poznate* vrednosti koeficijenta C_D , nelinearna jednačina (3.85) se iterativno rešava po nepoznatoj dubini h_1 , koja određuje veličinu uspora.

Opšta zavisnost koeficijenta C_D ima oblik:

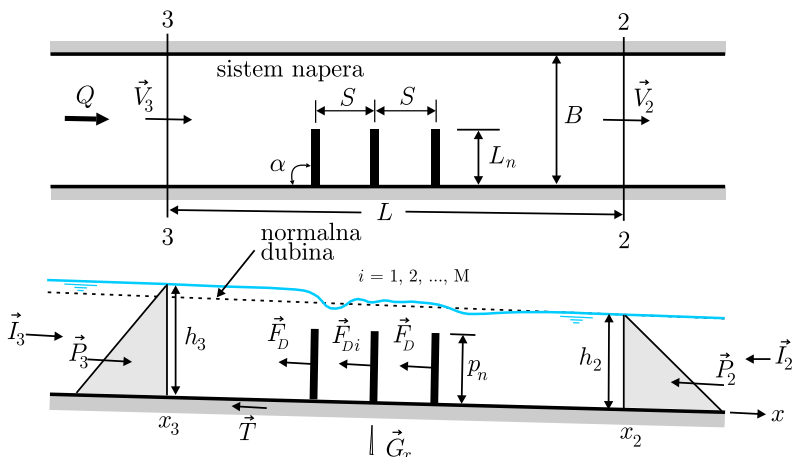
$$C_D = f_1 \left(\text{Re}_1, \text{Fr}_1, A_r, \frac{p_n}{L_n}, \frac{h_1}{p_n}, \alpha \right), \quad (3.86)$$

gde je: $\text{Re}_1 = V_1 h_1 / \nu$ – Rejnoldsov broj, $\text{Fr} = V_1^2 / (g h_1)$ – Frudov broj, p_n / L_n i h_1 / p_n – faktori izduženosti i potopljenosti napera, a α – inklinacioni ugao napera (Slika 3.75). Uticaj viskoznosti (Re-broja) je zanemarljiv, a kod nepotopljenog napera otpada parametar p_n / L_n . Ako se parametar h_1 / p_n zameni parametrom h_1 / L_n , za stepen suženja $A_r = L_n / B$ izvedena je sledeće empirijska veza [9]:

$$C_D = \begin{cases} 2,02 (1 - L_n / B)^{-3,83} (h_1 / L_n)^{0,40} - \text{nepotopljen naper} \\ 1,62 (1 - A_r)^{-2,40} (p_n / L_n)^{-0,32} (h_1 / p_n)^{-0,19} - \text{potopljen naper} \end{cases} \quad (3.87)$$

Primititi da u empirijskim izrazima (3.87) vrednost koeficijenta C_D zavisi od dubine h_1 , što znači da se pri iterativnom rešavanju jednačine (3.130) po h_1 , vrednost koeficijenta C_D u svakoj iteraciji mora korigovati.

Razmatranje uticaja usamljenog napera može se ekstrapolovati na sistem napera. Može se očekivati da pri istim uslovima, sistem napera izazove veći uspor od usamljenog napera, jer poremećaj toka zahvata dužu deonicu. To znači da uzvodna dubina h_3 na Slici 3.76 bude veća od dubine h_1 na Slici 3.75, dok nizvodne (normalne) dubine h_2 ostaju jednake u oba slučaja.



Slika 3.76: Računska shema za sistem napera; gore: osnova; dole: uzdužni profil sa silama koje deluju na fluid unutar kontrolne zapremine između 3-3 – 2-2.

Polazna pretpostavka je da za sistem geometrijski *jednakih* napera važi princip aditivnosti sile F_D , tako da je jednačina ravnoteže sila:

$$P_3 - P_2 - \sum_{i=1}^{i=M} F_{Di} - T + G_x + I_3 - I_2 = 0, \quad (3.88)$$

gde su: $P_3 = 1/2 \rho g h_3^2 B$ i $P_2 = 1/2 \rho g h_2^2 B$ – sile pritiska u koritu pravougaonog poprečnog preseka, $I_3 = \rho B h_3 V_3^2$; $I_2 = \rho B h_2 V_2^2$ – inercijalne sile, a $\sum_{i=1}^{i=M} F_{Di} = F_{D1} + \dots + F_{Di} \dots + F_{DM}$ – ukupna sila otpora sistema od M napera.

Ako se sila otpora svakog napera u sistemu (F_{Di}) normira u odnosu na silu otpora odgovarajućeg usamljenog napera (F_D), dobija se *relativna sila otpora*:

$$\eta_i = \frac{F_{Di}}{F_D} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (3.89)$$

pa je shodno tome, *ukupna relativna sila otpora*:

$$\eta_t = \frac{\sum_{i=1}^{i=M} F_{Di}}{F_D} = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i + \dots + \eta_M. \quad (3.90)$$

To znači da se u jednačini (3.88) ukupni otpor može prikazati u obliku:

$$\sum_{i=1}^{i=M} F_{Di} = F_D (\eta_1 + \dots + \eta_i + \dots + \eta_M) = F_D \eta_t = \frac{1}{2} \rho \eta_t C_D A_n (\theta V_1)^2 \quad (3.91)$$

gde je: η_t – empirijski parametar, a C_D – koeficijent otpora usamljenog napera, prethodno definisan jednačinom (3.87).

Imajući u vidu da je: $V_3 = V_1 (h_1/h_3)$ (jednačina kontinuiteta) i $G_x - T \approx 0$ (jednoliko tečenje), kombinacijom jednačina (3.88) i (3.82) sledi [10]:

$$\left(\frac{h_3}{h_1} \right)^3 - \{ 2 \text{Fr}_1 + 1 + C_D A_r \theta^2 (1 - \eta_t) \text{Fr}_1 \} \left(\frac{h_3}{h_1} \right) + 2 \text{Fr}_1 = 0. \quad (3.92)$$

Jednacina (3.92) se rešava po h_3/h_1 (što proizilazi iz relativne sile otpora). Dubina h_1 se dobija iz jednačine (3.85), a vrednost koeficijenta C_D iz jednačine (3.87).

Za jedan naper: $\eta_t = 1$, jednačina (3.92) daje $h_3 = h_1$. Jednačina (3.92) se svodi na (3.85), što proizilazi iz koncepta ekstrapolacije jednog napera na sistem napera.

Vrednosti parametra η_t je utvrđena eksperimentalno, u obliku:

$$\eta_t = f \left(\frac{S}{L_n}, \frac{h_2}{p_n}, M \right), \quad (3.93)$$

gde je, pred ranije definisanih oznaka, S – razmak napera, a M – broj napera u sistemu. Na osnovu laboratorijskih ispitivanja sa brojem napera $M = 2 \div 7$, ustanovljena je ovakva zavisnost [10]:

$$\eta_t = \begin{cases} (S/L_n)^{0,09} & \text{– nepotopljeni naperi} \\ 0,78 M^{0,38} (h_2/p_n)^{0,28} (S/L_n)^{0,11} & \text{– potopljeni naperi.} \end{cases} \quad (3.94)$$

Može se primetiti da kod potopljenih napera, na silu otpora utiče: broj, razmak i stepen potopljenosti. Kod nepotopljenih napera, broj napera (M) nema uticaja, već je samo njihov razmak. Poređenjem denivelacija sračunatih pomoću (3.92) i izmerenih na fizičkom modelu, ustanovljeno je da računске denivelacije treba povećati za oko 20% da bi rezultati proračuna i merenja bili u saglasnosti [10]. Upotrebljivost opisanog računskog modela se ogleda u mogućnosti brzog variranja projektnih rešenja, što se ilustruje jednim primerom.

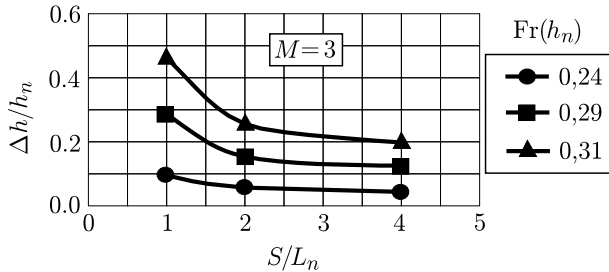
■ **Primer 3.19.** Sistem od 3 upravna napera, dužine $L_n = 25$ m i visine $p_n = 3$ m, nalazi se u koritu pravougaonog poprečnog preseka širine $B = 80$ m ($L_n/B = 0,3$), uzdužnog nagiba 0,001 i konstantne rapavosti $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3}$ s. Razmak napera je $S = 50$ m ($S/L_n = 2$). Ispitati uticaj protoka na veličinu uspora i silu otpora.

Rešenje. Rezultati proračuna dati su u Tabeli 3.41.

Tabela 3.41: Računska dubina uspora uzvodno od sistema napera.

Q [m ³ /s]	$h_2 = h_n$ [m]	h_2/p_n [-]	h_1 [m]	h_1/L_n [-]	h_3 [m]	$\Delta h =$ $h_3 - h_2$ [m]	V_1 [m/s]	Fr_1 [-]	C_D [-]	F_D [kN]	$\sum F_D$ [kN]
100	0,88	0,29	0,96	0,04	0,96	0,09	1,304	0,181	2,302	47	50
300	1,71	0,57	1,96	0,08	1,97	0,26	1,917	0,191	3,062	275	293
500	2,33	0,78	2,75	0,11	2,77	0,44	2,275	0,192	3,507	623	664

Ako se ulazni podaci iz ovog primera iskoriste da bi se ispitao uticaj drugih parametara na veličinu uspora, pa se pri istom stepenu suženja korita ($L_n/B=0,3$), varira razmak napera $S=25, 50, 100$ m ($S/L_n=1,2,4$), dobijaju se rezultati prikazani na Slici 3.77. Na sličan način se brzo može ispitati i uticaj dužine napera (odnosno, stepena suženja korita L_n/B) na veličinu uspora.



Slika 3.77: Uticaj razmaka nepotopljenih napera na relativnu denivelaciju ($\Delta h/h_n$); broj napera nije bitan, pri istom stepenu suženja korita, denivelacija raste sa protokom (vrednošću Fr broja), a smanjuje se sa povećanjem razmaka napera (S/L_n).

3.5.5.3 Deformacija korita

Uticaj napera na rečno korito sastoji se od: (a) opšte deformacije (erozije) korita usled njegovog suženja (KI-12.3.2-(12.41) i (b) lokalne erozije oko napera, koja se superponira sa erozijom usled suženja. Izučavanje ovih procesa je empirijskog karaktera, zasnovano na dimenzionoj analizi i laboratorijskom eksperimentu.

Opšta erozija korita. Ovaj vid deformacije, poznat i kao „degradacija” korita, može se proceniti pomoću empirijskih obrazaca. Jedan od njih je:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} \left(\frac{S}{L_n} \right)^{-1/7} \quad (3.95)$$

gde je: L_n – dužina projekcije napera na pravac upravan na tok, S – razmak napera, h – dubina, B – širina korita, a indeksi „1” i „2” označavaju deonicu bez napera i sa naperima. Relativno produbljenje korita izazvano pristupom sistema napera h_2/h_1 značajno opada sa povećanjem razmaka napera $S/L_n > 10$.

Lokalna erozija. Nastaje kao posledica lokalnog poremećaja strujne slike i povećanog tangencijalnog napona oko glave napera. Može se javiti u odsustvu opšte erozije, u režimu strujanja „čiste vode” ($\tau_o < \tau_{oc}$), ili u režimu „opšte

pokretnog dna" ($\tau_o \geq \tau_{oc}$, KI-12.3.1). U ovom drugom slučaju, eroziona dubina se menja tokom vremena u skladu sa trenutnim lokalnim pronosom nanosa. Proces produbljenja dna se zaustavlja kada se uspostavi ravnoteža između priliva nanosa u erozionu jamu i lokalnog transportnog kapaciteta za odnošenje nanosa iz jame. Tada se eroziona dubina menja samo usled prolaska dina (KI-12.3.1-Sl:12.16), pa se njena osrednjena vrednost zove „ravnotežna eroziona dubina” i obeležava h_{se} . Za proračun veličine h_{se} koriste se empirijski izrazi, izvedeni na osnovu laboratorijskih i terenskih merenja. Dva takva obrasca navedena su u Tabeli 3.42.

Tabela 3.42: Empirijski izrazi za eroziju oko napera [84, 59].

Ahmed, Hoffmans & Verheij (1997):

$$h_{se} + h_0 = K'_A K_A \left[\frac{q}{1 - (L_n/B)} \right]^{2/3}, \quad (3.96)$$

Gill (1972):

$$h_{se} + h_0 = h_0 \begin{cases} \alpha \left[\frac{1}{1 - (L_n/B)} \right]^{6/7} \left(\frac{\tau_o}{\tau_{oc}} \right)^{3/7} & \text{- režim „čiste vode”} \\ \alpha \left[\frac{1}{1 - (L_n/B)} \right]^{(6/7) - (3/7m)} & \text{- režim transporta.} \end{cases} \quad (3.97)$$

Na levoj strani oba obrasca figuriše zbir početne lokalne dubine toka h_0 i ravnotežne eroziona dubine h_{se} . Ovaj zbir predstavlja povećanju lokalnu dubinu vode usled erozije oko napera.

U obrascu (3.96) je: q – jedinični protok, $K'_A = 2,14 g^{-1/3} \approx 1$ [$m^{-1/3} s^{2/3}$], $K_A = 2 K_p K_s K_a K_\lambda$ – proizvod korekcionih faktora: K_p – zakrivljenosti toka (0,85 – unutrašnja obala, $1,1 \div 1,4$ – spoljašnja obala u krivini), K_s – oblika konstrukcije (1,0 – vertikalna, 0,85 – zakošena 1:1), K_a – napadnog ugla (0,80 ÷ 1,10 za uglove $30^\circ \div 150^\circ$), K_λ – poroznosti napera (0,2 ÷ 0,5).

U obrascu (3.97) figurišu: parametar prečnika zrna $\alpha = 8,375 (d_{50}/h_0)^{0,25}$ i eksponent m , koji ukazuje na intenzitet pronosa nanosa; na primer u obrascu MPM (KI-10.3.2) pronos je srazmeran brzini toka na treći stepen: $m=3$, dok je u obrascu Gončarova (KI-10.3.1-(10.10)): $m=4$.

Eroziona dubina zavisi i od tipa napera. Nizvodni naperi izazivaju manju lokalnu eroziju dna od uzvodnih. Erozione dubine, sračunate za upravne napere, mogu se korigovati pomoću podataka iz Tabele 3.43.

Tabela 3.43: Vrednosti odnosa $h_{s,\theta}/h_{s,90}$ za kose napere [202].

θ [°]:	0	30	45	60	90	120	150
$h_{s,\theta}/h_{s,90}$:	0	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,15

Dubina eroziona jame zavisi i od redosleda napera u sistemu; najveća je oko prvog uzvodnog napera (odgovara dubini usamljenog napera), a manja je kod nizvodnih napera. Rezultat istraživanja ove pojave je empirijski obrazac [222]:

$$\frac{h_{se,niz}}{h_{se,1}} = 0,07 \frac{S}{L_n} + 0,14 \quad (3.98)$$

gde je: $h_{se,1}$ – eroziona dubina prvog uzvodnog napera, a $h_{se,niz}$ – eroziona dubina bilo kog nizvodnog napera. Formula (3.98) važi u opsegu: $2 < S/L_n < 10$. Kada je $S/L_n > 12$, naperi su previše udaljeni da bi bilo međusobnog uticaja, pa se sa stanovišta lokalne erozije svaki naper može tretirati kao „usamljen”.

■ **Primer 3.20.** U koritu pravougaonog preseka širine $B = 80$ m, uzdužnog nagiba dna 0,001 i rapavosti $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, razmatra se lokalna erozija oko usamljenog upravnog napera dužine $L_n = 20$ m ($L_n/B = 0,25$) i oko sistema od 3 upravna napera iste dužine, pri protoku velike vode $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q = Q/B = 12,5 \text{ m}^2/\text{s}$, $h_0 \equiv h_n = 3,61$ m).

Rešenje. Primenjujući obrazac (3.96), sa vrednostima koeficijenata $K_p = 0,85$, $K_s = 0,85$, $K_\alpha = 1,0$, $K_\lambda = 0,5$ i $K_A = 0,72$, dobija se: $h_{se} + h_0 \approx 4,7$ m, odnosno, $h_{se} \approx 1,1$ m. Primenjujući obrazac (3.97), za prečnik zrna $d_{50} = 1$ mm i $m = 4$ (zavisnost Gončarova), dobija se: $\alpha = 1,08$, $h_{se} + h_0 = 4,83$ m, odnosno $h_{se} = 1,2$ m. Može se konstatovati da u datom slučaju oba obrasca daju slične rezultate.

Ako se pretpostavi da je ravnotežna eroziona dubina oko usamljenog napera $h_{se} = 1,2$ m, a da je u sistemu napera dužina međunaperskog polja $S = 50$ m ($S/L_n = 2,5$), primenom izraza (3.98) dobija se da se kod nizvodnih napera može očekivati eroziona dubina: $h_{se,niz} = 0,38 \approx 0,4$ m.

Vreme evolucije eroziona jame. Kod dugačkih nepotopljenih napera dinamika erozionog procesa može se definisati izrazom [84]:

$$\frac{h_s(t)}{h_{se}} = 1 - \exp \left\{ a \left(\frac{t}{t_0} \right)^{0,4} \right\}, \quad (3.99)$$

gde je: h_s – trenutna dubina eroziona jame, h_0 – dubina neporemećenog toka, $a = \ln[1 - (h_0/(h_0 + h_{se}))]$ – faktor dubine, t – vreme, t_0 – karakteristično vreme kada je $h_s = h_0$.

Eksperimentalno je utvrđena zavisnost:

$$t_0 = \frac{K h_0^2 \Delta^{1,7}}{(\alpha_t \tilde{u}_0 - \tilde{u}_c)^{4,3}}, \quad (3.100)$$

gde je: \tilde{u}_0 – brzina osrednjena po dubini h_0 , \tilde{u}_c – kritična brzina za pokretanje nanosa, $\alpha_t = 2 \div 9$ – koeficijent intenziteta turbulencije toka, $\Delta = 1,65$ – relativna gustina nanosa, a $K = 330$ – empirijski koeficijent čije dimenzije [$\text{h m}^{2,3}\text{s}^{-4,3}$] omogućavaju da se vreme t_0 izrazi u satima.

Za eroziju oko objekata u koritu (a obrazac (3.99) važi i za eroziju oko mostovskih oporaca), karakteristično je da eroziona jama vrlo brzo evoluirá – oko 80 % konačne (terminalne) eroziona dubine se formira već u prvih 25 % vremena potrebnog za dostizanje ravnotežnog stanja [84].

Za zaštitu napera od podlokavanja koristi se najčešće tepih od kamena (tucanika). Najkrupniji kamen se koristi kod prvog uzvodnog, erozijom najugroženijeg napera u sistemu. Površina eroziona jame oko glave napera može se proceniti na osnovu najveće eroziona dubine i u ugla unutrašnjeg trenja materijala na dnu korita. Prepust kamenog tepiha u zoni glave napera treba da obuhvati erozionu jamu, a nizvodno od napera, treba da obezbedi zaštitu korita od prelivnog mlaza u periodima velikih voda (Slika 3.71). Kod bujičnih vodotoka sa šljunčanim dnom, eroziona jama se sama popločava krupnim kamenom, pa tepih oko napera može biti kraći i tanji nego kod aluvijalnih vodotoka.

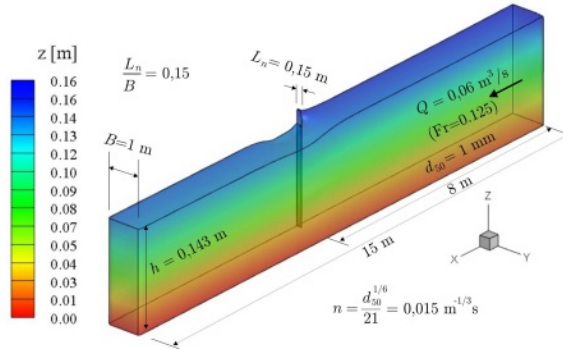
3.5.5.4 Efekti T-napera.

Već je rečeno da su kod nas na Dunavu i Savi, T-naperi standardni tip napera zbog plovidbenih uslova (Slika 3.78).

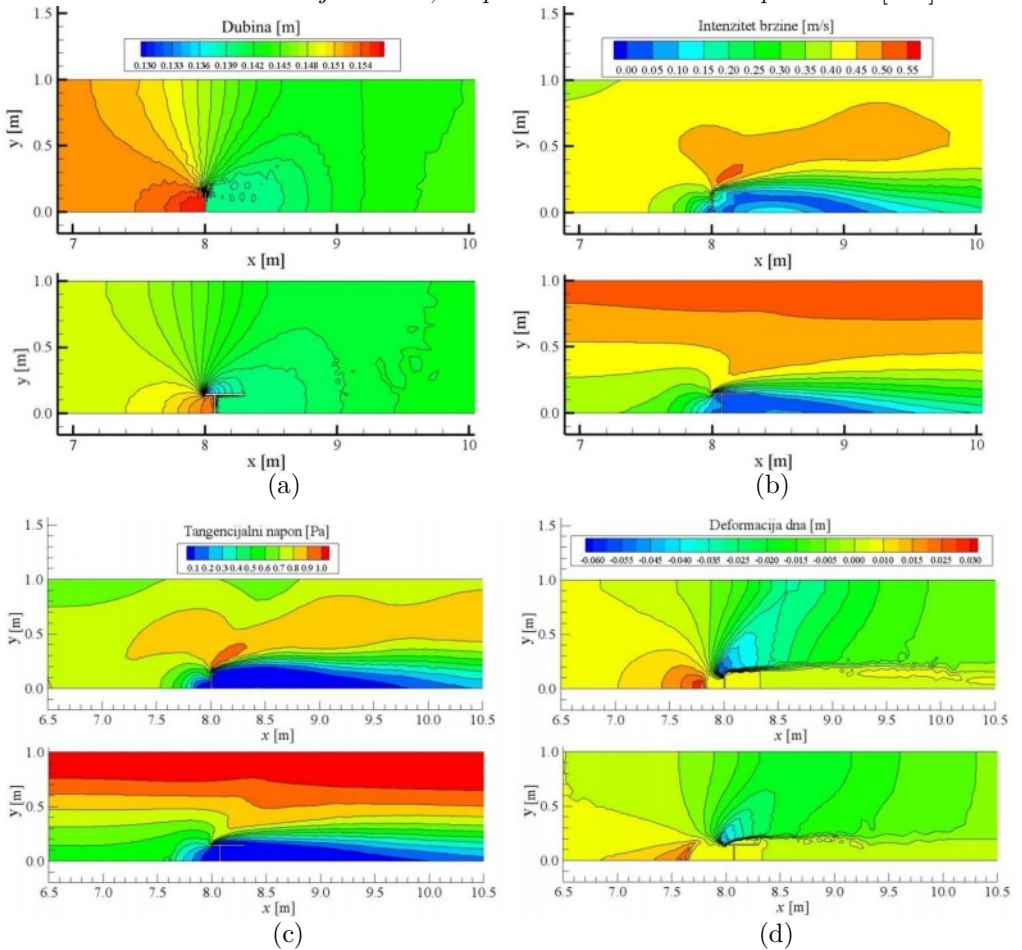


Slika 3.78: Reka Sava – sektor „Kamičak”, km 82 - km 88; nizvodni (glavni) naper dužine 260 m ima za cilj usmerenje toka ka levom, plovnom rukavcu; uzvodni, kraći naper štiti glavni naper od oštećenja pri velikim vodama koje prelivaju oba napera; svetlija boja ukazuje na zasuto, plitko korito (GoogleEarth®).

Efekti T-napera i prostog upravnog napera upoređeni su pomoću numeričke simulacije jednog laboratorijskog eksperimenta [112]. Razmatrano je strujanje u horizontalnom kanalu u kome je, pri stepenu suženja $L_n/B = 0,15$, u jednom slučaju postavljen usamljen upravni naper, a u drugom, T-naper. Dno kanala je bilo pokriveno slojem peska uniformne krupnoće. Rezultatni 3D numeričke simulacije prikazani su na Slici 3.80.



Slika 3.79: Laboratorijski kanal, eksperimentalni i računski parametri [112].

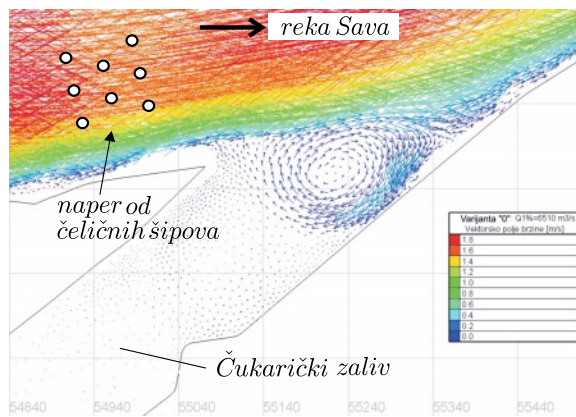


Slika 3.80: Rezultati numeričke simulacije laboratorijski ispitivanog strujanja oko prostog napera i T-napera; (a) dubina; (b) intenzitet brzine; (c) tangencijalni napon na dnu; (d) deformacija dna [112].

Proračuni pokazuju da T-naper izaziva manje uzvodno usporavanje toka i omogućava ravnomjerniji raspored brzina duž glavnog toka. U suženju povećava brzinu toka (u odnosu na srednju profilsku brzinu u koritu bez napera) za $13 \div 15\%$. Kod prostog napera, oblast povećanih brzina je ograničena (13×3 dužine napera), a oblast recirkulacionog strujanja je veća nego kod T-napera. S druge strane, T-naper izaziva manje erozije dubine (za oko 40%), a zapremina erodiranog materijala je približno dvostruko manja nego kod prostog napera [112].

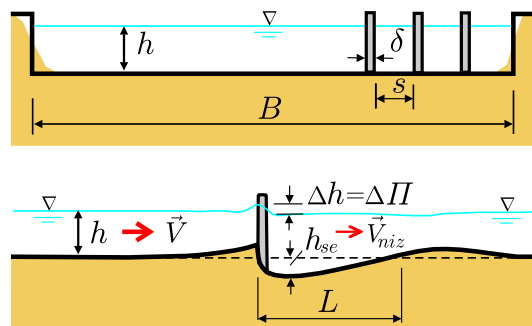
3.5.5.5 Effekti protočnih napera

Protočni naperi se sastoje od niza razmaknutih konstruktivnih elemenata (najčešće cevastih šipova) između kojih struji voda. Koriste se za stabilizaciju obale ili za smanjenje zasipanja ulaza u lučke bazene (Slika 3.81). Projektovanje ovakvih napera je empirijski zasnovano i prikazno uglavnom u ruskoj literaturi [60, 199].



Slika 3.81: Numerička simulacija recirkulacionog strujanja na ulazu u Čukarički zaliv na reci Savi [114] i protočni naper za smanjenje uvlačenje nanosa u zaliv.

Usamljeni protočni naper. Na Slici 3.82 prikazan je shematizovan pravougaoni poprečni presek rečnog korita sa protočnim naperom od cevastih šipova.



Slika 3.82: Protočni naper; poprečni presek korita i uzdužni profil.

Posmatrajući samo deo poprečnog preseka koji zauzima naper, može se napisati:

$$\begin{aligned} A_1 &= n_1 (\delta + s) h \sin \theta & - \text{protočni deo preseka pre izgradnje napera} \\ A_2 &= n_1 \delta h \sin \theta & - \text{protočni deo preseka posle izgradnje napera} \end{aligned}$$

gde je: δ – prečnik cevi, s – razmak cevi, n_1 – broj cevastih elemenata u jednom naperu, θ – inklinacioni ugao napera u odnosu na rečni tok (kod upravnih napera $\theta = 90^\circ$, $\sin \theta = 1$).

Stepen zagušenja (opstrukcije protočnosti) je:

$$p = \frac{A_2}{A_1} = \frac{n_1 \delta h \sin \theta}{n_1 (\delta + s) h \sin \theta} = \frac{\delta}{\delta + s}. \quad (3.101)$$

Iz ovog izraza se vidi da za jedan tip cevastih elemenata manji razmak (s) daje veće zagušenje. Obično je $p = 0,2 \div 0,25$. Ako je $p \geq 0,67$, naper se tretira kao neprotočan. Za $\delta = s$, $p = 0,5$.

Pad pijezometarske II-linije na mestu napera (Slika 3.82) je [60, 199]:

$$\Delta h = k_h p^{3/2} \frac{V^2}{2g}, \quad \text{ili} \quad k_h (L_n/B) p^{1/2} \frac{V^2}{2g}, \quad (3.102)$$

gde je: V – srednja profilska brzina u uzvodnom neporemećenom profilu, a k_h – parametar oblika elementa napera i vrste tla. Za cilindrične šipove u čvrstom tlu je: $k_h = 10 \div 12$, a u peščanom tlu ($d_{50} = 0,14$ mm): $k_h = 4 \div 5$.

Uticao protočnog napera na brzinu toka je definisan izrazom:

$$V_{niz} = V (1 - p) \quad (3.103)$$

u kome faktor $1 - p \leq 1$ uslovljava da nizvodna brzina bude manja od uzvodne.

Uticao protočnog napera na deformaciju korita empirijski je definisan preko najveće erozione dubine [60]:

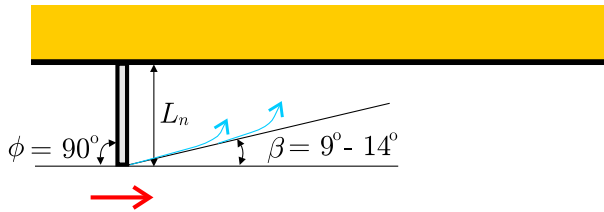
$$\boxed{h_{se} = k_t p^{3/2} \frac{V^2}{2g}} \quad (3.104)$$

gde je k_t – parametar lokalne erozije; kod cevastih šipova u peščanom koritu ($d_{50} = 0,14$ mm) je $k_t \leq 50$.

Kombinovanjem parametara iz (3.102) i (3.104) sledi: $h_{se} = k_t/k_h \Delta h = k \Delta h$, pri čemu je prema nekim ispitivanjima $k = 1,75/d_{50}$ (d_{50} u mm) [60].

Dužina lokalne deformacije rečnog dna (L) koju izaziva protočan naper zavisi od njegove dužine (L_n) i ugla skretanja strujnica (β) (Slika 3.83):

$$L = 6 L_n p \cos \beta. \quad (3.105)$$



Slika 3.83: Ugao skretanja strujnica kod upravnog protočnog napera.

Empirijski izraz (3.105) važi samo za upravne napere.

Sistem protočnih napera. Broj napera u sistemu, njihova dužina i inklinacioni ugao određuju se prema konkretnoj regulacionoj liniji i lokalnim uslovima. Razmak napera zavisi od erozione dužine: $S \leq L$. Svaki naper u sistemu ($i = 1, 2, \dots, N$) daje svoj „doprinos“ u smanjenju brzine u nizvodnom smeru:

$$\begin{aligned} i = 1 : & \quad V_{niz,1} = V(1 - p) \\ i = 2 : & \quad V_{niz,2} = V(1 - p)^2 \\ i = 3 : & \quad V_{niz,3} = V(1 - p)^3 \\ \vdots & \quad \quad \quad = \vdots \end{aligned}$$

tako da je:

$$V_{niz,i} = V(1 - p)^i \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (3.106)$$

Ako su svi naperi u sistemu isti ($p = \text{const}$, u intervalu $0,2 \div 0,25$) i dovoljno razmaknuti da se mogu smatrati skupom usamljenih napera, ukupni pad pritiska na deonici sa naperima je prema (3.102):

$$\sum_{i=1}^N \Delta h_i = k_h p^{3/2} \sum_{i=1}^N \frac{V_{niz,i}^2}{2g}. \quad (3.107)$$

Pretpostavka proste aditivnosti uticaja može se prihvatiti samo kao aproksimacija prirodnog stanja (gde su uslovi po pravilu mnogo složeniji). U praksi, poželjno je da parcijalni pad pritiska (Δh) bude ujednačen od napera do napera, kako bi bila ujednačena i lokalna erozija oko napera. U tom cilju se predlaže promenljiva dužina napera, tako da prvi naper bude *kraći* od drugog, drugi od trećeg, i tako redom u nizvodnom smeru [60, 199]:

$$L_{n,i} = L_{n,i-1} \left[1 + \frac{V_c p}{V_{i-1}(1 - p)} \right] \quad (i = 2, 4, \dots, N) \quad (3.108)$$

gde je: V_c – kritična brzina pokretanja materijala na dnu rečnog korita. Međutim, projektovanje sistema napera shodno uopštenom izrazu (3.108) ne garantuje samo po sebi da će se i postići željeni efekti. Hidraulička i psamološka složenost iziskuju da se projektno rešenje proveri pomoću fizičkog i numeričkog modela.

■ **Primer 3.21.** Razmatra se rečno korito pravougaonog poprečnog preseka širine $B = 80$ m, uzdužnog nagiba dna $I_d = 0,001$ i rapavosti $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Dno je formirano od peščanog materijala krupnoće $d_{50} = 0,14$ mm, sa kritičnom brzinom pokretanja: $V_c = 0,4$ m/s. Pod pretpostavkom jednolikog tečenja, hidraulički uslovi pre postavljanja napera dati su u Tabeli 3.44. Proceniti efekte protočnog upravnog napera sačinjenog od 4 čelične cevi prečnika $\delta = 1$ m, pobijenih na razmaku $s = 4$ m. Zatim, razmotriti sistem od $N = 3$ ovakva napera ($\theta = 90^\circ$).

Tabela 3.44: *Ulazni podaci za primer 3.21.*

Q [m ³ /s]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]	$V^2/(2g)$ [m]
300	1,71	136,52	2,20	0,25
500	2,33	186,60	2,68	0,37
1000	3,58	286,16	3,49	0,62

Rešenje. Dužina cevastog napera iznosi: $L_n = 4(\delta + s) = 4(1+4) = 20$ m. Sledi: $L_n/B = 0,25$; $p = \delta/(\delta + s) = 1/5 = 0,20$ ($1 - p = 0,80$).

(a) Usamljeni naper. Rezultati proračuna su dati u Tabeli 3.45. $L = 24$ m.

Tabela 3.45: *Rezultati proračuna za protočni naper u primeru 3.21.*

Protok	Q [m ³ /s]	300	500	1000
Lokalni pad nivoa	Δh [m]	0,09	0,13	0,22
Dubina eroziona jame (preko k_t)	h_{se} [m]	0,84	1,25	2,12
Dubina eroziona jame (preko k)	h_{se} [m]	1,10	1,64	2,78
Brzina nizvodno od napera	V_{niz} [m/s]	1,76	2,14	2,79

(b) Sistem napera. Usvojeno je odstojanje između napera $S = 20$ m ($< L = 24$ m). Naperi su istovetni: $p = 0,2$. Rezultati proračuna su dati u Tabeli 3.46. Ukupni pad nivoa ($\sum \Delta h$) iznosi u zavisnosti od protoka: 0,17, 0,25 i 0,42 m.

Tabela 3.46: *Rezultati proračuna za sistem napera u primeru 3.21.*

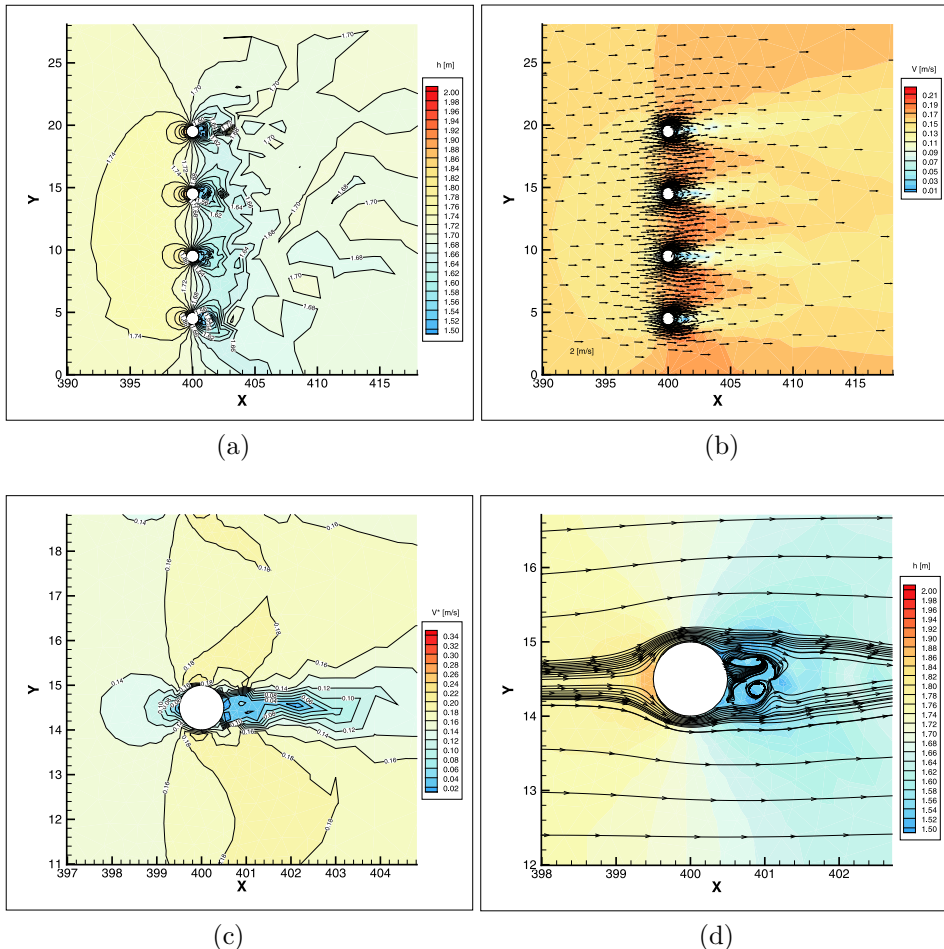
Q [m ³ /s]		100	500	1000
V_{niz} [m/s]	$i=1$	1,76	2,14	2,79
	$i=2$	1,41	1,72	2,23
	$i=3$	1,13	1,37	1,79
Δh [m]	$i=1$	0,09	0,13	0,22
	$i=2$	0,06	0,08	0,14
	$i=3$	0,02	0,03	0,06

Ako bi se koristila preporuka o promenljivoj dužini napera (3.108), za usvojenu dužinu prvog (uzvodnog) napera $L_n = 20$ m i konstantnu vrednost $p = 0,2$, sračunate su dužine ostalih napera (Tabeli 3.47). Vidi se da dužine napera neznatno rastu u nizvodnom smeru i ne zavise mnogo od protoka.

Tabela 3.47: Dužine napera u primeru 3.21.

Q [m ³ /s]		100	500	1000
Usvojena dužina prvog napera	($i=1$) [m]	20	20	20
Dužina drugog (nizvodnog) napera	($i=2$) [m]	21,42	21,17	20,90
Dužina trećeg (nizvodnog) napera	($i=3$) [m]	23,32	22,71	22,06

Savremeni softver omogućava da se, umesto primene empirijskih obrazaca, rezultati dobiju numeričkim simulacijama. Primera radi, na Slici 3.84 prikazani su rezultati proračuna 2D strujanja oko usamljenog napera iz primera 3.21. Očigledno je da ovaj pristup nudi daleko više informacija od empirijskih obrazaca.



Slika 3.84: Strujanje oko usamljenog protočnog napera iz primera 3.21 pri protoku od 300 m³/s; (a)-raspored dubine; (b)-raspored brzine; (c)-polje smičuće brzine; (d)-vrtložna zona iza cevi napera (najmanje vrednosti su prikazane plavom bojom, a najveće, crvenom bojom; softver Telemac2D) [99, 100].

3.6 Pregrade

Koncentracija protoka u razučdenim vodotocima postiže se pregrađivanjem rukavaca. Pregrade se koriste se i kod prosecanja krivina za isključenje starog korita. Visina pregrada je najčešće određena kotom srednje vode (Z_{sv}), tako da je pregrada prelivna građevina. Hidrauličkim proračunom se proveravaju njene dimenzije i projektuje zaštita rečnog korita od lokalne erozije.

3.6.1 Konstruktivni elementi pregrada

Pregrade se grade od krupnog kamena ili gabiona. Na Slici 3.85 prikazana je pregrada od kamena, a na Slici 3.86 su prikazani tipski konstruktivni elementi.



Slika 3.85: Pregrada na rukavcu Dunava kod Mohova (km 1311÷1308); izgrađena je od slaganog kamena, bez glinenog jezgra, tako da je telo pregrade vodopropusno.

3.6.2 Hidraulički proračun

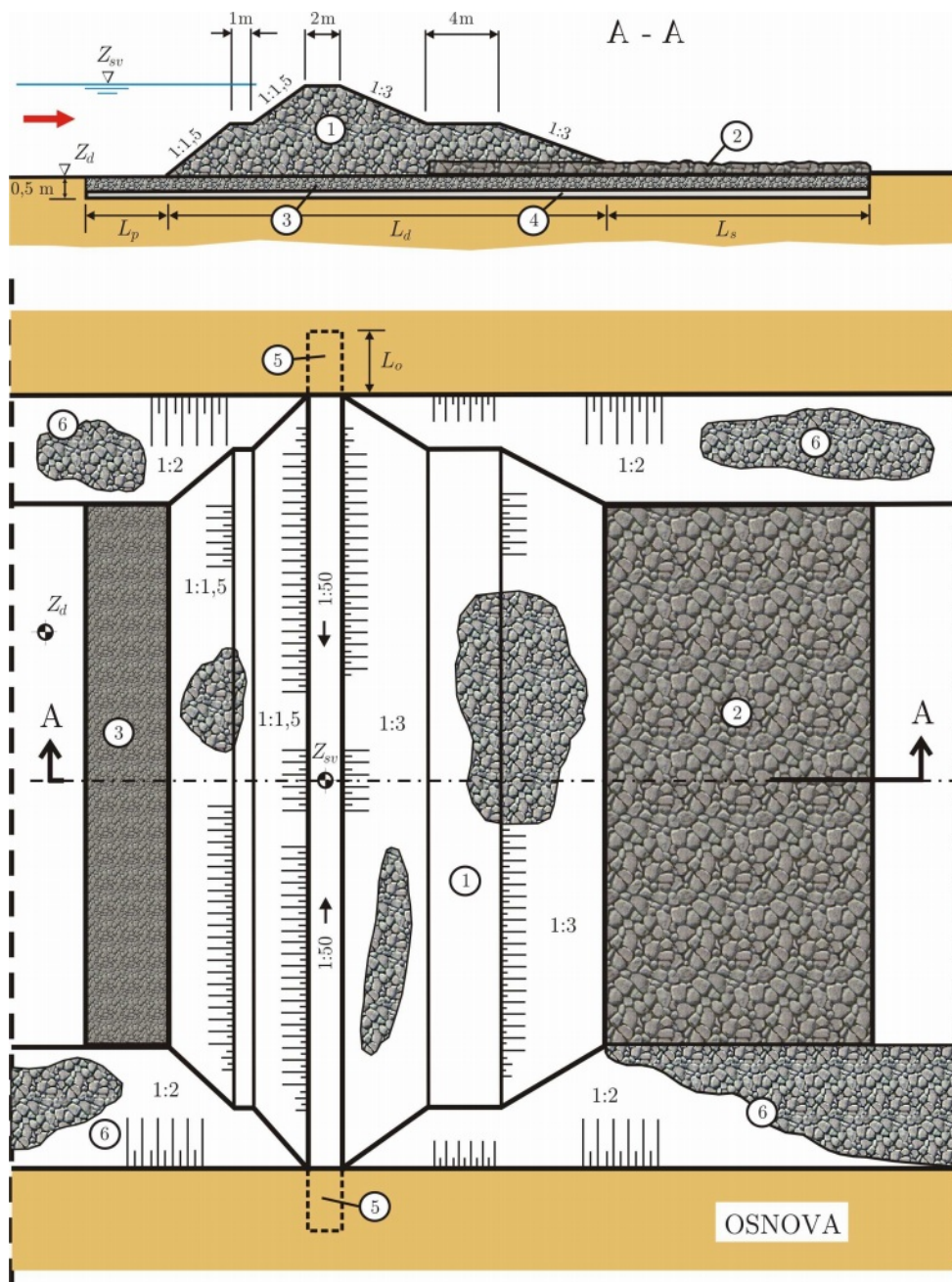
Preliv sa slapištem. Na Slici 3.87 prikazana je pregrada od gabiona sa slapištem. Visina preliva je P , a visina praga na kraju slapišta, p . Poprečni presek preliva i slapišta je pravougaoni.

Zanemarujući brzinsku visinu dolaznog toka $V_0^2/(2g)$, visina nepotopljenog prelivnog mlaza je:

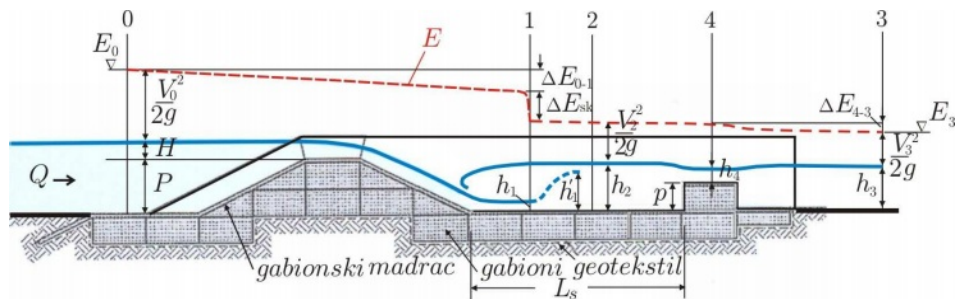
$$H = \left(\frac{Q}{\sqrt{2g} C_Q B_p} \right)^{2/3} \quad (3.109)$$

gde je: Q – projektni protok, $C_Q \approx 0,49$ – koeficijent protoka za *hidraulički oblikovanu* konturu preliva (obično je $C_Q = 0,42 \div 0,45$), B_p – širina preliva (zanemarena bočna kontrakcija prelivnog mlaza), a g – gravitaciono ubrzanje.

Ako se za referentnu ravan uzme dno slapišta, iz energetske jednačine za preseke 0 i 1, sa koeficijentom lokalnog gubitka energije ξ , dobija se brzina u podnožju preliva (presek 1).



Slika 3.86: Tipična pregrada od kamena: 1 – telo pregrade; 2 – slapište; 3 – posteljica od tucanika; 4 – geotekstil; 5 – koren pregrade; 6 – obaloutvrda.



Slika 3.87: Pregrada od gabiona sa slapištem.

$$P + H = h_1 + (1 + \xi) \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.110)$$

$$V_1 = C_V \sqrt{2g(P + H - h_1)}, \quad (3.111)$$

Koeficijent brzine je: $C_V = 1/\sqrt{1 + \xi} \approx 0,9$.

Ako se u jednačini kontinuiteta, sa širinom slapišta B_s :

$$Q = V_1 h_1 B_s, \quad (3.112)$$

brzina V_1 izrazi preko jednačine (3.111), dobija se:

$$Q = h_1 B_s C_V \sqrt{2g(P + H - h_1)}. \quad (3.113)$$

Jednačina (3.113) je nelinearna i rešava se po nepoznatoj h_1 nekom od poznatih iterativnih metoda⁶. Sa poznatom dubinom h_1 računa se odgovarajuća brzina V_1 .

Dubini h_1 odgovara konjugovana dubina h'_1 (neposredno nizvodno od skoka):

$$h'_1 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right]; \quad h_k = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g B_s^2}}. \quad (3.114)$$

gde je: h_k – kritična dubina. (Gubitak energije na hidrauličkom skoku može se sračunati pomoću izraza: $\Delta E_{sk} = (h'_1 - h_1)^3 / (4 h_1 h'_1)$ [75, 134].)

U zavisnosti od nizvodnog graničnog uslova definisanog dubinom h_3 , moguća su tri slučaja:

- (1) $h'_1 \approx h_3$ – hidraulički skok je u podnožju preliva i nestabilan;
- (2) $h'_1 < h_3$ – skok je potopljen i
- (3) $h'_1 > h_3$ – skok je odbačen.

U slučajevima (1) i (3) potrebno je projektovati prag na nizvodnom kraju slapišta kako bi se umirio prelivni mlaz i ostvario potopljen hidraulički skok – slučaj (2).

⁶Mogu se koristiti alati Goal Seek ili SOLVER (Add-In) u programu MS Excel[®].

To praktično znači da u preseku 2 mora biti dubina:

$$h_2 \geq 1,1 h'_1. \quad (3.115)$$

Postavlja se pitanje potrebne visine praga p koja obezbeđuje dubinu h_2 . Ako je prelivanje nepotopljeno, na pragu se ostvaruje kritična dubina ($h_4 = h_k$, $V_4 = V_k$), a energetska jednačina za preseke 2 i 4, rešena po protoku, ima oblik:

$$Q = m B_s \sqrt{2g} (h_2 - p)^{3/2}, \quad (3.116)$$

gde je $m = 0,34$ – koeficijent protoka za prelivanje preko širokog praga [134]. Iz jednačine (3.116) se dobija visina praga koja obezbeđuje dubinu u slapištu h_2 :

$$p = h_2 - \left(\frac{Q}{m B_s \sqrt{2g}} \right)^{2/3}. \quad (3.117)$$

Granični slučaj kada *počinje* potopljeno prelivanje praga donjom vodom definisano je Bernulijevom jednačinom za preseke 4 i 3 (Slika 3.87):

$$p' + h_k + \frac{V_k^2}{2g} = h_3 + \frac{V_3^2}{2g} + \frac{(V_k - V_3)}{2g}, \quad (3.118)$$

gde je: p' – visina praga (za ovaj slučaj), a V_k i V_3 – brzine koje odgovaraju presecima sa dubinama h_k i h_3 . Odavde sledi:

$$p' = h_3 + \frac{V_3^2}{2g} - h_k - \frac{V_k^2}{2g} + \frac{(V_k - V_3)}{2g}. \quad (3.119)$$

Rešenje za visinu praga zasniva se na upoređenju veličina p i p' i projektnom zahtevu da prelivanje praga mora biti potopljeno:

- ako je: $p' \geq p$ – prelivanje je potopljeno; visina praga p je odgovarajuća;
- ako je: $p' < p$ – prelivanje nije potopljeno; zadržava se visina p jer ona obezbeđuje potrebnu dubinu u slapištu h_2 , ali nizvodno od praga tok nije umiren i može izazvati eroziju korita; potrebno je dodatno (sekundarno) slapište sa pragom u kome bi se formirao potopljen hidraulički skok. Postupak proračuna ovog dodatnog slapišta je analogan prethodno opisanom postupku, pa se ovde neće ponavljati.

Dužina slapišta se određuje pomoću empirijskih obrazaca [134]:

$$L_s = \begin{cases} 5 h'_1 \\ 2,5 (1,9 h'_1 - h_1). \end{cases} \quad (3.120)$$

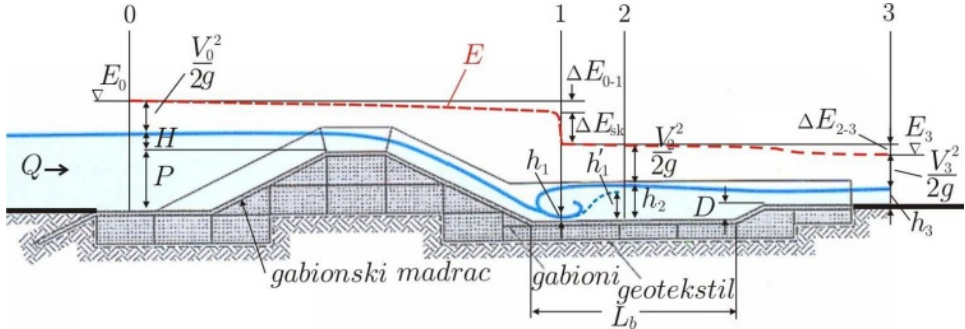
Rečno korito nizvodno od slapišta se štiti od erozije „tepihom” od krupnog kamena.

■ **Primer 3.22.** Projektovati pregradu kao što je ona na Slici 3.87 ako su dati sledeći podaci: $P = 3,5$ m; $B_p = B_s = 10$ m; $Q = 25$ m³/s; $h_3 = 1,12$ m; $V_3 = 2,23$ m/s. Usvojene vrednosti: $C_Q = 0,49$, $C_V = 0,9$, $m = 0,34$, $\xi \approx 0,2$.

Rešenje. Iz jednačine (3.109) dobija se visina prelivnog mlaza $H = 1,1$ m, a iterativnim rešavanjem jednačine (3.113), dubina u podnožju mlaza $h_1 = 0,3$ m ($V_1 = 8,26$ m/s). Kritična dubina i konjugovana dubina, sračunate pomoću izraza (3.114), iznose: $h_k = 0,86$ m ($V_k = 2,91$ m/s) i $h'_1 = 1,91$ m. Odavde sledi da je potrebna dubina za potapanje skoka: $h_2 = 1,1$ $h'_1 = 2,1$ m ($V_2 = 1,19$ m/s).

Polazeći od pretpostavke da je prelivanje praga na nizvodnom kraju slapišta nepotopljeno, rešava se jednačina (3.116) i dobija visina praga: $p = 0,70$ m. S druge strane, visina praga iz energetske jednačine (3.119) iznosi: $p' = 0,11$ m. Kako je $p' < p$, zadržava se visina praga od 0,7 m, ali se nizvodno mora dodati još jedno slapište (ili više njih), sve dok se strujanje vode u potpunosti ne umiri kroz niz potopljenih hidrauličkih skokova. (Alternativno rešenje je ukopavanje slapišta, odnosno bučnica.) Dužina prvog slapišta je: $L_s = 9,5 \approx 10$ m.

Preliv sa bučnicom. Na Slici 3.88 prikazana je pregrada od gabiona sa bučnicom u kojoj se umiruje prelivni mlaz, odnosno rasipa (disipira) višak njegove kinetičke energije. Za razliku od slapišta, bučnica je objekat koji se izvodi produbljenjem korita. Neka je bučnica pravougaonog poprečnog preseka širine B_b , sa dubinom ukopavanja D . Na početku proračuna vrednost D se pretpostavlja, pa se u toku proračuna koriguje, sve dok se ne zadovolji uslov potopljenog skoka u bučnici.



Slika 3.88: Pregrada od gabiona sa bučnicom.

Algoritam proračuna je sličan kao kod slapišta. Usvajajući dno bučnice kao referentnu energetsku ravan, osnovne jednačine su:

$$H = \left(\frac{Q}{\sqrt{2g} C_Q B_p} \right)^{2/3} \quad (C_Q = 0,49) \quad (3.121)$$

$$V_1 = C_V \sqrt{2g (D + P + H - h_1)} \quad (C_V = 0,9) \quad (3.122)$$

$$Q = V_1 h_1 B_b. \quad (3.123)$$

Kombinujući poslednje dve jednačine, dobija se nelinearna jednačina:

$$Q = h_1 B_b C_V \sqrt{2g (D + P + H - h_1)}, \quad (3.124)$$

koja se iterativno rešava po h_1 iterativno. Računa se odgovarajuća brzina V_1 . Konjugovana dubina je:

$$h'_1 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right], \quad \text{gde je: } h_k = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g B_b^2}}. \quad (3.125)$$

Potrebna dubina za potopljeni skok iznosi:

$$h_2 = 1,1 h'_1. \quad (3.126)$$

Energetska jednačina za preseke 2 i 3 ima oblik:

$$h_2 + \frac{V_2^2}{2g} = D + h_3 + \frac{V_3^2}{2g} + \Delta E_{2-3}, \quad (3.127)$$

gde su h_3 i V_3 poznate veličine zadate nizvodnim graničnim uslovom, a ΔE_{2-3} – gubitak energije između datih preseka. Kako su preseki 2 i 3 na kratkom odstojanju, trenje se može zanemariti, tako da se radi samo o lokalnom gubitku energije: $\Delta E_{2-3} = \xi V_3^2 / (2g)$.

Problem je što vrednost koeficijenta ξ nije poznata i menja se sa dubinom. Međutim, ako se obe brzinske visine u jednačini (3.127), kao i poslednji član na njenoj desnoj strani *zanemare*, rezultat će ići u prilog potopljenosti skoka u bučnici [75]. Tako se energetska jednačina redukuje na:

$$h_2 = D + h_3, \quad (3.128)$$

što pojednostavljuje proračun, a daje rezultat koji je na strani sigurnosti.

■ **Primer 3.23.** Projektovati pregradu od gabiona sa bučnicom kao što je ona na Slici 3.88, koristeći ulazne podatke iz primera 3.22 ($P = 3,5$ m, $B_p = B_b = 10$ m, $h_3 = 1,12$ m itd).

Rešenje. Visina prelivnog mlaza je: $H = 1,1$ m. Pretpostavljajući dubinu ukopavanja D , iterativno se rešava jednačina (3.124) po nepoznatoj dubini u podnožju prelivnog mlaza h_1 , a zatim, pomoću jednačine (3.125), njena konjugovana dubina h'_1 i dubina potopljenog skoka h_2 . Ova dubina se upoređuje sa dubinom koju nameće nizvodni granični uslov: $h_{2\text{rac}}$ (jednačina (3.128)) i ako nije postignuto slaganje, račun se ponavlja sa drugom vrednošću D . Rezultati su prikazani u Tabeli 3.48. Može se uočiti da je rešenje $D = 1,15$ m postignuto u sedmoj iteraciji. Dužina bučnice iznosi: $L_b = 10,3$ m, usvojeno 10,5 m.

* * *

Konstrukcije od gabiona mogu se koristiti za pregradne objekte raznih namena. Primera radi, na Slici 3.89 prikazana je pregrada izgrađena neposredno nizvodno od mosta sa ciljem da uspori tok i spreči potkopavanje mostovskih stubova.

Tabela 3.48: Rezultati proračuna u primeru 3.23

Iteracija br.	D (m)	h_1 (m)	V_1 (m/s)	h_2 (m)	V_2 (m/s)	h_{2rac} (m)
1	0,00	0,303	8,26	2,10	1,19	1,12
2	0,50	0,286	8,75	2,17	1,15	1,62
3	1,00	0,272	9,20	2,24	1,12	2,12
4	1,50	0,260	9,63	2,30	1,09	2,62
5	1,20	0,267	9,38	2,26	1,10	2,32
6	1,10	0,269	9,29	2,25	1,11	2,22
7	1,15	0,268	9,33	2,26	1,11	2,27



Slika 3.89: Prelivanje pregrade od gabiona na reci Brenta u Italiji (regija Veneto, južno od Venecije) [1, 137].

3.7 Kaskade

Kaskade su pregradni objekti na malim, bujičnim vodotocima (termin „pregrada” je u ovoj knjizi rezervisan za veće vodotoke). Sistemi kaskada se koriste za smanjenje uzdužnog nagiba dna korita, a svaka kaskada pojedinačno doprinosi rasipanju energije toka. Sistemom kaskada se može izmeniti režim tečenja, tako da se burni režim u neregulisanom vodotoku preobrazi u miran režim posle regulacije tog vodotoka.

3.7.1 Visina i broj kaskada

Visina i broj kaskada proizilaze iz uzdužnog nagiba dna projektovanog regulisanog korita. Ovaj nagib, nadalje označen kao „regulacioni” nagib I_r , zavisi od otpornosti na eroziju materijala u kome je formirano rečno korito. Ta otpornost se kvantifikuje kritičnom brzinom toka ili kritičnim tangencijalnim naponom pri kome nastaje erozija dna (Dodaci D2 i D3).

Regulacioni nagib dna I_r , koji je jednak je *ravnotežnom* nagibu dna, može se sračunati pomoću Maningove jednačine (jednoliko tečenje) u kojoj figuriše kritična

brzina za pokretanje nanosa V_c (KI-9.2.1):

$$\boxed{I_r = \frac{n^2 V_c^2}{R^{4/3}}} \quad (3.129)$$

Za trapezni poprečni presek korita, širine u dnu b i nagiba kosina m , proticajna površina zavisi od projektnog protoka (Q): $A = Q/V_c = h(b + mh)$, a dubina se računa iz kvadratne jednačine $mh^2 + bh - Q/V_c = 0$:

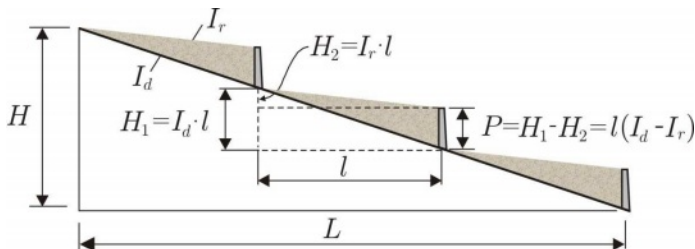
$$h_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4mQ/V_c}}{2m}. \quad (3.130)$$

Pozitivan koren predstavlja realno rešenje. Sa ovom dubinom računa se okvašeni obim: $O = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$, hidraulički radijus: $R = A/O$, a na kraju, regulacioni nagib I_r , shodno izrazu (3.129).

Za pravougaoni presek velike širine B (gde je: $R \approx h$) izraz (3.129) se svodi na:

$$I_r = \frac{n^2 V_c^{10/3} B^{4/3}}{Q^{4/3}}. \quad (3.131)$$

Na osnovu prvobitnog nagiba dna I_d i regulacionog nagiba I_r optimizuju se, uzimajući u obzir troškove izgradnje, broj i visina kaskada. Za usvojenu visinu kaskade P , iz geometrijskih odnosa na Slici 3.90, proizilazi razmak kaskada: $l = P/(I_d - I_r)$. Ako je razmak konstantan duž vodotoka, broj kaskada je: $n_k = L/l$, gde je L – dužina regulisane deonice.



Slika 3.90: Regulacioni nagib korita, visina i razmak kaskada

■ **Primer 3.24.** Projektovati stabilno korito bujičnog vodotoka, čiji je uzdužni nagib $I_d = 2,0$ %. Korito, dužine $L = 2,3$ km, formirano je u krupnom šljunku. Odrediti regulacioni uzdužni nagib I_r , visinu i broj kaskada, ako je projektni protok $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Razmotriti dva slučaja: (a) korito pravougaonog preseka širine $B = 5$ m i (b) korito trapeznog preseka, širine u dnu $b = 5$ m i nagiba kosine $m = 1,5$. U oba slučaja vrednost Manningovog koeficijenta iznosi: $n = 0,03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

Rešenje. Pri uzdužnom nagibu korita $I_d = 2\%$, tečenje je u oba slučaja u burnom režimu: (a) $h_n = 1,98$ m, $h_k = 2,17$ m, $V = 5,04$ m/s, $Fr = 1,3$; (b) $h_n = 1,46$ m, $h_k = 1,80$ m, $V = 4,78$ m/s, $Fr = 2,1$.

Postoji opasnost od erozije. Na osnovu K1-9.2.1-Tab:9.1 i Dodatka D2, usvaja se kritična brzina za krupan šljunak i kamene gromade: $V_c = 1,8$ m/s.

(a) Primenom izraza (3.131): $I_r = 0,03\%$. Ako se usvoji visina kaskade $P = 2,5$ m, dobija se ukupno $n_k = 18$ kaskada na razmaku $l = 127$ m.

(b) Pri datom protoku, površina je: $A = Q/V_c = 27,78$ m². Pozitivno rešenje jednačine (3.130) je: $h_1 \equiv h = 2,95$ m. Ostale vrednosti: $O = 15,63$ m, $R = 1,78$ m, $I_r = 0,14\%$. Tečenje je u mirnom režimu ($Fr = 0,11$). Za usvojenu visinu kaskade $P = 2,5$ m, dobija se ukupno $n_k = 17$ kaskada na razmaku $l = 134$ m.

3.7.2 Kaskade od gabiona

Vertikalne kaskade se mogu graditi od raznih materijala: kamena, betona, gabiona. Ovde se razmatraju kaskade od gabiona zbog njihovih prednosti: lake prilagodljivosti deformaciji korita i ekonomičnosti. Treba imati u vidu da je uzvodno lice gabionske kaskade „ranjivo” na udar kamenih gromada i balvana pri naglom nailasku bujice. Zaštita je obično u vidu dodatnog balasta (Slika 3.91), a prelivna ivica se može osigurati postavljanjem betonske „kape” po kruni gabionske kaskade.

Hidraulički proračun. Karakteristični uzdužni profili kaskada od gabiona sa oznakama koje se koriste u proračunu, prikazani su na Slici 3.91.

(1) *Rečno korito.* Za tečenje u koritu nizvodno od kaskade, najčešće se pretpostavlja da je ustaljeno, jednoliko. Normalna dubina (h_3) se dobija iterativnim rešavanjem Manningove jednačine:

$$\frac{nQ}{I_d^{1/2}} = A(h_3) R(h_3)^{2/3}, \quad (3.132)$$

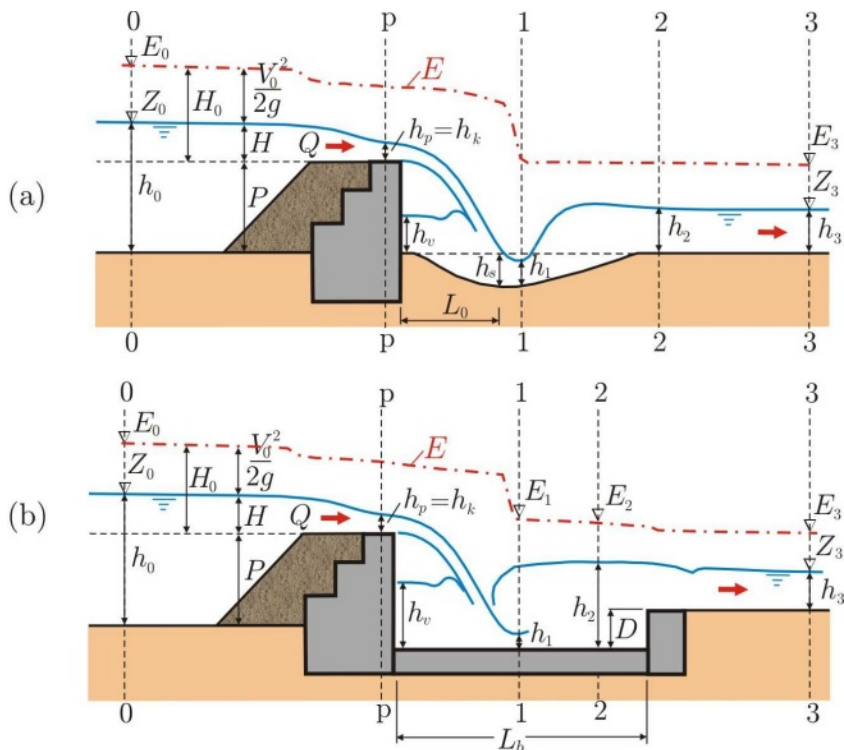
Za trapezni poprečni presek korita se koriste izrazi:

$$B = b + \frac{h_3}{\operatorname{tg} \alpha_l} + \frac{h_3}{\operatorname{tg} \alpha_d} \quad (3.133)$$

$$A = h_3 \left(b + \frac{1}{2} \frac{h_3}{\operatorname{tg} \alpha_l} + \frac{1}{2} \frac{h_3}{\operatorname{tg} \alpha_d} \right) \quad (3.134)$$

$$R \approx H = A/B, \quad (3.135)$$

gde je B – širina vodenog ogleдалa, b – širina korita u dnu, α_l , α_d – ugao nagiba leve, odnosno desne obale u odnosu na horizontalu, A – površina trapeznog preseka, R – hidraulički radijus, I_d – uzdužni nagib korita i Q – projektni protok, koji se vezuje za povratni period (do 100 godina).



Slika 3.91: Varijantna rešenja gabionskih kaskada.

(2) *Preliv*. Koriste se izrazi za prelivanje preko širokog praga. Ako je prelivanje *nepotopljeno*, dubina na prelivu je jednaka kritičnoj dubini (Slika 3.91). Za preliv *pravougaonog* preseka širine b_p biće [134]:

$$h_p \equiv h_k = \frac{2}{3} H_o = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}, \quad (3.136)$$

gde je $q = Q/b_p$ – jedinični projektni protok [m^2/s].

Za preliv *trapeznog* preseka, sa širinom u dnu b_p i uglom koji stranice zaklapaju sa horizontalom α_p , proračun kritične dubine je iterativan. Postupak:

- (1) sračunati kritičnu dubinu h_k ;
- (2) preliv: $B_p = b_p + 2 h_k / \text{tg } \alpha_p$; $A_p = h_k (b_p + h_k / \text{tg } \alpha_p)$;
- (3) preliv: $V_p \equiv V_k = Q/A_p$; i $\text{Fr} = V_p^2 / 2g$;
- (4) provera: $\text{Fr} = 1$?
- (5) vrednost h_k se koriguje i račun ponavlja, dok se ne ispuni uslov: $\text{Fr} = 1$.

Kada je rečno korito uzvodno od kaskade trapeznog preseka, proračun visine prelivnog mlaza (H) mora biti iterativan. U slučaju *nepotopljenog* prelivanja, postu-

pak je sledeći:

- (1) iz energetske jednačine za preseke 0-0 i p-p: $V_k = C_v \sqrt{2g(H_o - h_k)}$,
gde je koeficijent brzine: $C_v = 0,83 \div 1,0$;
- (2) na osnovu V_k se računa: H_o ; neka je $H_o = X$ (const);
- (3) u prvoj interakciji se pretpostavlja: $H = H_o$;
- (4) računaju se: $h_o = P + H$; $A_o(h_o)$ (3.134); $V_o = Q/A_o$; $H_o = H + V_o^2/(2g)$;
- (5) provera: $H_o = X$?
- (6) vrednost H se koriguje i račun od koraka (3) ponavlja, sve dok jednakost u koraku (5) ne bude zadovoljena.

Kod *potopljenog* preliivanja, dubina na prelivu je veća od kritične: $h_p > h_k$. Proračun postaje složeniji jer gubitak energije zavisi od stepena potopljenosti [134]. Kako potopljeno preliivanje nije preporučljivo, kaskade treba projektovati podešavanjem vrednosti h_o , P , b_p (po potrebi i lokalne vrednosti I_d), tako da donja voda ne ometa preliivanje pri projektnom protoku Q .

(3) Bazen za umirenje. Ako je rečno korito u šljunkovitom ili glinovitom tlu, a erozija u prihvatljivim granicama, nizvodno od kaskade nije potrebno osiguranje dna (Slika 3.91-a). Ako to nije slučaj, potreban je bazen za umirenje.

Najpre se računa domet prelivnog mlaza iz jednačine kosog hica [134, 210]:

$$L_o = \sqrt{2Ph_k}, \quad (3.137)$$

gde je: P – visina kaskade, a h_k – kritična dubina na prelivu kaskade. Za proračun dubina h_v i h_1 (Slika 3.91) mogu se primeniti empirijski izrazi Randa [139]:

$$\boxed{N_P = \frac{q^2}{g(P + h_s)^3}; \quad \frac{h_v + h_s}{P + h_s} = 1,00 N_P^{0,22}; \quad \frac{h_1 + h_s}{P + h_s} = 0,54 N_P^{0,425}.} \quad (3.138)$$

Eroziona dubina h_s se smanjuje ako se dubina h_2 poveća postavljanjem dodatnog (prelivnog) gabionskog bloka nizvodno od eroziona jame, na odstojanju:

$$L_b = 2,5 (P + h_p + h_s). \quad (3.139)$$

Optimalna visina ovog bloka je predmet hidrauličkog proračuna.

Za procenu dubine eroziona jame može se koristiti i empirijski izraz Šoklića (Schoklitsch, K1-12.3.3.-(12.42)), shodno oznakama na Slici 3.91-a:

$$h_s + h_3 = 4,75 \Delta H^{0,2} q^{0,57} d_{90}^{-0,32}, \quad (3.140)$$

gde je: $\Delta H = h_o - h_3$ – denivelacija, $q = Q/b_p$ – jedinični protok na prelivu, a d_{90} – karakteristični prečnik krupnog materijala iz rečnog korita.

U slučaju kada je korito veoma podložno eroziji, nizvodno od kaskade se projektuje *obložen* bazen za umirenje sa horizontalnim dnom (Slika 3.91-b). Računski postupak je sličan onom koji je opisan kod pregrada (jednačine (3.124)-(3.128)).

Ako je bazen za umirenje *trapeznog* poprečnog preseka, širine u dnu B_b i nagiba kosina $m = \text{ctg } \alpha_b$, konjugovana dubina se određuje pomoću funkcije hidrauličkog skoka [134]:

$$\Phi = \frac{Q^2}{gA_b} + A_b \hat{h}, \quad (3.141)$$

gde je A_b – površina poprečnog preseka bazena. Podsetiti se da drugi član na desnoj strani izraza (3.141) predstavlja statički moment preseka u odnosu na nivo vode, pri čemu je težišno odstojanje kod trapeznog preseka:

$$\hat{h} = \frac{h}{6} \frac{3B_b + 2mh}{B_b + mh}. \quad (3.142)$$

Konjugovana dubina h'_1 se dobija iz uslova: $\Phi(h'_1) = \Phi(h_1)$.

Dužina obloženog bazena za umirenje je: $L_b = L_1 + L_2$, gde dužina L_1 zavisi od dometa prelivnog mlaza, a dužina L_2 , od neophodnog prostora za formiranje hidrauličkog skoka (Slika 3.91-b). Za procenu navedenih dužina mogu se koristiti empirijski izrazi [139]:

$$L_1 = 4,3 P N_p^{0,27}; \quad L_2 = 6,9 (h_2 - h_1) \approx 7 (h_2 - h_1). \quad (3.143)$$

Nakon hidrauličkog proračuna, treba proveriti statičku stabilnost kaskade na klizanje i prevrtanje (videti [139]).

■ **Primer 3.25.** Uraditi hidraulički proračun kaskade od gabiona ako su dati sledeći podaci: (a) rečno korito: $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$; $I_d = 0,01$; $n = 0,033 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$; $b = 25 \text{ m}$; $\alpha_l = \alpha_d = 30^\circ$; $d_{90} = 250 \text{ mm}$; (b) kaskada: $P = 2 \text{ m}$; $b_p = 20 \text{ m}$; $\alpha_p = 45^\circ$. Prelivanje kaskade je nepotopljeno.

Rešenje. Iterativan postupak se može ubrzati pomoću alata Goal Seek programa MS Excel[®].

A. Normalna dubina u koritu nizvodno od kaskade:

Konstanta: $nQ/I_d^{1/2} = 6,6$;

U prvoj iteraciji se usvaja vrednost h_3 ; iz (3.133)-(3.135) sledi: $A, B, R, AR^{2/3}$;
Provera: $AR^{2/3} = 6,6?$ Konačno rešenje: $h_3 = 0,45 \text{ m}$; $B = 26,78 \text{ m}$; $A = 11,56 \text{ m}^2$; $R = 0,43 \text{ m}$; $AR^{2/3} = 6,60 \text{ m}^{4/3}$; $V_3 = 1,73 \text{ m/s}$; $V_3^2/(2g) = 0,15 \text{ m}$;
 $E_3 = 0,60 \text{ m}$.

B. Kritična dubina na prelivu kaskade

U prvoj iteraciji: $h_p \equiv h_k = \sqrt[3]{q^2/g} = 0,467 \text{ m}$ (pravougaoni presek);
Konačno rešenje: $h_k = 0,46 \text{ m}$; $B_p = 21,37 \text{ m}$; $A_p = 9,45 \text{ m}^2$; $V_k = 2,12 \text{ m/s}$;
 $V_k^2/(2g) = 0,23 \text{ m}$; $E_p = 2,69 \text{ m}$.

C. Dubina u koritu uzvodno od kaskade

Usvaja se: $C_v = 0,8$. Na osnovu V_k , računa se: $H_o \equiv X = 0,81 \text{ m}$.

U prvoj iteraciji: $H = H_o = 0,81 \text{ m}$;

Konačno rešenje: $H = 0,807$ m; $h_o = 2,807$ m; $A_o = 86,52$ m²; $V_o = 0,23$ m/s; $V_o^2/(2g) = 0,003$ m; $H_o = 0,810$ m; $E_o = 2,81$ m.

D. Bazen za umirenje

$\Delta H = h_o - h_3 = 2,36$ m. Prema (3.140): $h_s = 8,3$ m! Potrebno je osiguranje u vidu bazena za umirenje (Slika 3.91-b). Neka je bazen pravougaonog poprečnog preseka širine $B_b = 20$ m. Rezultati iterativnog određivanja dubine bučnice D dati su u Tabeli 3.49.

Tabela 3.49: Rezultati proračuna u primeru 3.25

Iteracija broj	D (m)	h_1 (m)	V_1 (m/s)	h_2 (m)	V_2 (m/s)	h_{2rac} (m)
1	0,00	0,154	6,50	1,19	0,84	0,45
2	0,50	0,141	7,10	1,25	0,80	0,95
3	0,60	0,139	7,21	1,26	0,79	1,05
4	0,80	0,135	7,43	1,28	0,78	1,25
5	0,85	0,134	7,49	1,29	0,78	1,30

Na osnovu (3.138), za $h_s = 0$ dobija se $N_P = 0,013$, pa iz (3.143) sledi: $L_1 \approx 2,7$ m i $L_2 \approx 8,2$ m. Dužina bazena za umirenje iznosi: $L_b = 2,7 + 8,2 = 10,9 \approx 11$ m.

* * *

Vertikalne kaskade se standardno koriste u bujičarstvu za smanjenje brzine i zadržavanje vučenog nanosa. Tipični primeri bujičnih pregrada (kaskada) prikazani su na Slici 3.92.



Slika 3.92: Primeri bujičnih pregrada od gabiona [1].

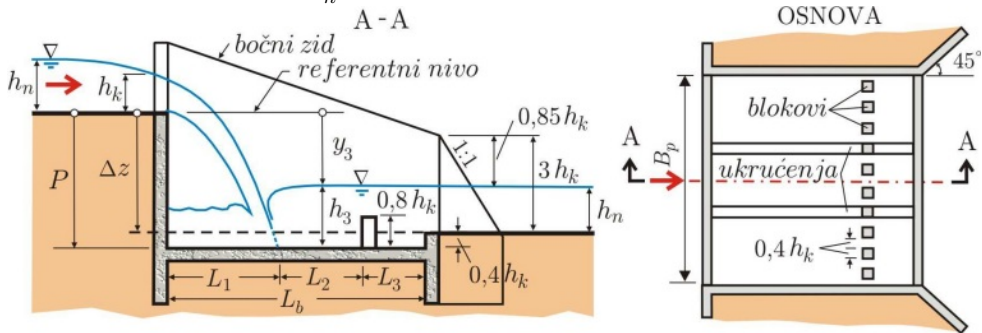
3.7.3 Tipske betonske kaskade

U svetu se za male vodotoke često koriste *tipske* vertikalne kaskade od betona, čije su dimenzije i konstruktivne karakteristike proverene u laboratorijama i u praksi. Jedna od napoznatijih je kaskada tipa SAF, projektovana u Hidrauličkoj laboratoriji St. Anthony Falls, Univerziteta u Minesoti [48]. Visine do 5 m i širine koja je jednaka širini korita, ove kaskade su relativno lake za izvođenje i efikasne u eksploataciji.

Za dobro funkcionisanje je neophodno da prelivni mlaz bude ovazdušen („aerisan“). Zahvaljujući blokovima za umirenje, bazen nizvodno od kaskade ima relativno malu dužinu. Osnovni empirijski uslov za ovaj tip kaskade je:

$$h_3 = 2,15 h_k \quad (3.144)$$

gde je: h_3 – dubina u bazenu za umirenje, $h_k = \sqrt[3]{q^2/g}$ – kritična dubina na prelivu pravougaonog preseka (Slika 3.93), a $q = Q/B_p$ – jedinični protok na prelivu. Podrazumeva se da je uzvodno i nizvodno od kaskade tečenje jednoliko, sa normalnom dubinom h_n .



Slika 3.93: Konstrukcija kaskade tipa SAF. Ograničenja primene: $P < 5$ m, $P/h_k = 1 \div 15$, $B_b > 1,5 h_k$ [48].

Prvo se proverava da li je pad na mestu kaskade koji obezbeđuje uzdužni nagib stabilnog regulisanog korita Δz , dovoljan da bude jednak visini kaskade P , a da pri tome bude ispunjen uslov (3.144). Definišući krunu preliva kao referentni nivo (Slika 3.93), računa se najpre rezerva u odnosu na donju vodu: $y_3 = -\Delta z + h_n$, a zatim potrebna visina preliva: $P = y_3 - h_3$ (zbog usvojenog referentnog sistema, vrednosti su negativne). Ukoliko je potrebno, dno bazena za umirenje se ukopava da bi se ostvarila potrebna visina preliva.

Ukupna dužina bazena za umirenje je: $L_b = L_1 + L_2 + L_3$, gde se karakteristične dužine, prikazane na Slici 3.93, računaju pomoću empirijskih obrazaca:

$$L_1 = (L_f + L_s)/2; \quad L_2 = 0,8 h_k; \quad L_3 \geq 1,75 h_k; \quad (3.145)$$

$$L_f/h_k = -0,406 + \sqrt{3,195 - 4,368 P/h_k}; \quad (3.146)$$

$$L_t/h_k = -0,406 + \sqrt{3,195 - 4,368(y/h_k)}; \quad (3.147)$$

$$L_s/h_k = \frac{0,691 + 0,228 (L_t/h_k)^2 - (P/h_k)}{0,185 + 0,456 (L_t/h_k)}. \quad (3.148)$$

Blokovi u bazenu za umirenje su kvadratnog oblika u osnovi, visine $0,8 h_k$ i dužine $0,4 h_k$. Postavljaju se na međusobnom razmaku $0,4 h_k$, koliko iznosi i visina stepenika na kraju bazena za umirenje. U bazenu se mogu staviti podužna ukrućenja.

Na nizvodnom kraju, visina bočnog zida je najmanje $3h_k$, sa rezervom u odnosu na donju vodu $0,85h_k$ (Slika 3.93).

■ **Primer 3.26.** Uzdužni nagib regulisanog korita $I_d = 0,002$ treba da obezbedi niz kaskada. Lokalni pad na mestu svake kaskade treba da bude $\Delta z = 1,8$ m. Poprečni presek regulisanog korita je trapeznog oblika, širine u dnu $b = 4$ m, sa nagibom kosina 1:2. Rapavost korita po Maningu je: $n = 0,03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Dimenzionisati kaskadu tipa SAF, za projektni protok $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rešenje. Proračunom jednolikog tečenja u regulisanom koritu dobijena je normalna dubina: $h_n = 1,20$ m ($Fr = 0,2$ – mirno tečenje). Usvajajući da je širina preliva kaskade jednaka širini u dnu regulisanog korita: $B_p = b = 4$ m, dobija se kritična dubina ne prelivu: $h_k = 0,86$ m. Na osnovu (3.144) proizilazi da je potrebna dubina u bazenu za umirenje: $h_3 = 1,85$ m.

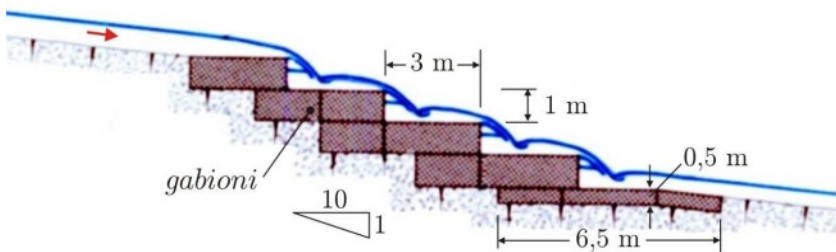
Provera: $P = \Delta z \equiv 1,8$ m? Rezervna visina: $y_3 = -1,8 + 1,20 = -0,6$ m.

Potrebna visina preliva kaskade je: $P = y_3 - h_3 = -0,6 - 1,85 = -2,45$ m, što znači da visina Δz nije dovoljna i da se dno bazena mora ukopati za $0,65$ m. Usvaja se $P = -2,5$ m ($P/h_k = -2,91$), pa je: $y_3 = P + h_3 = -2,5 + 1,85 = -0,65$ m ($y_3/h_k = -0,76$).

Primenjujući izraze (3.146)–(3.148), sledi: $L_f = 3,08$ m; $L_t = 1,84$ m; $L_s = 3,44$ m; $L_1 = 3,26$ m; $L_2 = 0,69$ m; $L_3 = 1,51$ m. Ukupna dužina bazena za umirenje: $L_b = 5,45$ m $\approx 5,5$ m. Usvaja se ukupno 4 bloka visine $0,8h_k \approx 0,7$ m, dužine stranice $0,4h_k \approx 0,4$ m. Blokovi su na razmaku od $0,4$ m (sa $2 \times 0,6$ m do bočnih zidova bazena). Visina bočnih zidova na kraju bazena iznosi: $3h_k \approx 2,6$ m, sa rezervom iznad nivoa donje vode od $0,73$ m.

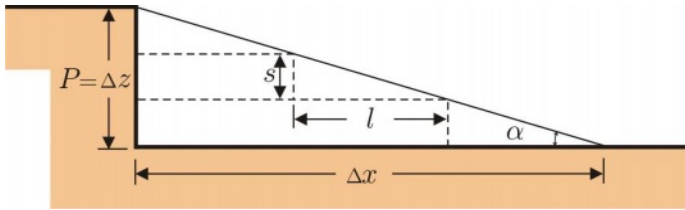
3.7.4 Stepenaste kaskade

Kada je lokalni pad na mestu kaskade veliki, ili kada se u urbanim područjima postave određeni estetski zahtevi, preporučuje se izgradnja stepenastih kaskada (Slika 3.94), kod kojih se rasipanje energije postepeno obavlja prilivanjem preko niza stepenika.



Slika 3.94: Primer stepenaste kaskade od gabiona [1].

Na Slici 3.95 prikazana shema za određivanje broja, visine i dužine stepenika.



Slika 3.95: Shema za projektovanje stepenastih kaskada.

Dužina stepenaste kaskade Δx određuje se na osnovu poznatog pada $P = \Delta z$ i uslova: $\alpha = 10^\circ \div 52^\circ$. Dužina l i visina s stepenika se usvajaju tako da bude zadovoljen empirijski uslov: $s/l = 0,2 \div 1,3$ [28].

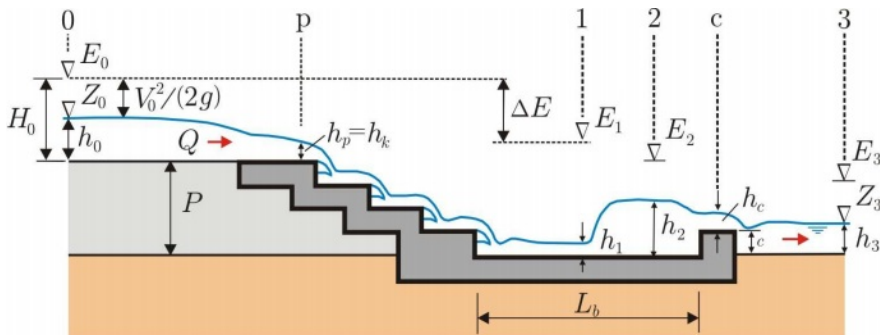
Hidraulički uslovi nizvodno i uzvodno od stepenaste kaskade se računaju kao kod „običnih“ kaskada. Pretpostavlja se da je prelivanje stepenaste kaskade nepotopljeno i da se na njenom početku javlja kritična dubina.

U zavisnosti od protoka i geometrije stepenastog preliva, tok može biti u „prelivnom ili skokovitom režimu“ ili „klizećem režimu“ [28, 134]. Prelivni režim podrazumeva tečenje preko niza širokih pragova (stepenika). Pri velikim protocima, javlja se klizeći režim, koga karakteriše velika turbulencija i uvlačenje vazduha. U ovom slučaju nije moguće definisati liniju nivoa prelivnog mlaza.

Kriterijum za određivanje koji je od navedenih režima prisutan, definisan je preko vrednosti karakteristične dubine h_{cc} , koja zavisi od uzdužnog nagiba i visine stepenica:

$$\frac{h_{cc}}{s} = 1,057 - 0,465 \frac{s}{l}. \tag{3.149}$$

Ako je $h_k \geq 1,1 h_{cc}$, tečenje je u klizećem režimu, a ako je: $h_k \leq 0,9 h_{cc}$, u prelivnom režimu. Prelazni režim, za koji nema eksperimentalnih podataka, definisan je uslovom: $h_k \approx h_{cc} \pm 10\%$. Izborom visine (s) i dužine stepenica (l), treba izbeći prelazni režim.



Slika 3.96: Shema stepenaste kaskade sa oznakama koje se koriste u proračunu.

Relativni gubitak energije između preseka 0-0 i 1-1 (Slika 3.96) određuje se pomoću empirijskog izraza [1, 28]:

$$\Delta E/E_0 = \begin{cases} 1 - \frac{0,540 (h_k/s)^{0,275} + 1,715 (h_k/s)^{-0,55}}{1,5 + P/h_k} & \text{- prelivni režim,} \\ 1 - 4,27 (1,5 + P/h_k)^{-1} & \text{- klizeći režim.} \end{cases} \quad (3.150)$$

Izraz za klizeći režim važi za slučaj aerisanih tokova pod uglom od 60° .

Na osnovu poznate energetske kote E_0 i gubitka energije ΔE , sračunatog na osnovu (3.150), može se odrediti energetska kota E_1 u podnožju stepenaste kaskade.

Dubina u preseku 1-1 određuje se iz jednačine održanja energije:

$$E_0 = E_1 + \Delta E \quad \Rightarrow \quad h_1 + \frac{Q^2}{2g B_b^2 h_1^2} = E_0 \left(1 - \frac{\Delta E}{E_0} \right). \quad (3.151)$$

Približno rešenje je:

$$h_1 \approx \frac{Q}{B_b \sqrt{2g E_0 \left(1 - \frac{\Delta E}{E_0} \right)}}. \quad (3.152)$$

Proračun bazena za umirenje je isti kao u tački 3.7.2. Slika 3.97 prikazuje stepenaste kaskade koje se estetski sjajno uklapaju u ambijent.



Slika 3.97: *Stepenaste kaskade od gabiona* [1, 137].

3.8 Pragovi

Pragovi su poprečni objekti koji služe za stabilizaciju rečnog dna, popunjavanje proloka i kontrolu uzdužnog nagiba rečnog korita. Kao stabilizacioni pojasi, imaju za cilj sprečavanje regresivne erozije rečnog dna. Postavljeni nizvodno od proloka, zaustavljaju vučeni nanos i vremenom omogućavaju popunjavanje proloka.

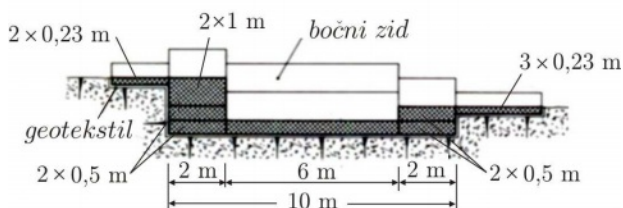
Kao objekti za smanjenje uzdužnog nagiba dna, imaju sličnu funkciju kao kaskade, ali su po visini to relativno niski objekti, sa kratkim elementima za umirenje (slapištima ili bučnicama). Visina i razmak pragova određuje se na način koji je bio prikazan kod kaskada. U zoni pragova postavlja se lokalna obaloutvrda.

3.8.1 Konstruktivni elementi pragova

Poput drugih regulacionih građevina u rečnom koritu, pragovi se najčešće grade od betona, gabiona i kamena. Moguće su i razne kombinacije ovih materijala. Na Slici 3.98 prikazan je primer betonskog praga, a na Slikama 3.99 i 3.100 prikazani su pragovi od gabiona. Na Slici 3.101 dat je nacrt jednog tipičnog stabilizacionog praga od kamena.



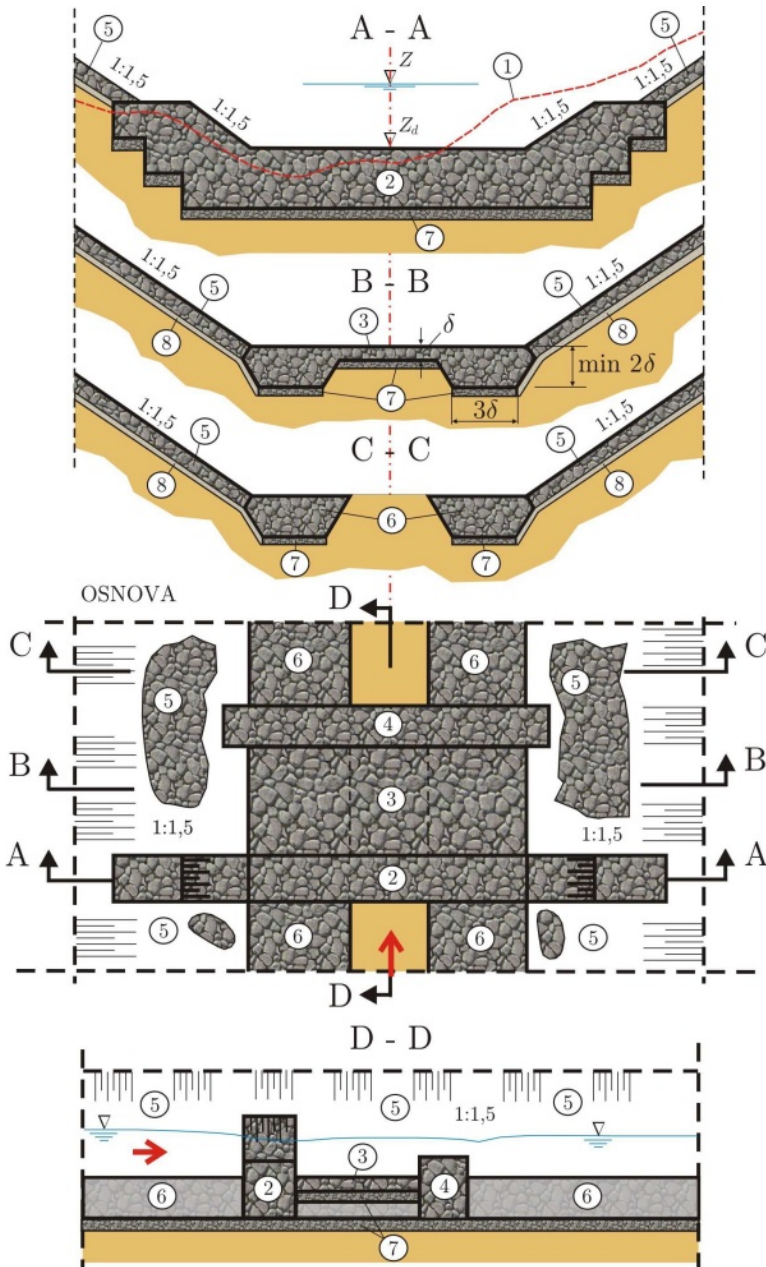
Slika 3.98: *Betonski prag na reci Peštan pri maloju, srednjoj i velikoj vodi* [65].



Slika 3.99: *Prag od gabiona, izgrađen u svom (skretanjem reke pomoću derivacionog kanala)* [1].

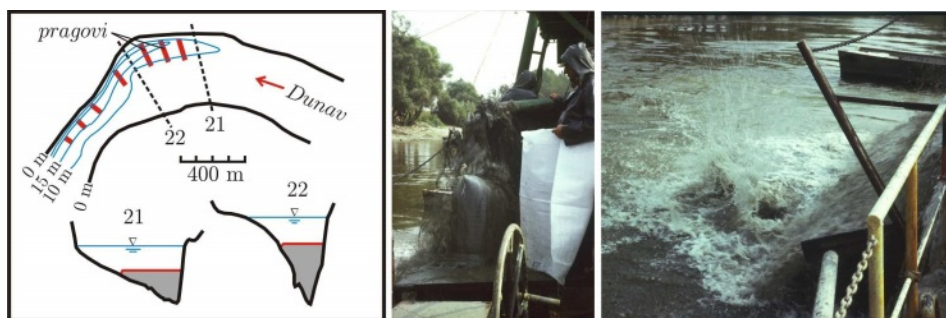


Slika 3.100: *Primeri niskih bujičnih pregrada od gabiona koje imaju funkciju stabilizacionih pragova* [1, 137].



Slika 3.101: Prag od slaganog kamena; 1 – linija terena; 2 – prag za stabilizaciju korita i kontrolu uzdužnog nagiba dna; 3 – stabilizacioni pojas/slapište; 4 – nizvodni blok; 5 – obaloutvrda; 6 – ukopana nožica; 7 – podloga od tucanika; 8 – geotekstil; (ako prag služi isključivo kao stabilizacioni pojas, izostavljaju se elementi 2 i 4).

Interesantan je pokušaj korišćenja plastičnih vreća punjenih peskom za izgradnju pragova i popunjavanje proloka na Dunavu kod Dalja (Slika 3.102) i Apatina, kao i na Tisi kod Sente. Bager refuler doprema mešavinu peska i vode u odnosu 1:5÷1:12 do usidrenog pontona na kome se nalazi uređaj „hidrociklon” pomoću koga se u velikoj meri razdvaja pesak od vode. Porozne vreće od tkanog plastičnog materijala, zapremine $0,25\div 0,30\text{ m}^3$, pune se vlažnim peskom, a zatim se klizanjem niz metalnu strmu ravan ispuštaju u reku. Formira se kompaktni podvodni prag od elemenata visine $30\div 50\text{ cm}$. Ukoliko je potrebno, po kruni ovakvih pragova dodaje se balast od kamena. Ovom tehnikom je, u cilju poboljšanja plovidbenih uslova, proloka u oštroj krivini kod Dalja na Dunavu (Slika 3.102) smanjena za čitavih 6 m. Cena poprečnih regulacionih građevina od vreća punjenih peskom je za $30\div 55\%$ manja od odgovarajućih konvencionalnih građevina od kamena [200].



Slika 3.102: Položaj pragova u Daljskoj krivini na Dunavu, punjenje vreća peskom pomoću hidrociklona i ispuštanje vreća u reku.

3.8.2 Hidraulički proračun pragova

U projektovanju pragova rešava se niz problema, od kojih će se ovde razmatrati dva, koja su česta u praksi. Prvi problem se odnosi na određivanje hidrauličkih parametara na pragu u uslovima *malih voda*, kada je dubina mala, a uticaj apsolutne rapavosti, s obzirom na veliku krupnoću kamena od koga se grade pragovi, vrlo veliki. Drugi problem se tiče kvalitativne procene efekata praga na popunjavanje uzvodnih proloka i stabilizaciju rečnog korita.

3.8.2.1 Prelivanje u uslovima malih voda

Krupni kameni komadi na nizvodnoj kosini praga u velikoj meri povećavaju turbulenciju toka i uvlačenje vazduha, tako da se tečenje preko praga ne može opisati uobičajenim jednačinama. Za tokove male dubine, po vrlo rapavim podlogama, Manningov izraz za otpor trenja nije prikladan (KI-3.2). Moraju se koristiti neki drugi izrazi za hidrauličke otpore. U nastavku se opisuje metodološki pristup koji je proizašao iz izučavanja prelivanja kamenih nasutih brana [81, 144]. Domen primene ove metodologije definisan je u radu [144].

Kombinacijom logaritamskog rasporeda brzine (KI-2.9-(2.44)) i Darsi-Vajsbahove jednačine za otpor trenja (KI-3.1-(3.3)), dobija se izraz:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{5,75}{\sqrt{8}} \log \left(12 \frac{h}{k_s} \right). \quad (3.153)$$

Ako se, umesto teorijske vrednosti $5,75/\sqrt{8}=2,03$, usvoji empirijska vrednost 3,2 i ako se apsolutna rapavost definiše preko nominalnog („ekvivalentnog”) prečnika (KI-8.2.1.2): $k_s \approx d$, a zbog uvlačenja vazduha, dubina (h) koriguje faktorom c_a , dolazi se do modifikovanog izraza (3.153) [81]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 3,2 \log \left(\frac{12}{c_a} \frac{h}{d} \right). \quad (3.154)$$

Korekcionni faktor dubine definisan je ekperimentalnim putem:

$$c_a = \sigma (1,7 + 8,1 \Phi_p \sin \alpha), \quad (3.155)$$

gde je: Φ_p – koeficijent ugradnje („pakovanja”) kamena (0,6 za kameni nabačaj, 1,1 za ručno slagani kamen), α – projektni ugao nizvodne kosine praga, a σ – faktor ovazdušenja (aeracije) toka, koji predstavlja odnos gustine mešavine vode i vazduha i gustine vode [81]:

$$\sigma = 1 - 1,3 \sin \alpha + 0,24 h/d. \quad (3.156)$$

Srednja brzina ovazdušenog toka preko elemenata apsolutne rapavosti – kamenih blokova, procenjuje se pomoću jednačine jednolikog tečenja:

$$\tilde{u} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} u_* = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} g h \sin \alpha. \quad (3.157)$$

Ovoj brzini odgovara jedinični protok:

$$q = \sigma \tilde{u} h. \quad (3.158)$$

Projektovanje praga se obavlja tako što se podešava nagib nizvodne kosine praga i krupnoće kamena dok se ne zadovolji zadati jedinični protok male vode. Pri tome se kontroliše da li je je brzina na pragu manja od kritične brzine za datu krupnoću i masu kamenog komada. Za ovu kontrolu se može koristiti modifikovani Izbašov izraz za kritičnu brzinu [90] (KI-9.2.3-(9.35)):

$$u_{dc} = a_1 \sqrt{2g \Delta d \cos \alpha / \sigma}, \quad (3.159)$$

gde je $a_1 = 0,85 \div 1,2$ (KI-9.2.3-(9.36)), $\Delta = 1,65$. Brzina u_{dc} predstavlja najveću dopuštenu brzinu na pragu, kojoj odgovara najveći jedinični protok:

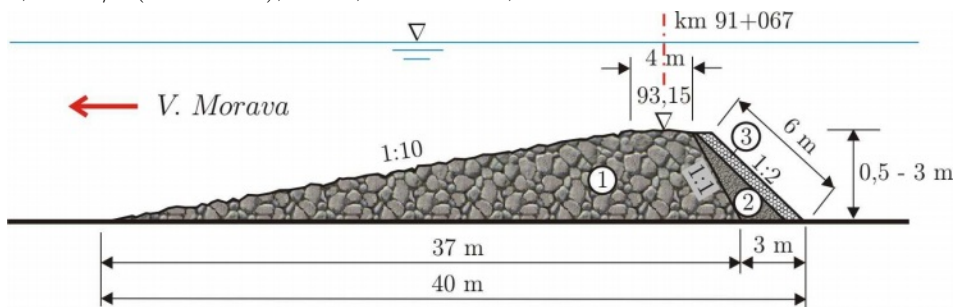
$$q_{\max} = \sigma h u_{dc}. \quad (3.160)$$

■ **Primer 3.27.** Na Slici 3.103 prikazan je prag na Velikoj Moravi, izgrađen neposredno nizvodno od Markovačkog mosta, sa primarnim ciljem da podigne nivo vode uzvodno od praga u periodima malih voda i obezbedi nesmetano funkcionisanje vodozahvata TE „Morava” kod Svilajнца [122]. Pre izgradnje praga, vodozahvat je često ostajao na suvom, jer se, usled regresivne erozije, korito Morave na ovom potezu „spustilo” za oko 3 m. Izgrađeni prag ima i niz drugih povoljnih efekata: zadržavanjem vučenog nanosa doprinosi popunjavanju proloka oko mostovskih stubova, podiže nivo podzemnih voda, a ovazdušenjem toka povećava sadržaj kiseonika i tako popravlja kvalitet vode. [113].



Slika 3.103: Položaj i izgled praga na Velikoj Moravi kod Markovačkog mosta [122].

Na Slici 3.104 prikazano je prvobitno konstruktivno rešenje ovog praga. Analizirati hidrauličke parametre tečenja preko praga, ako su dati sledeći podaci [115]: $q = 0,33 \text{ m}^2/\text{s}$ (mala voda), $d = 0,4 \text{ m}$ i $\Delta \approx 1,7$.



Slika 3.104: Prag na Velikoj Moravi [122]; kota krune praga određena je tako da dubina vode u vodozahvatu bude dovoljna za rad termoelektrane u periodima malih voda; visina praga varira po širini korita u rasponu $0,5 \div 3 \text{ m}$; 1 - kamen srednje krupnoće $0,4 \text{ m}$; 2 - ravnajući sloj šljunka; 3 - gabionski madrac.

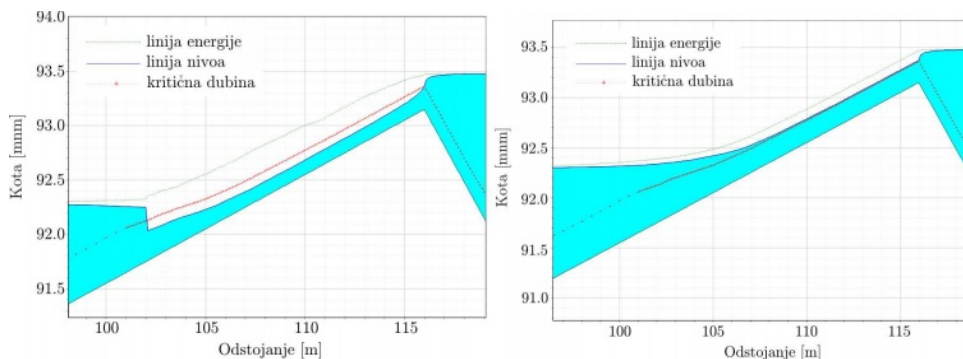
Rešenje. Proračun se obavlja iterativno, probanjem raznih dubina toka, sve dok se ne dobije vrednost datog jediničnog protoka. Istovremeno se vrši provera da li je brzina toka manja od kritične brzine za pokretanje kamena. Usvojene vrednosti: $\text{tg } \alpha = 0,1$ ($\sin \alpha = 0,0995$, $\cos \alpha = 0,9950$), $\Phi_p = 1,0$ i $a_1 = 1,2$.

Rezultati su dati u Tabeli 3.50.

Tabela 3.50: Hidraulički parametri na pragu u uslovima male vode [122].

Iter.	h	σ	c_a	λ	\tilde{u}	q	Fr	u_{dc}	q_{\max}
[-]	[m]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[m ² /s]	[-]	[m/s]	[m ² /s]
1	0,15	0,960	2,407	1,323	0,94	0,14	0,60	4,46	0,64
2	0,18	0,980	2,452	0,831	1,30	0,23	0,96	4,42	0,78
3	0,20	0,990	2,482	0,665	1,53	0,30	1,20	4,39	0,87
4	0,21	0,997	2,498	0,605	1,65	0,34	1,32	4,38	0,92

Na Slici 3.105 dato je poređenje linija nivoa na pragu, sračunatih sa vrednošću Manningovog koeficijenta $n = 0,03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ i vrednošću Darcy-Vajsbahovog koeficijenta $\lambda = 0,605$ (fiktivno $n = 0,068 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$).



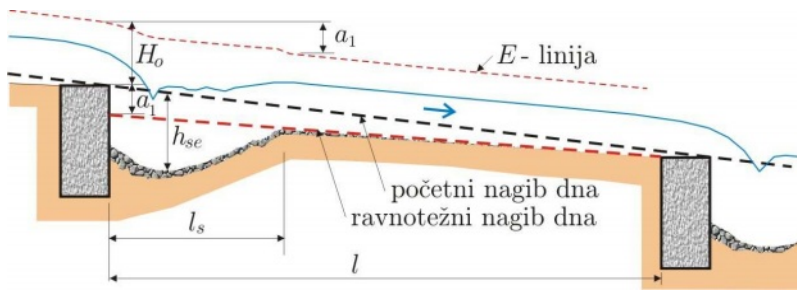
Slika 3.105: Rezultati proračuna ustaljenog preliivanja praga pri maloj vodi (model HEC-RAS); levo: kada je $n = 0,03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, na pragu je burno tečenje sa formiranjem hidrauličkog skoka; desno: kada se uzme u obzir velika rapavost i ovazdušenje prelivnog mlaza ($\lambda = 0,605$), tečenje je bez hidrauličkog skoka [115].

Dati primer pokazuje da se tanki prelivni tokovi na podlozi velike rapavosti moraju tretirati kao lokalni fenomeni. Proračun linija nivoa na deonici sa pragom se ne sme obavljati rutinski, sa usvojenom konstantnom vrednošću Manningovog koeficijenta. Ako se ne obuhvate lokalni uticaji velike rapavosti i ovazdušenja, ne može se ustanoviti pravi karakter tečenja preko praga.

3.8.2.2 Lokalna erozija iza praga

Iza svakog praga javlja se karakteristična proloka (Slika 3.106). Ona je predmet mnogih eksperimentalnih istraživanja. Ovde se navode dva obrasca koji su namenjeni strmim bujičnim vodotocima (Tabela 3.51).

Izraz (3.162) uzima u obzir geometrijsku standardnu devijaciju log-normalne raspodele krupnoće nanosa: $\sigma_g = (d_{84}/d_{50} + d_{50}/d_{16})/2$ (KI-8.2.2.1-(8.28)). Dužina erozione jame definisana je empirijskim izrazom: $l_s/H_o = 7 (H_o/a_1)^{0,86}$ [163].



Slika 3.106: Shema proloke iza praga sa oznakama.

Tabela 3.51: Empirijski izrazi za eroziju u podnožju pragova [163].

Lenzi et al. (2002):

$$h_{se}/H_o = 0,44 + 1,45 (a_1/H_o)^{0,86} + 0,06 [a_1/(\Delta d_{95})]^{1,49} \quad (3.161)$$

Marion et al. (2006):

$$h_{se}/H_o = 3,0 (a_1/H_o)^{0,60} \sigma_g^{-0,19} \left[1 - e^{-0,25 l/H_o} \right] \quad (3.162)$$

3.8.2.3 Uticaj praga na zasipanje proloka

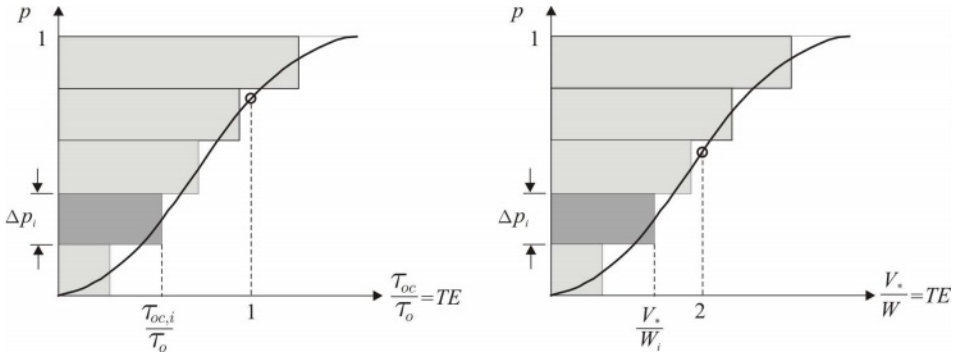
Kada se pragovi koriste za stabilizaciju korita, postavljaju se na nizvodnim krajevima proloka. Na taj način se zaustavlja nizvodno napredovanje proloka i indukuje njihovo postepeno zasipanje.

Dinamiku popunjavanja proloka nije lako predvideti. Može se pokušati sa proračunom opšte deformacije korita (KI-12.2), ali to zahteva definisanje psamoloških graničnih uslova i kalibraciju modela, što je praksi teško (najčešće nemoguće) realizovati. Alternativa je uprošćena analiza lokalnog fenomena – zasipanja proloke po analogiji sa taložnicom [122].

Polaznu osnovu predstavljaju linije nivoa, sračunate za nekoliko karakterističnih protoka (Q_{mv} , Q_{sv} itd.), kao i granulometrijske krive vučenog i suspendovanog nanosa. Pretpostavlja se da je tečenje kvazi ustaljeno.

Upoređenjem vrednosti stvarnog tangencijalnog napona (τ_o) i kritičnog za pokretanje zrna određene frakcije (τ_{oc}), može se odrediti procentualna zastupljenost pokrenutog/zadržanog vučenog nanosa u odnosu na ukupnu količinu. Kao indikator efikasnosti zadržavanja može se koristiti parametar $TE = \tau_{oc}/\tau_o$ (Slika 3.107). Svaka frakcija ima svoju vrednost parametara TE .

Ako je vrednost $TE = \tau_{oc}/\tau_o \geq 1$, procenat zadržavanja date frakcije iznosi 100%. Ako je $TE < 1$, udeo zadržanog nanosa date frakcije u ukupnoj količini nanosa jednak je vrednosti odnosa $TE = \tau_{oc}/\tau_o$.



Slika 3.107: Sumarne krive istaložavanja vučenog i suspendovanog nanosa

Sumiranjem „doprinosa” pojedinih frakcija dobija se ukupni procenat zadržanog vučenog nanosa:

$$P_v = \int_0^1 \left(\frac{\tau_{oc}}{\tau_o} \right) dp \approx \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\tau_{oc,i}}{\tau_o} \Delta p_i = \sum_{i=1}^{i=N} TE_i \Delta p_i. \quad (3.163)$$

U navedenom izrazu (koji važi za jedan protok i njemu odgovarajuću vrednost τ_o), indeks „i” označava broj frakcije, Δp_i – njenu zastupljenost, a N – ukupan broj frakcija.

Na sličan način može se odrediti i procenat zadržanog suspendovanog nanosa (Slika 3.107). Indikator taloženja je bezdimenzioni broj V_*/W , gde je $V_* = \sqrt{\tau_o/\rho}$ srednja profilska smičuća brzina, W brzina tonjenja čestice suspendovanog nanosa, a ρ gustina vode (1 t/m^3). Usvojeni kriterijum za početak taloženja suspendovanog nanosa je: $V_*/W < 2$ (KI-9.4).

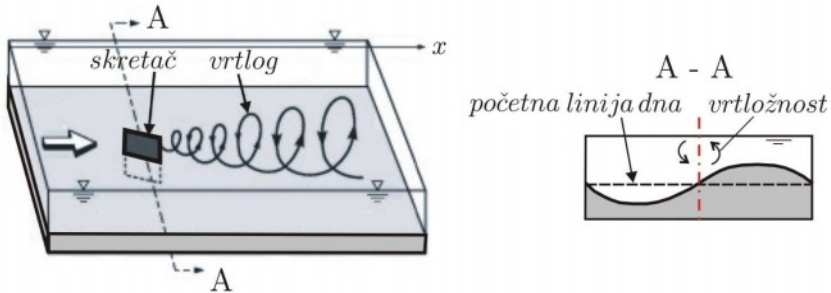
Parametar efikasnosti taloženja je u ovom slučaju: $TE = V_*/W$; sve frakcije za koje je $TE \leq 2$ biće istaložene (100%), u protivnom, udeo istaloženog nanosa u ukupnoj količini suspendovanog nanosa jednak je vrednosti odnosa $TE = V_*/W$. Sumiranjem se dolazi do ukupno zadržanog suspendovanog nanosa:

$$P_s = \int_0^1 \left(\frac{V_*}{W} \right) dp \approx \sum_{i=1}^{i=N} \frac{V_*}{W_i} \Delta p_i = \sum_{i=1}^{i=N} TE_i \Delta p_i. \quad (3.164)$$

3.9 Specijalne građevine

Najpoznatije specijalne građevine su sistemi za izazivanje spiralnog (helikoidnog) strujanja – „skretači”. Služe za usmerenje toka i kretanja nanosa, kao i za kontrolu deformacije korita. Postoje razna konstruktivna rešenja skretača. Mogu se izrađivati od metala, plastičnih materijala i drveta. Mogu se oblikovati u vidu avionskih krila.

Na Slici 3.108 prikazan je princip delovanja jednog površinskog skretača, a na Slici 3.109, sistema skretača, koji mogu biti postavljeni pri površini, ispod površine, ili na dnu vodotoka.



Slika 3.108: Skretač postavljen pod uglom na glavni tok generiše vrtložno, helikoidno strujanje, koje, produbljavanjem korita na jednom delu, a njegovim zasipanjem na drugom, ciljano menja konfiguraciju rečnog dna.

Površinski skretači su lakši za rukovanje i nisu ugroženi vučenim nanosom. Mana im je što remete plovidbu i zadržavaju naplav i led.

Skretači na dnu su izloženi udaru vučenog nanosa i mogu biti zatrpani. Moguće su i kombinacije skretača pri površini ili dnu. Postoje i uronjeni „lebdeći” skretači.

Ove građevine, koje mogu biti fiksne ili pokretne, imaju za cilj brzo i ekonomično postizanje željenih hidrauličko-morfoloških efekata, s tim da su unapred prisutne mnoge neizvesnosti u pogledu ostvarenja tih efekata. Prisutni su i problemi u primeni vezani za ankerovanje i održivost skretača tokom vremena.

Najstarija eksperimentalna istraživanja potiču od ruskog autora Potapova [196, 199]. Geometrijski parametri sistema skretača su prikazani na Slici 3.109.



Slika 3.109: Sistem površinskih skretača sa osnovnim dimenzijama.

Tipične vrednosti dužine su: $L_s = (1 \div 3) h$ i visine: $H_s = h/3$, gde je h – dubina toka. Ugao koji svaki skretač zaklapa sa osovnom sistema je: $\alpha = (12^\circ \div 25^\circ)$, a ugao koji sistem zaklapa sa osovnom toka je β .

Na osnovu poluempirijskih istraživanja predložen je obrazac za broj površinskih skretača [199]:

$$N_s = \frac{2h \beta b_s F_s}{C_L L_s H_s} \quad (3.165)$$

gde je: b_s – širina projekcije skretača na ravan upravnu na osovinu toka, $C_L = 0,5$ koeficijent uzgona, a F_s – funkcija koja zavisi od potopljenosti skretača (h/H_s) i rasporeda brzine po dubini toka.

Ako se pretpostavi raspored u obliku stepene funkcije, teorijski izraz za eksponent je: $m = \kappa \tilde{u}/u_*$ (KI-2.11-(2.54)), gde je \tilde{u} srednja brzina po dubini, u_* – smičuća brzina, a $\kappa = 0,4$ – fon Karmanova (von Kármán) konstanta. U tom slučaju je:

$$F_s = \left(\frac{h}{H_s} \right)^{2/m} \left[(m+1) - (m+2) \frac{H_s}{h} \right]^{-1}. \quad (3.166)$$

■ **Primer 3.28.** Razmatra se postavljanje površinskih skretača u rečnom koritu pravougaonog poprečnog preseka širine $B = 50$ m, uzdužnog nagiba dna $I_d = 0,0007$ i rapavosti $n = 0,03 \text{ m}^{-1/3}$ s. Može se smatrati da je tečenje ustaljeno, jednoliko, sa protokom $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Odrediti potreban broj skretača u sistemu koji zaklapa ugao $\beta = 75^\circ$ sa osovinom toka. Jedna opcija je ugao $\alpha = 15^\circ$.

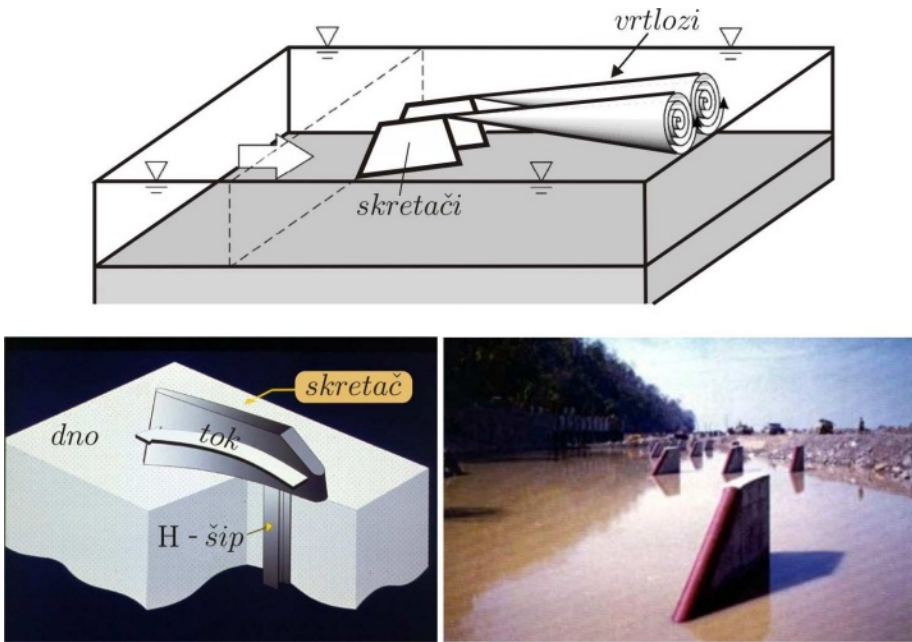
Rešenje. U datom slučaju normalna dubina iznosi $h = 1,7$ m ($Fr = 0,09$). Pretpostavi se da je srednja brzina po dubini jednaka srednjoj profilskoj brzini: $\tilde{u} = 1,2$ m/s. Smičuća brzina je: $u_* = \sqrt{g h I_d} = \sqrt{9,81 \cdot 1,7 \cdot 0,0007} = 0,108$ m/s. Vrednost ekponenta u stepenom rasporedu iznosi: $m = 0,4 \cdot 1,2/0,108 = 4,4$.

Za usvojene dimenzije skretača: $L_s = 1,5 h \approx 2,6$ m, $H_s = h/3 \approx 0,6$ m, širinu projekcije skretača $b_s = 1,3$ m i ugao $\beta = 1,309$ rad, dobija se na osnovu (3.166) i (3.165): $F_s = 0,51$ i $N_s = 3,78$, usvojeno 4.

* * *

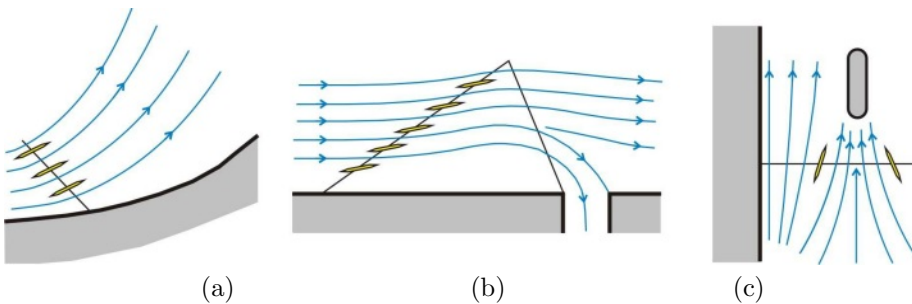
Na Slici 3.110 prikazan je specifičan tip nepokretnog skretača na dnu, namenjen upravljanju režimom vučenog nanosa („Ajova skretač”, engl. *Iowa Vane*). Specifičan hidrodinamički oblik ovog skretača proizašao je iz analize lokalnog poremećaja strujnog polja; uspor koji skretač formira predstavlja akumulisanje potencijalne energije, koja se delom troši na savlađivanje hidrauličkog otpora, a delom na formiranje poprečnog, spiralnog strujanja. Oblikovajem skretača, prvi deo utrošene energije je smanjen u korist drugog dela od koga zavisi efikasnost skretača.

Ističe se da, zbog nemogućnosti da se pouzdano predvidi složena interakcija skretača sa rečnim tokom i rečnim koritom, primena skretača nije deo standardne inženjerske prakse.



Slika 3.110: Nepokretni Ajova skretači na dnu; gore: shematski prikaz izazvanih vrtloga; dole: način učvršćivanja i ugrađivanje na terenu [265, 179].

U Srbiji nema nikakvih iskustava sa skretačima. I u svetu je broj ovakvih sistema isuviše mali da bi skretači stekli status standardnih regulacionih građevina. Uglavnom se još eksperimentalno ispituje efikasnost skretača u rešavanju konkretnih problema, kao što su oni prikazani na Slici 3.111.



Slika 3.111: Funkcije sistema skretača; a - zaštita obale od erozije skretanjem toka; b - zaštita ulaza u vodozahvat od zasipanja nanosom; c - zaštita od potkopavanja mostovskih stubova, usmeravanjem vučenog nanosa ka stubovima.

3.10 Nasipi

Nasipi, glavne građevine sistema *pasivne* odbrane od poplava, nalaze se van rečnog minor korita. Najčešće izrađeni od lokalnog zemljanog materijala, formiraju dugačke linijske odbrambene sisteme. Da bi nasipi odgovorili svojoj funkciji, potrebno je ne samo da budu dobro projektovani, već da budu propisno izgrađeni, redovno nadgledani i popravljani posle velikih poplava. Uprkos jednostavnosti, ovakve nasute građevine su u eksploataciji veoma složene, jer vremenom neumitno propadaju. Oštećenja nasipa nisu uvek vidljiva, pa njihov izgled može dati lažan osećaj sigurnosti.

3.10.1 Tipovi i funkcije nasipa

Nasipi imaju tri osnovne funkcije, da: (i) spreče plavljenje branjenog područja; (ii) usmere tok u pravcu što lakše i brže evakuacije velikih voda i (iii) obezbede kontrolisano ispuštanje vode na određenim mestima u cilju smanjenja nivoa na nizvodnom području. Poseban slučaj su nasipi kod kanalisanih reka, gde služe za formiranje sistema akumulacija između brana. Na Slici 3.112 prikazane tipovi nasipa, prema nameni.



Slika 3.112: Tipovi nasipa: 1 – glavni nasip; 2 – letnji nasip; 3 – poprečni; 4 – usporni; 5 – obodni; 6 – priključni.

(1) *Glavni nasipi* su osnovni element sistema pasivne zaštite od poplava i predstavljaju glavnu liniju odbrane branjenog područja. Dimenzionišu se tako da spreče izlivanje velike vode izabranog povratnog perioda. Osnova za izbor projektnog povratnog perioda je tehničko-ekonomska optimizacija troškova izgradnje i održavanja nasipa, s jedne strane, odnosno visine potencijalne štete od plavljenja, s druge strane.

(2) *Letnji nasipi*, koji se grade između rečnog korita i glavnog nasipa, imaju funkciju da štite poljoprivredno zemljište od poplava samo u vegetacionom peridu, tako da su ovin nasipi niži od glavnih nasipa. Pri većim poplavama, letnji nasipi se prelivaju i ruše, osim ako posebnim tehničkim rešenjima nije obezbeđen njihov opstanak u slučaju prelivanja.

(3) *Poprečni nasipi*, koji spajaju glavne nasipe sa visokim terenom, dele branjeno područje na „kasete”, čime se smanjuje plavno područje i sprečavaju veće štete u slučaju proboja glavnog nasipa.

(4) *Usporni nasipi* se grade na pritokama u zoni uspora koji se u njima javlja u periodima velikih voda glavnog vodotoka. Dužina i dimenzije ovih nasipa zavise od hidrološko-hidrauličkog režima pritoke i glavne reke, pri čemu je naročito nepovoljna mogućnost istovremene pojave (koincidencije) velikih voda oba vodotoka. Glavni nasipi na kanalisanim rekama, unutar kojih se formiraju akumulacije između brana (primer je đerdapska akumulacija) imaju karakter uspornih nasipa.

(5) *Obodni nasipi*, kao što ime kaže, grade se po obodu malog, ali značajnog branjenog područja (najčešće manjeg naselja, industrijskog, ili istorijskog objekta). Za razliku od funkcije dugačkih glavnih nasipa, funkcija kratkih obodnih nasipa je lokalnog karaktera.

(6) *Priključni nasipi* imaju zadatak da spoje krajeve glavnih nasipa sa visokim terenom, ili da povežu nasipe različitih tipova.

Pored opisanih nasipa, postoji i mogućnost građenja sekundarnih (lokalizacionih) nasipa, koji čine drugu liniju odbrane u slučaju da popusti prva linija.

Treba naglasiti da su nasipi višefunkcionalne građevine. Pored glavne funkcije – zaštite od poplava, nasipi mogu imati ulogu u saobraćaju (kao pristupni putevi), u rekreaciji, zaštiti ekosistema itd. S druge strane, železnički i putni nasipi mogu istovremeno biti i u funkciji zaštite od poplava. U blizini urbanih centara, nasipi su posebno uređeni kao šetačke ili biciklističke staze (Slika 3.113). U ruralnim područjima nasipi se mogu kontrolisano koristiti kao pašnjaci, da bi stoka ispašom suzbila prekomerno bujanje vegetacije.

Uloga nasipa u očuvanju životne sredine takođe može biti značajna. Njima se štite ekološki osetljiva područja, kao što su staništa ugroženih biljnih i životinjskih vrsta. Konfiguracija viših – glavnih, i nižih – letnjih nasipa, omogućava povremeno plavljenje prostora između ovih nasipa, što im daje karakter vlažnih staništa.

Na taj način se postiže unapređenje biološke raznovrsnosti. Konačno, u nekim slučajevima nasipi mogu doprineti smanjenju buke, kao i očuvanju estetskih vrednosti priobalja u cilju njegovog javnog korišćenja (Slika 3.113).



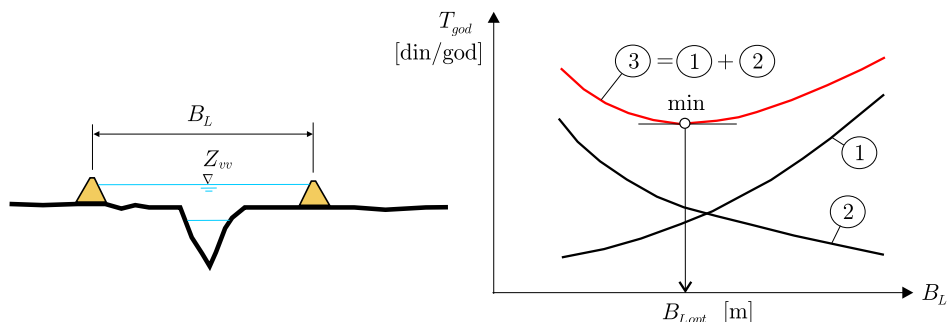
Slika 3.113: Nasipi koji služe rekreaciji i očuvanju ambijentalnih vrednosti [194].

Treba pomenuti i neke nepovoljne posledice izgradnje nasipa. Usporni nasipi kod velikih kanalisanih reka se moraju vremenom nadvišavati, zbog zasipanja akumulacija. Kod malih vodotoka, nasipi su u blizini glavnog korita, tako da je ekspanzioni prostor za velike vode ograničen; rezultat su velike brzine toka u glavnom koritu i njegova erozija, a mogu stradati i kosine samih nasipa.

3.10.2 Trasa i razmak glavnih nasipa

Trasiranje nasipa započinje određivanjem optimalne širine korita za veliku vodu (major korita), odnosno najpovoljnijeg razmaka glavnih nasipa. Osnovni kriterijum je da major korito ima dovoljnu propusnu moć za projektovanu veliku vodu. Ukoliko nema ograničenja, razmak glavnih nasipa je tehničko-ekonomska kategorija, kao rezultat kompromisa između troškova izgradnje nasipa i šteta usled plavljenja (Slika 3.114).

Glavni nasipi uz minor korito mogu biti samo prividno jeftiniji zbog manjih troškova eksproprijacije i šteta od plavljenja; u eksploataciji, takvi nasipi mogu biti skuplji, jer povećane brzine toka erodiraju kosine nasipa, pa se mora investirati u sanaciju kosina. Problem je međutim složeniji, jer optimizacija razmaka nasipa ne počiva uvek na finansijskim parametrima. Na primer, mali razmak sa visokim nasipima daje veće šanse urbanog i/ili poljoprivrednog razvoja na branjenom području, ali istovremeno otežava prilaz reci i vizuelno narušava prirodni ambijent. S druge strane, veliki razmak sa niskim nasipima češće ugrožava poljoprivrednu delatnost, ali olakšava evakuaciju velikih voda i blagotvorno deluje na priobalnu floru i faunu.



Slika 3.114: Određivanje optimalnog razmaka nasipa (B_{Lopt}); 1 – godišnje štete rastu sa povećanjem razmaka B_L zbog povećanja površine nebranjeno područja, troškova eksproprijacije zemljišta i šteta od plavljenja; 2 – godišnji troškovi izgradnje nasipa opadaju sa povećanjem razmaka B_L zbog smanjenja visine nasipa; 3 – sumarna kriva godišnjih troškova daje optimalni razmak nasipa.

Sa hidrauličke tačke gledišta, trasa nasipa treba da je što više „ispružena” i prilagođena strujnicama velikih voda (Slika 3.115). Vijugave trase koje striktno prate glavno, meandrirajuće korito treba izbegavati. Pri povlačenju trase moraju se uzeti u obzir: (i) mogućnost skraćivanja dužine nasipa vezujući ga za visoki teren i (ii) morfologija rečnog korita, kako položaj projektovanog nasipa ne bi ugrozio prirodni proces pomeranja korita u planu⁷.



Slika 3.115: Primer hidraulički ispravnog trasiranja nasipa; 1 – glavno korito, 2 – nasipi, 3 – osovina korita za veliku vodu.

Trasiranje nasipa ima niz ograničenja, kao što su:

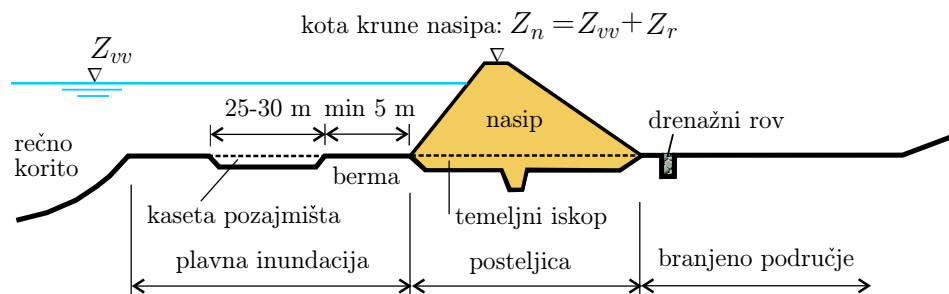
- urbanizacija (javni objekti, zone zaštite, istorijski lokaliteti itd.);
- geotehnički uslovi (močvarni tereni, slabo noseće tlo itd.);
- lokacije potencijalnih pozajmišta materijala za izgradnju nasipa;
- objekti saobraćajne infrastrukture (putevi, pruge);
- zaštićeni ekosistemi.

⁷U poznatom softverskom paketu HEC-RAS postoji mogućnost automatizovanog trasiranja nasipa na osnovu zahtevane propusne moći korita za veliku vodu i zadatog (prihvatljivog) povećanja kota nivoa i energije [250].

Duž trase glavnog nasipa, u njegovom podnožju se ostavlja „zaštitni koridor” – pojas u kome je zabranjena bilo kakva gradnja, jer služi za pristup nasipu i smeštaj drenažnog sistema (kanala, cevododa i crpnih stanica). Širina zaštitnog koridora nije univerzalno propisana; na primer, na reci Loari u Francuskoj važi pravilo da širina ovog koridora ne sme biti manja od 7 visina nasipa.

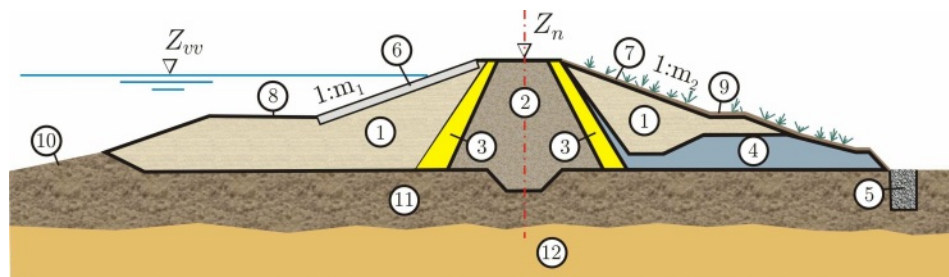
3.10.3 Konstruktivni elementi nasipa

Na Slici 3.116 je shematski prikazan položaj nasipa u odnosu na rečno korito, plavnu inundaciju i branjeno područje.



Slika 3.116: Tipična dispozicija nasipa sa osnovnim elementima: Z_{vv} – kota mero-davne velike vode; Z_r – kota rezervnog nadvišenja; Z_n – kota krune nasipa koja određuje stepen zaštite branjenog područja.

Na Slici 3.117 prikazane su komponente nasipa koje, ipunjavajući svoje pojedinačne funkcije, čine nasip ključnim objektom za zaštitu od poplava.



Slika 3.117: Komponente nasipa u opštem slučaju: 1 – zemljano telo; 2 – nepropusno jezgro; 3 – filtarski sloj; 4 – drenažni sistem; 5 – drenažni rov u nozići nasipa; 6 – nepropusna obloga; 7 – zatravljen humusni sloj; 8 – berma u inundaciji; 9 – berma ka branjenom području; 10 – prirodna kosina; 11 – nepropusno tlo; 12 – propusno tlo; Z_{vv} – projektirni nivo velikih voda, Z_n – kota krune nasipa. (Prikazane komponente ne moraju sve biti neophodne na istom nasipu!)

Podina. Podloga nasipa može biti veoma promenljiva u pogledu jačine i vodopropusnosti. O ovom tlu se mora voditi računa pri projektovanju, jer ono mora da prihvati opterećenje nasipa i obezbedi njegovu stabilnost. Podina može biti u celosti

vodonepropusna, propusna, ili kombinovano, slojevita. Ispitivanjem u laboratoriji ili na terenu, moraju se odrediti geološke, geotehničke i hidrauličke (filtracione) karakteristike podine.

Visina nasipa. Predmet je determinističkih i probabilističkih analiza u cilju postizanja optimalnog stepena zaštite od poplava (videti šesto poglavlje). Pored linije nivoa merodavne velike vode, u određivanju kota krune nasipa razmatraju se razni uticaji, kao što su:

- potencijalno pomeranje rečnog korita;
- porast protoka i nivoa usled klimatskih promena;
- rezerva usled pojave talasa;
- vertikalno sleganje nasipa ili njegove podloge;
- lokalna nadvišenja (0,2÷0,5 m) u blizini objekata (preliva, crpnih stanica).

Telo nasipa. Zapreminski najveći deo svakog nasipa, sastavljen je od zrnastog i/ili kohezivnog (glinenog) materijala. Obično se koristi tlo iz lokalnog pozajmišta. Ukoliko je neophodno, posebno se doprema kvalitetan glinoviti materijal, naročito kada je u pitanju zaptivno jezgro. Telo nasipa treba da obezbedi statičku i filtracionu stabilnost nasipa.

Izboru materijala, koji utiče na poprečni presek nasipa, mora se posvetiti pažnja, zbog oprečnih zahteva. Na primer, peščani materijal iz reke je lako dostupan u velikim količinama, ali je izuzetno vodopropusan i podložan unutrašnjoj i spoljašnjoj eroziji, kao i sleganju. Veoma je važan stepen zbijenosti materijala u telu nasipa.

Ako podloga nasipa ima dovoljnu nosivost, opravdano je u telo nasipa ugraditi kompaktnan, glinoviti materijal, sa relativno strmim nagibom kosina. Ako je podloga slaba i podložna sleganju, ispunjena nasipa od čvrstog glinovitog materijala nije opravdana, jer podloga može da izdrži samo umereno sabijen materijal pod blagim nagibom kosina.

Ukoliko se koriste peskoviti i šljunkoviti materijali, poprečni presek nasipa mora imati velike dimenzije da bi se produžila filtraciona putanja. Takav nasip mora imati vodonepropusni ekran kao zaštitu od spoljašnje erozije.

Nagib kosina nasipa zavisi od sastava i zbijenosti materijala. Projektni nagib se zasniva na kompromisu između što manje zapremine nasipa, odnosno površine njegove osnove (strmi nagibi) i što veće zapremine nasipa zbog njegove stabilnosti (blagi nagibi).

Projektovanje poprečnog profila (širine nasipa u kruni, nagiba kosina i položaja bermi) je iterativni proces, u toku koga se razmatraju razni aspekti stabilnosti kao i praktični razlozi vezani za eksploataciju i održavanje nasipa (najmanja širina u kruni 3÷6 m, širina bermi 3÷4 m, najmanji nagib zatravljenih branjenih kosina 1:2÷1:3). Prelazni delovi koji povezuju deonice nasipa sa različitim poprečnim presecima treba da spreče nagle promene geometrije.

Elementi sa smanjenjem vodopropusnosti – jezgro ili ekran. Glinovito jezgro se ugrađuje u središtu peščanih nasipa radi smanjenja procurivanja. Alternativa su slabo propusni (ili nepropusni) elementi – ekrani od gline, ili folije od sintetičkog materijala. Ovi ekrani se polažu neposredno ispod površine nasipa, po kruni i kosinama. Pored kontrole procurivanja, ekrani štite telo nasipa od spoljašnje erozije.

Glineno jezgro je utemeljno u podlozi nasipa i ne mora biti apsolutno nepropusno, jer treba samo privremeno da zadrži vodu u periodu poplave. Važno je dobro odabrati zbijenost gline, kao i vrednost indeksa plastičnosti, koji ukazuje na stepen bubrenja u zavisnosti od vlažnosti. Glineno jezgro je podložno unutrašnjoj eroziji na kontaktu sa telom nasipa, pa se štiti filtarskim slojevima, kao što je prikazano na Slici 3.117. U slučaju hitnih intervencija u toku odbrane od poplave, umesto glinenog jezgra, može se izgraditi vodonepropusan zid pobijanjem čeličnih ili betonskih talpi, kao iznuđeno (skupo) rešenje.

Projektna debljina glinenih ekrana zavisi od karakteristika materijala. Ekran se postavlja iznad vodopropusnog tela nasipa, pa su izloženi potisku i smicanju ako porni pritisci brzo ne popuste posle poplave. Površinski sloj glinenih ekrana može biti izložen pucanju u podnebljima sa izraženom smenom dugih sušnih i kratkih vlažnih perioda.

Filtarski slojevi. Formiraju prelazne zone između (slabopropusnog) glinenog jezgra i (propusnog) tela nasipa. Za sprečavanje ispiranja čestica iz jezgra mogu se koristiti peščani filtri ili filtri od geotekstila, koji se projektuju po ranije definisanim pravilima. Posebnu pažnju zahteva ugradnja filtarskih slojeva i njihova zaštita tokom izgradnje nasipa.

Obloge. Postavljaju se po kosinama nasipa i štite ga od erozionog dejstva rečnih talasa i spiranja tla pod dejstvom padavina. Po kosini prema reci obično se primenjuju klasične obaloutvrde od kamena ili betonskih ploča. Kosine prema branjenom području štite se travom. Za dimenzionisanje čvrstih obloga koriste se ranije definisana pravila. Travnati pokrivač je takođe podložan projektnim pravilima, u pogledu otpornosti na smičuće dejstvo toka, dužinu opstanka u tekućoj vodi i estetske zahteve uklapanja u okolni ambijent. Posebno voditi računa o osetljivim prelazima između oblogom zaštićenih deonica nasipa i deonica koje nisu zaštićene, jer se radi o mestima potencijalnih proboja nasipa, koja ugrožavaju sigurnost odbrambene linije u celini.

Poseban slučaj je projektovanje nasipa čije je prelivanje predviđeno. Reč je o kratkim, tzv. „sigurnosnim nasipima” od nevezanog materijala, koji se pri prelivanju ruše i omogućavaju bočno, preventivno ispuštanje viška vode iz rečnog korita u inundacije. (Istu funkciju mogu imati i betonski bočni prelivi u telu nasipa.)

Kruna nasipa i berme. Kruna nasipa je relativno ravna površina koja omogućava kretanje ljudi i mehanizacije duž nasipa. Kota krune ne mora nužno da predstavlja stepen zaštite. Načelno, ova kota se projektuje probabilistički, analizom rizika od

poplava, koja uzima u obzir i razne neizvesnosti (videti šesto poglavlje). S druge strane, visina nasipa se proverava deterministički, na osnovu fizičkih svojstava podine i materijala u telu nasipa. Širina krune nasipa zavisi od uslova izvođenja i komunikacionih zahteva. Kod nasipa koji nisu predviđeni kao prelivni, kruna se štiti travom, ili se pokriva šljunkom ili asfaltom, u zavisnosti od opterećenja.

Berne na kosinama nasipa služe za povećanje njegove stabilnosti, putem povećanja površine naleganja i prekida nagiba kosina. Služe i za smanjenje izdizanja talasa, kao i za potrebe nadzora i održavanja nasipa. Bermama se stabilnost nasipa dodatno obezbeđuje produženjem i obaranjem provirne linije u telu nasipa. Drenirane berme sadrže filtre od peska ili geotekstila, kao i šljunčane sabirne slojeve sa perforiranim cevima, ili bez njih. Nedrenirane berme se grade od materijala iste ili niže propusnosti od materijala u telu nasipa. Imaju funkciju balasta, čija se težina suprosvavlja sili potiska provirnih voda.

Drenažni sistemi. Služe za kontrolu procurivanja i tako doprinose opštoj stabilnosti nasipa. Mogu biti postavljeni u nožici nasipa ka branjenom području, ili iza nepropusnog jezgra (Slika 3.117). Procedne vode se mogu prikupljati i odvoditi drenažnim rovovima duž nožice nasipa, do recipijenta ili crpne stanice koja dreniranu vodu vraća u reku. Drenažni rovovi mogu biti snabdeveni perforiranim cevima. Ne smeju probiti podlogu nasipa do vodopropusnog sloja.

Drenažne cevi postepeno gube kapacitet usled: začepjenja, oštećenja pri pomeraanju tla, neodržavanja, kao i biohemijskih procesa (zapušenje cevi izloženih smeni aerobnih i anaerobnih uslova). Zbog toga, neophodna su okna za reviziju, održavanje i popravku drenažnih sistema.

Rasteretni bunari. Kada je u podini ispod vodonepropusnog sloja, propusni sloj, za smanjenje vertikalnog hidrostatičkog pritiska – uzgona, koriste se rasteretni bunari. Kopaju se u branjenom području, neposredno iza nasipa. Kapacitet bunara mora omogućiti evakuaciju onoliko vode iz podzemlja koliko je potrebno da se savlada uzgon. To podrazumeva i određivanje optimalnog razmaka bunara. Takođe se mora projektovati i filtarska barijera koja sprečava ispiranje čestica iz podloge kroz bunare, što zahteva poznavanja granulometrijskog sastava tla oko bunara. Voda koja iz bunara izbije na površinu branjenog područja prikuplja se i odvodi drenažnim kanalima (videti u nastavku).

3.10.4 Analiza uticajnih fizičkih procesa

Kao ni jedna druga regulaciona građevina, nasipi su predmet višedisciplinarnih istraživanja, o čemu svedoči veliki broj knjiga, članaka i izvora na internetu. Za analizu fizičkih procesa koji utiču na stabilnost nasipa koriste se znanja iz mehanike tla, geotehnike, hidraulike i drugih disciplina. Materiju koja se izlaže u nastavku treba shvatiti kao podsetnik elementarnih znanja iz navedenih oblasti u kontekstu projektovanja i izgradnje nasipa. Za sveobuhvatniji prikaz nasipa čitalac se upućuje na specijalizovanu literaturu, kao što je na primer [33].

3.10.4.1 Filtracija kroz telo nasipa

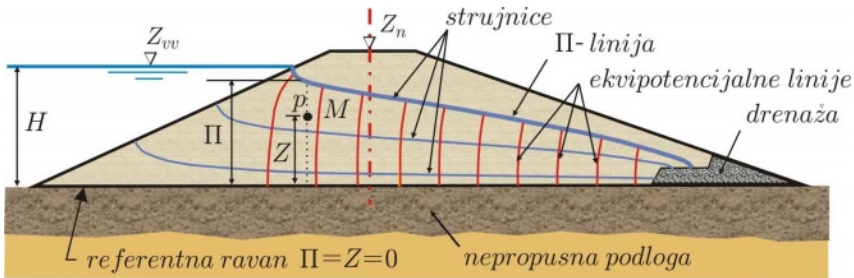
Pojava pornih pritisaka i strujanje vode kroz telo nasipa (filtracija) predstavljaju neustaljene procese koji bitno utiču na stabilnost nasipa. Filtracija se, u zavisnosti od vrste tla, u većoj ili manjoj meri odvija i kroz podinu. Ukoliko su promene nivoa u reci spore, može se smatrati da je filtracija *ustaljena*, a ako se još pretpostavi da je strujanje kroz vodom *zasićeno* tlo, *homogenog* sastava, analitički model postaje dovoljno jednostavan za brzo dobijanje osnovnih rezultata od inženjerskog interesa: položaja pijezometarske – „provirne” linije, veličine i rasporeda pornih pritisaka i filtracionog protoka⁸.

Podsetimo se da se u hidraulici podzemnih voda, zbog male brzine strujanja (laminarni tok), zanemaruje brzinska visina, pa je energetska kota praktično jednaka pijezometarskoj koti:

$$E \equiv \Pi = Z + \frac{p}{\rho g}, \quad (3.167)$$

gde je Π – pijezometarska visina (kota) u nekoj tački, Z – vertikalno odstojanje posmatrane tačke od referentne ravni, p – porni pritisak, ρ – gustina vode, a g – gravitaciono ubrzanje. Sve se razmatra u *vertikalnoj ravni*.

Kada je poznata Π kota, može se odrediti pritisak u bilo kojoj tački (M) strujnog polja: $p(M) = \rho g (\Pi - Z(M))$ (Slika 3.118).



Slika 3.118: Ustaljena filtracija kroz nasip od homogenog materijala, sa mrežom međusobno ortogonalnih strujnica i ekvipotencijalnih linija [134]; provirna linija i kontura nepropusne podloge su strujnice, a nivo vode u reci je ekvipotencijalna linija; pritisak duž provirne linije $\Pi = Z$ je nula; drenaža u nožici nasipa „obara” provirnu liniju i sprečava njeno izbijanje na branjenu kosinu nasipa. Pomoću mreže strujnica i ekvipotencijalnih linija može se odrediti filtracioni protok.

Ustaljeno kretanje vode kroz zasićeno tlo opisuje Darsijev (D’Arcy) zakon [134]:

$$q = AK I_{\Pi}, \quad (3.168)$$

⁸Razume se da u višoj fazi projektovanja, postoji mogućnost korišćenja složenih numeričkih modela, koji uzimaju u obzir neustaljenost, delimičnu zasićenost tla, kao i njegovu složenu strukturu (slojevitost, nehomogenost, anizotropnost).

gde je: q – filtracioni protok, A – površina poprečnog preseka kroz koji struji voda, K – koeficijent filtracije (vodopropusnosti ili permeabilnosti), a I_{Π} – nagib pijezometarske linije.

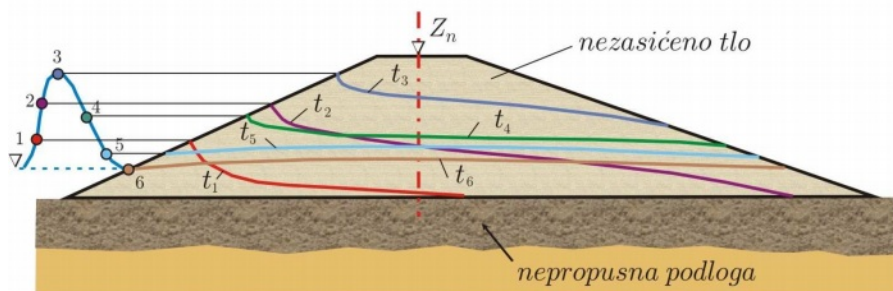
Hidraulički gradijent⁹ je u opštem slučaju, po definiciji:

$$\vec{I}_{\Pi} = -\vec{\text{grad}} \Pi = - \underbrace{\left(\frac{d\Pi}{dx} \vec{i} + \frac{d\Pi}{dy} \vec{j} + \frac{d\Pi}{dz} \vec{k} \right)}_{-\nabla \Pi}, \quad (3.169)$$

pri čemu znak „-“ ukazuje na to da Π kota opada duž toka.

Čak i u potpuno zasićenom tlu, Darsijev zakon ima svoja ograničenja. Ne važi u slučaju slabopropusnih, visoko plastičnih glinovitih materijala. S druge strane, kod jako propusnog tla, tok nije u laminarnom, već je u turbulentnom režimu. Prelazna oblast između navedenih režima strujanja, definisana je vrednošću Rejnoldsovog broja: $Re = v d / \nu = 10 \div 100$, gde je: v – stvarna brzina strujanja vode u poroznoj sredini, d – prečnik zrna, a ν – kinematički koeficijent viskoznosti vode [134].

Darsijev zakon nije primenljiv ni u slučaju neustaljenog strujanja kroz telo nasipa, koje započinje nailaskom poplavnog talasa i delimičnom zasićenošću tla (Slika 3.119).



Slika 3.119: Neustaljena filtracija; položaj provirne linije se u svakom trenutku menja u zavisnosti od nivoa vode u reci, naročito pri prolasku poplavnih talasa.

Međutim, ako je trajanje poplave dovoljno dugo, smatra se da je u telu nasipa uspostavljen kvazistacionaran filtracioni tok, čija je brzina prema Darsijevom zakonu:

$$\vec{v}_f = K \vec{I}_{\Pi} = -K \vec{\text{grad}} \Pi. \quad (3.170)$$

Ova brzina nije stvarna brzina kretanja vode kroz šupljine između zrna tla; to je fiktivna, računaska, uprosečena brzina kroz celinu porozne sredine, kao kontinuuma.

⁹Podsetimo se da je gradijent skalarnog polja vektor koji u svakoj tački daje pravac, smer i intenzitet najveće brzine prostorne promene skalarnog polja; intenzitet gradijenta (vektora) jednak je najvećoj vrednosti prostornog izvoda skalarnog funkcije, a njegov pravac je normalan na površinu po kojoj skalarno polje ima konstantnu vrednost.

Veza između računске filtracione brzine v_f i stvarne brzine v je [134]:

$$\frac{v_f}{v} = \lambda_o = \frac{e}{1+e}, \quad (3.171)$$

gde je: λ_o – poroznost tla (< 1), a e – indeks šupljina.

Sila kojom filtracioni tok deluje na čestice zasićenog tla (po jedinici zapremine):

$$\vec{F}_f = \rho g \text{ grad } \Pi, \quad (3.172)$$

izaziva pomeranje čestica, što se manifestuje u vidu unutrašnje erozije tela nasipa, ili površinske erozije u slučaju kad provirna linija izbije na nizvodnu kosinu nasipa.

Osnovni parametar modela za proračun strujanja vode kroz nasip je koeficijent filtracije K . Njegova vrednost zavisi od svojstva tla (krupnoće i oblika zrna, sadržaja prašinih i glinovitih frakcija, zasićenosti vodom, načina ugrađivanja i dr.).

Neizvesnost unosi i *anizotropija* – nejednakost propusnosti u koordinatnim pravcima. Zbog slojevite ugradnje nasipa, vodopropusnost u horizontalnoj ravni je mnogo veća nego u vertikalnom pravcu (10 puta kod glinoviti materijala, a preko 100 puta kod sitnozrnih nevezanih materijala). Samo izuzetno se može desiti da, usled pukotina, vertikalna vodopropusnost bude veća od horizontalne.

Globalni (ekvivalentni) koeficijenti filtracije kroz *višeslojno* porozno tlo u horizontalnom (x) i vertikalnom (z) pravcu dobijaju se osrednjavanjem:

$$K_x = \frac{K_1 \delta_1 + K_2 \delta_2 + \dots}{\delta_1 + \delta_2 + \dots} = \frac{\Sigma K_i \delta_i}{\Sigma \delta_i}; \quad K_z = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots}{\delta_1/K_1 + \delta_2/K_2 + \dots} = \frac{\Sigma \delta_i}{\Sigma (\delta_i/K_i)},$$

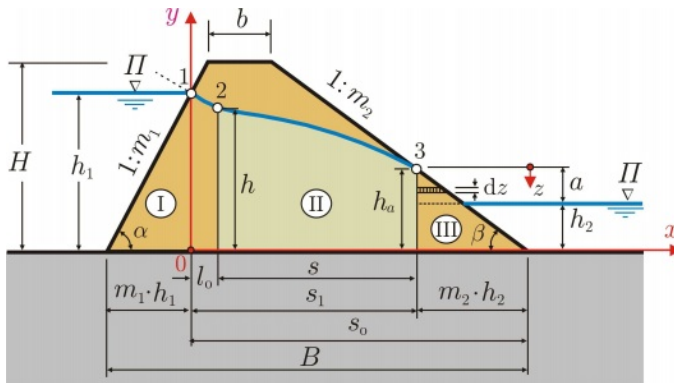
gde je: $i = 1, 2, \dots$ – oznaka sloja, a δ_i i K_i su njegova debljina i vodopropusnost. Navedeni izrazi važe samo ako se vrednosti K po slojevima ne menjaju drastično. Obično je kod zrnastih slojeva odnos K_x/K_z u granicama $2 \div 10$, osim kada su prisutni i glinoviti slojevi.

Prvi korak u analizi procurivanja nasipa je određivanje položaja provirne linije (Slika 3.118). Ovde se prikazuje klasični postupak Pavlovskog [3, 134, 256]. Pretpostavlja se da je nasip od homogenog materijala, bez drenaže, na horizontalnoj nepropusnoj podlozi. Problem se razmatra u vertikalnoj ravni, pri čemu su granični uslovi dubina u reci h_1 i u branjenom području h_2 . Računski domen se deli na tri oblasti, kao što je prikazano na Slici 3.120.

U oblasti I, koju karakteriše velika zakrivljenost strujnica, jedinični protok (po dužnom metru nasipa):

$$\frac{q}{K} = \varepsilon (h_1 - h) \quad (3.173)$$

zavisi od dubine gornje vode h_1 i karakteristične piježometarske visine h u odnosu na filtracionu liniju definisanu tačkama 1, 2 i 3 (Slika 3.120).



Slika 3.120: Računske oblasti po modelu Pavlovskog [3, 256].

Vrednosti koeficijenta ε zavise od nagiba nebranjene kosine m_1 (Tabela 3.52).

Tabela 3.52: Vrednosti empirijskog koeficijenta ε [256].

m_1	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
ε	2,0	1,634	1,459	1,358	1,293	1,214

U centralnoj oblasti II, dužine s , pijezometarska (provirna) linija između tačaka 2 i 3 ima paraboličan oblik. Ako se koordinatni sistem na Slici 3.120 pomeri udesno za l_o (tako da ordinata y prođe kroz tačku 2), može se jedinični filtracioni protok integrisati polazeći od Darsijeve zakonitosti:

$$q = v y 1 = -K y dy/dx \Rightarrow q dx = -K y dy \Rightarrow q x = -K y^2/2 + C$$

$$\text{Za } x = 0 : y = h \Rightarrow C = K h^2/s \Rightarrow q/K = (h^2 - y^2)/2x.$$

Konačno, za $x = s$:

$$\frac{q}{K} = \frac{h^2 - h_s^2}{2s} \quad (3.174)$$

Jednačina pijezometarske depresione linije u koordinatnom sistemu na Slici 3.120 ima oblik:

$$y = \sqrt{h^2 - \frac{2q}{K}(x - l_o)}. \quad (3.175)$$

Oblast III se deli na dva dela; gornji deo, visine a , nalazi se iznad nivoa donje vode, a ispod tačke 3 u kojoj voda izbija na branjenu kosinu; donji deo, visine h_2 , je ispod nivoa vode (Slika 3.120).

Na gornjem delu vlada atmosferski pritisak, a nagib pijezometarske linije se poklapa sa nagibom branjene kosine.

Dalje izvođenje zahteva da se uvede lokalna vertikalna koordinata z (Slika 3.120).

$$I_{II} = \frac{z}{m_2 z} = \frac{1}{m_2} = \sin \beta \Rightarrow dq_1 \approx K I_{II} dz = K \sin \beta dz$$

$$q_1 = K \sin \beta \int_o^a dz = K a \sin \beta.$$

Na donjem delu oblasti III pijezometarska kota je konstantna na nivou h_2 . Koristeći ponovo lokalnu koordinatu z :

$$I_{II} = \frac{a}{m_2 \cdot z} = \frac{a}{z} \sin \beta \Rightarrow dq_2 \approx K I_{II} dz = K a \sin \beta \frac{dz}{z}$$

$$q_2 = K a \sin \beta \int_a^{h_a} \frac{dz}{z} = K a \sin \beta \ln \frac{h_a}{a}.$$

Ukupni jedinični filtracioni protok u oblasti III je:

$$q = q_1 + q_2 = K a \left(1 + \ln \frac{h_a}{a} \right) \sin \beta = K a A \sin \beta. \quad (3.176)$$

Imajući u vidu jednačine (3.173), (3.174) i (3.176), kao i geometrijske odnose prikazane na Slici 3.120, može se napisati sledeći sistem jednačina čije rešenje daje vrednosti q , h , a i s :

$\frac{q}{K} = \varepsilon (h_1 - h)$ - oblast I	(3.177)
$\frac{q}{K} = \frac{h^2 - h_a^2}{2s}$ - oblast II	
$\frac{q}{K} = a A \sin \beta$ - oblast III	
$s = s_1 - l_o$ - geometrija	

gde je:

$$h_a = h_2 + a \quad (3.178)$$

$$A = 1 + \ln \frac{h_a}{a} = 1 + \ln \left(\frac{h_a + a}{a} \right) \quad (3.179)$$

$$B = b + (m_1 + m_2) H \quad (3.180)$$

$$s_o = B - m_1 h_1 \quad (3.181)$$

$$s_1 = s_o - m_2 h_a \quad (3.182)$$

$$l_o = q/K \quad (3.183)$$

Nizom aritmetičkih operacija, sistem (3.177) se može svesti na jednu nelinearnu jednačinu. Kombinacijom prve, druge i četvrte jednačine sistema, dobija se:

$$\frac{q}{K} = \varepsilon \left(h_1 - \sqrt{2 \left(s_1 - \frac{q}{K} \right) \left(\frac{q}{K} \right) + h_a^2} \right).$$

Konačno, na osnovu treće jednačine sistema (3.177) sledi:

$$\boxed{\underbrace{a A \sin \beta}_{F_1(a)} = \varepsilon \underbrace{\left(h_1 - \sqrt{2 \left(s_1 - \frac{q}{K} \right) \left(\frac{q}{K} \right) + h_a^2} \right)}_{F_2(a)}} \quad (3.184)$$

Može se primetiti da pored nepoznate a , navedena jednačina sadrži i veličine $h_a = h_a(a)$, $A = A(a)$ i $s_a = s_1(a)$ koje se računaju pomoću izraza (3.178), (3.179) i (3.182).

Za rešavanje nelinearne jednačine (3.184) po a , mora se koristiti neka od poznatih iterativnih metoda. Jedna od najjednostavnijih je Metoda sukcesivnih aproksimacija (primer u nastavku). Alternativno, može se koristiti i alat Goal Seek softvera MS Excel[®]. Za proračun provirne linije koristi se jednačina (3.175).

■ **Primer 3.29.** Odrediti jedinični filtracioni protok i položaj pijezometarske linije u telu nasipa od homogenog materijala na horizontalnoj nepropusnoj podlozi, ako su dati sledeći podaci: visina nasipa $H = 4$ m; širina u kruni $b = 4$ m; nagib nebranjene kosine $m_1 = 1,5$; nagib branjene kosine $m_2 = 2$, koeficijent filtracije $K = 4 \times 10^{-6}$ m⁻⁶/s. Granični uslovi: dubina gornje vode $h_1 = 3$ m, dubina donje vode $h_2 = 0,5$ m.

Rešenje. Parametri branjene kosine: ugao $\beta = 0,464$ rad, $\sin(\beta) = 0,447$. Karakteristične dužine su: $B = b + (m_1 + m_2)H = 18$ m i $s_o = B - m_1 h_1 = 13,5$ m. Za nagib $m_1 = 1,5$ korekcionni koeficijent ima vrednost: $\varepsilon = 1,634$.

Osnovna jednačina se rešava po a iterativno, metodom sukcesivnih aproksimacija. Za niz pretpostavljenih vrednosti a , računaju se vrednosti funkcija $F_1(a)$ i $F_2(a)$ (Tabela 3.53), sve dok se ne ispuni uslov: $F_1(a) = F_2(a)$.

Tabela 3.53: Proračun filtracije kroz nasip po modelu Pavlovskog

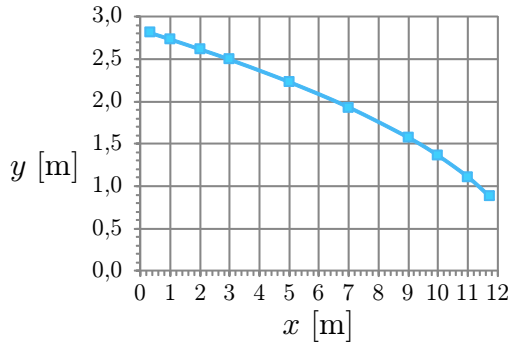
a (m)	h_a (m)	s_1 (m)	A (-)	F_1 (m)	F_2 (m)	$F_2 - F_1$ (m)
0,1	0,6	12,3	2,792	0,125	1,889	1,764
0,2	0,7	12,1	2,253	0,201	1,146	0,944
0,3	0,8	11,9	1,981	0,266	0,634	0,368
0,4	0,9	11,7	1,811	0,324	0,228	-0,095
0,370	0,870	11,760	1,855	0,307	0,342	0,035
0,378	0,878	11,744	1,843	0,312	0,312	0,000

Rezultati: $a = 0,378$ m; $h_a = 0,88$ m; $s_1 = 11,74$ m; $A = 1,843$, $F_1 = q/K = l_o = 0,312$; $q = 0,312 \cdot 4 \times 10^{-6} = 1,25 \times 10^{-6}$ m³/(s m), ili $1,25 \times 10^{-3}$ L/(s m).

Vrednosti koje određuju II. filtraciono polje su uzvodna visina: $h = h_1 - (q/K)/\varepsilon = 2,81$ m i dužina $s = s_1 - l_o = 11,43$ m. Koordinate provirne linije date su u Tabeli 3.54, a grafički prikaz je dat na Slici 3.121.

Tabela 3.54: Koordinate filtracione linije u Primeru 3.29

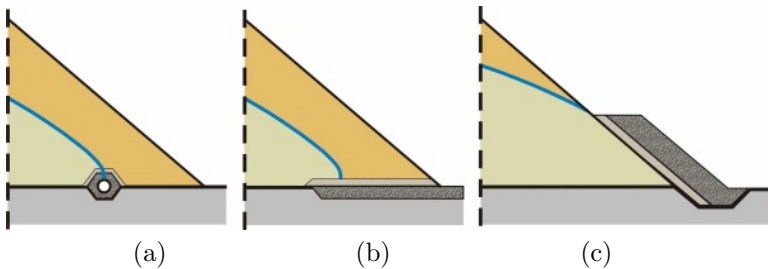
x [m]	0,312 (l_o)	1	2	3	5	7	9	10	11	11,744 (s_1)
y [m]	2,81 (h)	2,73	2,62	2,49	2,23	1,93	1,57	1,36	1,11	0,88 (h_a)



Slika 3.121: Grafički prikaz filtracione linije u Primeru 3.29.

* * *

Nasip iz prethodnog primera, sa provirnom linijom na nizvodnoj kosini, je sklon rušenju, što se ne sme dozvoliti. Za obaranje nivoa provirne linije i kontrolu filtracionog protoka koriste se razne vrste drenaža. Neka od najčešće primenjenih rešenja prikazana su na Slici 3.122.



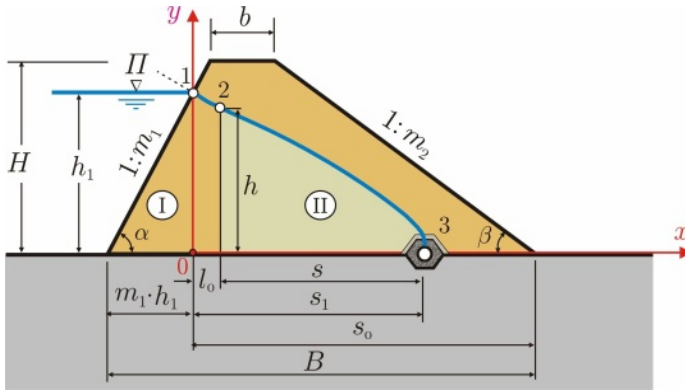
Slika 3.122: Primeri drenažnih sistema kod nasipa: (a) rov sa šljunčanom ispunom i perforiranom cevju; (b) šljunčani tepih sa obratnim filtrom; (c) drenažni sloj sa obratnim filtrom po branjenoj kosini nasipa, primenjiv za slučaj iz Primera 3.29.

Drenažni sistemi kod nasipa imaju za cilj da:

- spreče izbijanje provirne linije na kosinu nasipa;
- spreče pojavu izvora u podnožju nožici nasipa i
- prikupe i odvedu filtracionu vodu ka sabirnoj depresiji ili crpnoj stanici.

Dreniranje nasipa ima sledeće nedostatke: (i) poskupljuje izradu nasipa; (ii) drenaža u telu nasipa povećava gradijent pritiska, a time i filtracionu brzinu; (iii) slaba mesta u telu nasipa postaju teže uočljiva, što je naročito opasno u periodu odbrane od poplava.

Proračun ustaljene filtracije kroz nasip od homogenog materijala sa drenažom (Slika 3.123), predstavlja specijalni slučaj pretnodno opisanog postupka Pavlovskog. Naime, u ovom slučaju otpada oblast III, a zanemarujući dubinu vode u drenu, može se smatrati da je: $h_a = 0$.



Slika 3.123: Shematski prikaz filtracije kroz nasip sa drenom

Tada se sistem jednačina (3.177) svodi na:

$$\begin{aligned} \frac{q}{K} &= \varepsilon(h_1 - h) && \text{- oblast I} \\ \frac{q}{K} &= \frac{h^2}{2s} && \text{- oblast II} \\ s &= s_1 - l_0 = s_1 - \frac{q}{K} && \text{- geometrija} \end{aligned} \quad (3.185)$$

Kombinacijom ovih jednačina dobija se kvadratna jednačina po q/K , koja ima rešenje u obliku:

$$\frac{q}{K} = \frac{\varepsilon s_1}{2\varepsilon^2 + 1} \left[(\eta + \varepsilon) - \sqrt{\varepsilon^2(1 - \eta^2) + \eta\varepsilon(2 - \eta\varepsilon)} \right] \quad (3.186)$$

gde je: $\eta = h_1/s_1$. Za usvojeno odstojanje s_1 , jednačina (3.186) se rešava po q/K , a zatim slede i sve ostale veličine označene na Slici 3.123. Filtraciona linija ima oblik parabole i računa se pomoću izraza:

$$y = h \sqrt{1 - \frac{x - l_0}{s}}. \quad (3.187)$$

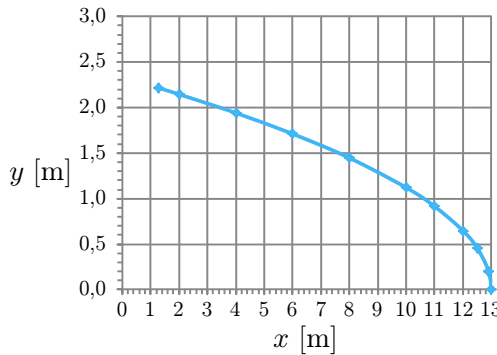
Za dimenzionisanje drenažnog sistema (koje se zasniva na poznavanju filtracionog protoka), kao i za izbor konstruktivnih elemenata ovog sistema, treba konsultovati specijalizovanu literaturu.

■ **Primer 3.30.** Sračunati filtracioni protok i koordinate procedne linije za nasip iz primera 3.29 ako se na dno tela nasipa postavi cevna drenaža (kao na Slici 3.123), 5 m od unutrašnje nožice nasipa ($s_1 = 13$ m).

Rešenje. Koristeći ulazne podatke is primera 3.29 i zadatog položaja drenažne cevi: $s_1 = 13$ m, $\eta = h_1/s_1 = 3/13 = 0,231$, može se, rešavanjem jednačine (3.186), odrediti karakteristična vrednost: $q/K = 1,284$ m. Odavde sledi da je jedinični filtracioni protok: $q = 5,14 \times 10^{-6}$ m³/(s m) ($5,14 \times 10^{-3}$ L/(s m)). Na osnovu poznate vrednosti q/K , iz prve i poslednje jednačine sistema (3.185) dobija se: $h = 2,21$ m i $s = 11,72$. Koordinate filtracione linije (Slika 3.124) date su u Tabeli 3.55.

Tabela 3.55: Koordinate filtracione linije u Primeru 3.30

x [m]	1,284 (l_o)	2	4	6	8	10	11	12	12,5	12,9	13 (s_1)
y [m]	2,21 (h)	2,15	1,94	1,71	1,45	1,12	0,91	0,65	0,46	0,20	0,00



Slika 3.124: Grafički prikaz filtracione linije u Primeru 3.30

* * *

Prikazani „ručni” proračun filtracije, koji u vreme kompjutera deluje zastarelo, ima edukativnu vrednosti i može biti od koristi kada brzo treba doći do rešenja. Za korišćenje složenih kompjuterskih modela, neophodno je posedovati predznanja iz numeričke analize i hidraulike podzemnih voda.

Podsetimo se osnovne jednačine ustaljenog kretanja vode u zasićenoj poroznoj sredini:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{3.188}$$

u kojoj se komponente brzine u, v, w definišu pomoću Darcy-jevog zakona:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \Pi}{\partial z} \right) = 0. \tag{3.189}$$

Za homogenu, izotropnu sredinu, $K_x = K_y = K_z = K$, pa se gornja jednačina svodi na poznatu Laplasovu (Laplace) jednačinu [127, 134]:

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial z^2} = 0. \tag{3.190}$$

Njeno rešenje $\Pi = \Pi(x, y, z)$ predstavlja prostorni raspored pijezometarskog nivoa u računskoj oblasti. Najčešće se problem posmatra kao ravanski (u vertikalnoj ravni), izostavljanjem koordinate z . U slučaju *neustaljenog* ravanskog strujanja pod pritiskom u homogenoj izotropnoj sredini, osnovna jednačina ima oblik:

$$\nabla^2 \Pi = \frac{S}{T} \frac{\partial \Pi}{\partial t} \quad (3.191)$$

gde su, pored ranije definisanih oznaka, $S = \rho g(\alpha + \lambda_o \beta)b$ – koeficijent „akumulisanja”, α, β – empirijske konstante, λ_o – poroznost, b – debljina vodonosnog sloja, $T = K b$ – transmisivnost sredine i t – vreme.

Rešenje jednačina (3.190) $\Pi = \Pi(x, y)$, iziskuje zadavanje graničnih uslova, a u slučaju problema (3.191) $\Pi(t, x, y)$, još i početnih uslova, kao i rasporeda parametara S i T po računskoj oblasti. Rešenja se dobijaju primenom raznih numeričkih postupaka, zasnovanih na metodama konačnih razlika, konačnih ili graničnih elemenata [127]. Ove metode obuhvataju slojevitost porozne sredine (Slika 3.125).

Položaj slobodne površine se određuje iterativno, iz uslova da je na njoj pritisak jednak nula. Podrazumeva se da primena složenih numeričkih modela zahteva kalibraciju odgovarajućih geomehaničkih parametara pomoću terenskih i laboratorijskih merenja.

Za projektovanje nasipa bitna je procena *izlaznih gradijenata* filtracionog toka. Zbog stabilnosti nizvodne kosine nasipa, postoji pravilo da vrednost lokalnog izlaznog gradijenta ne sme biti veća od 1. Kod filtracije u horizontalnom pravcu x , intenzitet izlaznog gradijenta jednak je:

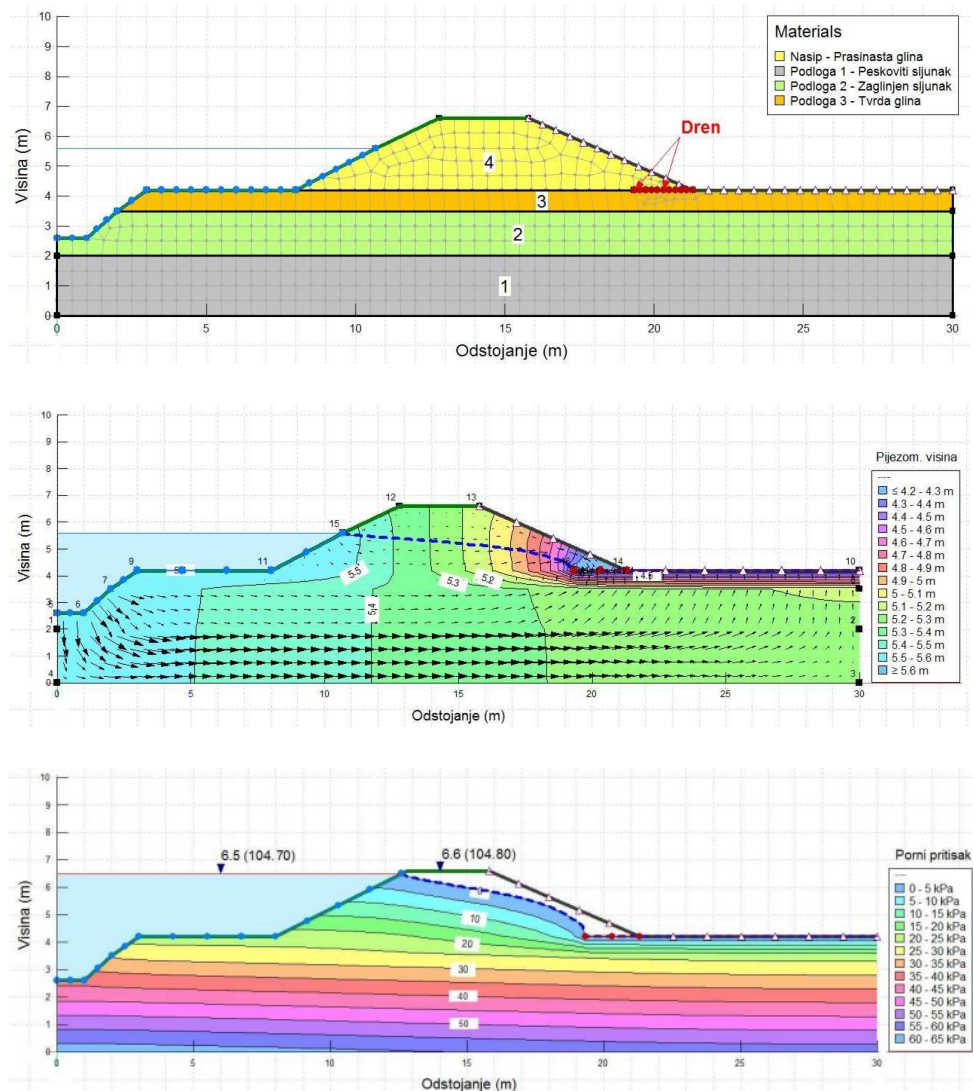
$$I_{iz} = \frac{d\Pi}{dx} \approx \frac{\Delta\Pi}{\Delta x} = \frac{v}{K_x} \quad (3.192)$$

i određuje se na osnovu dve susedne ekvipotencijalne linije u nožici nasipa. Kako u prirodi filtracioni tok nije horizontalan, već je iskošen, intenzitet izlaznog gradijenta definisan je izrazom:

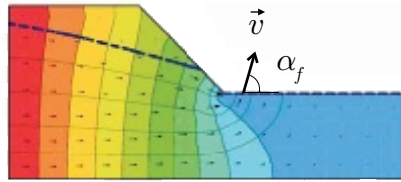
$$I_{iz} = \frac{v}{K_s} = v \frac{K_x \sin^2 \alpha_f + K_z \cos^2 \alpha_f}{K_x K_z}, \quad (3.193)$$

gde je: v – lokalna filtraciona brzina, K_s – filtracioni koeficijent u pravcu brzine \vec{v} , K_x, K_z – filtracioni koeficijenti u horizontalnom i vertikalnom pravcu, a α_f – ugao koji vektor \vec{v} zaklapa sa horizontalom na izlasku iz računске oblasti, određen pomoću numeričkog modela (Slika 3.126).

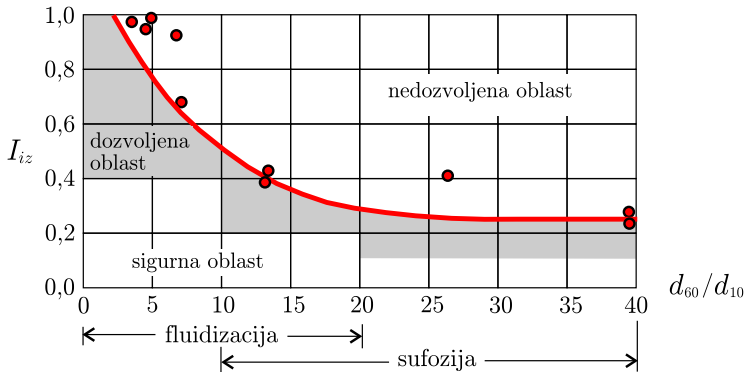
Procesi *fluidizacije* i *likvefakcije* (prelaska zrnastog tla iz statički čvrstog stanja u dinamički fluidno stanje), kao i *sufozije* (razaranja tla u vidu pokretanja i odnošenja finih frakcija tla pod uticajem filtracionog toka vode) zavise od izlaznog gradijenta i sastava tla, koji je najčešće okarakterisan vrednošću koeficijenta neuniformnosti: d_{60}/d_{10} (Slika 3.127).



Slika 3.125: *Primer proračuna filtracije kroz nasip od heterogenog materijala na propusnoj podini (reka Borna – pritoka Vrbasa [105]); gore: računski mreža i sastav geotehničke sredine: 1 – peskoviti šljunak ($K = 5 \times 10^{-6}$ m/s, $\phi' = 34^\circ$, $c' = 0$); 2 – glinoviti šljunak ($K = 1 \times 10^{-6}$ m/s, $\phi' = 32^\circ$, $c' = 0$); 3 – tvrda gлина ($K = 1 \times 10^{-8}$ m/s, $\phi' = 23^\circ$, $c' = 17$ kPa); 4 – prašinska gлина ($K = 1 \times 10^{-7}$ m/s, $\phi' = 22^\circ$, $c' = 7$ kPa); u sredini: provirna linija ka drenu sa vektorskim poljem brzina; dole: linije pornog pritiska; (metoda konačnih elemenata, softverski paket [57]).*



Slika 3.126: Skica za proračun izlaznog gradijenta



Slika 3.127: Dijagram za procenu opasnosti od fluidizacije i sufozije; „nedozvoljena oblast” je oblast izlaznih gradijenata koji razaraju poroznu sredinu (prema [257]).

■ **Primer 3.31.** Pijezometarska visina na vodom opterećenju kosini nasipa iznosi $H_n = 2,2$ m, a dužina filtracione putanje, $D_f = 6,5$ m. Približna vrednost izlaznog gradijenta je: $I_{iz} = H_n/D_f = 2,2/6,5 = 0,34$. Proveriti da li postoji opasnost od sufozije, ako je vrednost koeficijenta neuniformnosti materijala: $d_{60}/d_{10} = 12$.

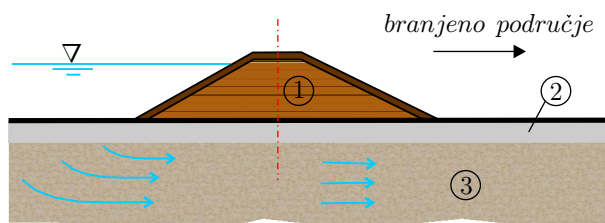
Rešenje: Sa dijagrama na Slici 3.127 vrednosti 12 na apscisi odgovara najveća vrednost izlaznog gradijenta od oko 0,5 na granici dozvoljene oblasti. To znači da je vrednost koeficijenta sigurnosti: $KS = 0,5/0,34 \approx 1,5$, što se može prihvatiti.

3.10.4.2 Filtracija ispod nasipa

Nekontrolisana filtracija ispod nasipa dovodi do: (i) prekomernih pritisaka ispod nepropusnog povlatnog sloja u branjenoj zoni; (ii) deformacije tla i (iii) pojave izvora kojima se ispira materijal iz dubljih slojeva ispod nasipa. Ove pojave su karakteristične za *tanke* povlatne slojeve (Slika 3.128). Postoje razni načini da se kontroliše filtracija ispod nasipa, kao što se prikazuje u nastavku.

Presecanje vodonosnog sloja. Može se postići iskopom rova sa ispunom od sabijenog tla, ili pobijanjem čeličnih talpi. Da bi ova mera imala efekta, presecanje mora zahvatiti bar 95% debljine vodopropusnog sloja, što nije ekonomično ako je debljina sloja veće od desetak metara.

Ojačanje povlatnog sloja. Povlatni sloj je najčešće sastavljen od sitnozrnog, vodonepropusnog ili polupropusnog tla, iznad vodopropusnog sloja od peskovitog i šljunkovitog tla (Slika 3.128).



Slika 3.128: Tlo ispod nasipa; 1 - nasip; 2 - povlatni sloj; 3 - vodonosni sloj.

Ako se povlatni sloj proteže na dovoljno velikoj dužini između rečnog korita i nasipa, ovaj svojevrsni vodonepropusni „tepih” značajno smanjuje filtracioni pritisak na branjenoj strani nasipa¹⁰. Tamo gde se povlatni sloj tanji ili prekida, treba ga ojačati, povezati, ili produžiti, nasipanjem nepropusnog materijala.

Berne i balasti. Kada pritisak u vodopropusnom sloju (uzgon) premaši težinu nepropusnog povlatnog sloja na branjenoj strani nasipa, dolazi do proboja povlatnog sloja, pojave izvora (Slika 3.129) i ispiranja materijala i dubljih slojeva, što ugrožava stabilnosti nasipa.

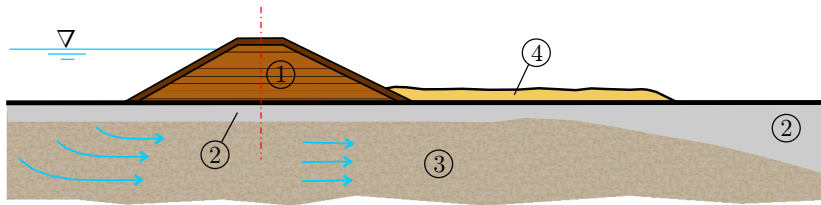


Slika 3.129: Izvor u podnožju nasipa na Tamišu (feb. 1999); bela zastavica označava položaj izvora koji se prati u toku poplave.

Ovo se može sprečiti izgradnjom bermi na branjenoj strani, u podnožju nasipa (Slika 3.130). Berme daju dodatnu težinu povlatnom sloju da se odupre uzgonu. U izvesnoj meri povećavaju stabilnost branjene kosine nasipa na klizanje. Jednostavno se grade i lako održavaju. U kriznim situacijama mogu da posluže kao pozajmište materijala za sanaciju nasipa. Kako zauzimaju prostor, uglavom se koriste kod nasipa na poljoprivrednom zemljištu.

Efekti bermi zavise od svojstva materijala. Berme od vodonepropusnog tla na povlatnom sloju od polupropusnog tla, sprečavaju izlazak vode na površinu i tako povećavaju uzgon, ali se adekvatnom debljinom berme taj nepovoljni efekat može neutralisati.

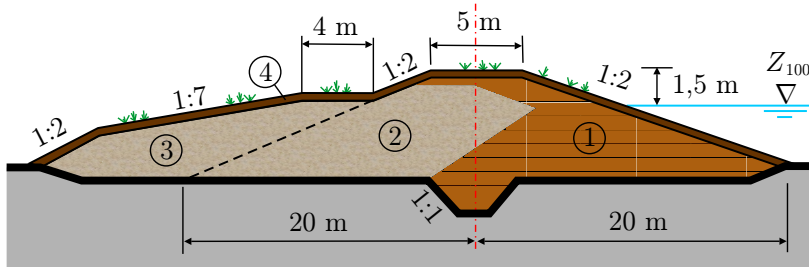
¹⁰ Treba pažljivo locirati pozajmišta materijala za izgradnju nasipa, da se ne bi ugrozila debljina povlatnog sloja i njegov kontinuitet.



Slika 3.130: Berma (4) na branjenoj strani nasipa kao ojačanje povlatnog sloja (2).

Berne od (polu)propusnog tla moraju imati permeabilnost koja je veća ili jednaka onoj u povlatnom sloju. U ovom slučaju se može očekivati da određena količina vode izbije na površinu branjenog područja. Takođe se može očekivati da se, zbog povećanih otpora filtraciji kroz bermu, pritisak na nožicu nasipa poveća.

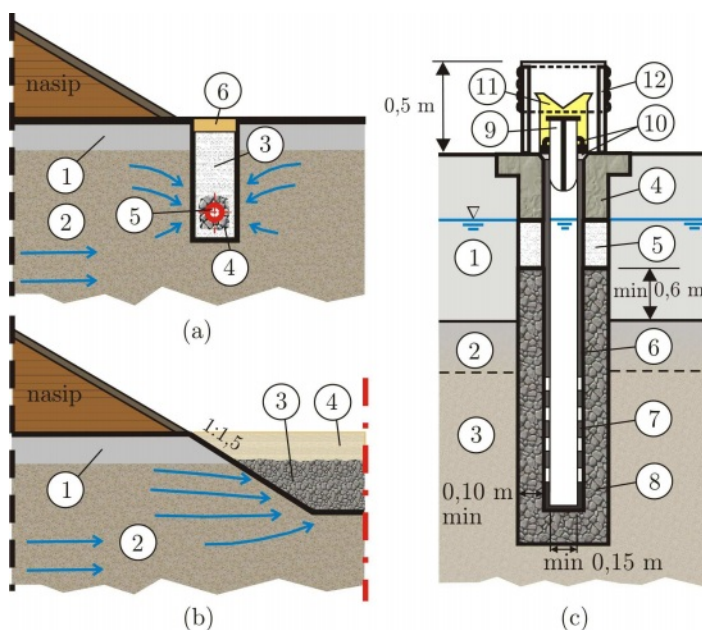
Drugi način kontrole filtracije kroz nasip i tlo ispod njega je primena balasta od *vodopropusnog* materijala. Na velikim rekama je uobičajeno da se balast formira od peska iz rečnog korita, pomoću plovniha bagera – refulera. Na Slici 3.131 prikazan je jedan takav primer.



Slika 3.131: Nasip duž Dunava na sektoru „Siga-Kazuk” (km 1424-1414); 1 – ekran od glinovitog materijala; 2 – telo nasipa od peščanog materijala; 3 – produžetak tela nasipa u vidu balasta od refulisanog peska; 4 – sloj humusa sa travom (prema [69]).

Drenažni rovovi i bunari. Kada nema vodonepropusnog povlatnog sloja, ili kada je on veoma tanak, drenažni rovovi mogu poslužiti za kaptiranje izvora i tako lokalno smanjiti pritisak na nasip. Prikupljaju samo deo filtracionih voda iz vodonosnog sloja, tako da njihovi efekti imaju karakter *lokalne plitke drenaže*. Ponekad se postavljaju u kombinaciji sa bunarima, da bi se voda odvela i iz dubljih slojeva. Oblik i veličina drenažnih rovova zavisi do očekivnog drenažnog priliva, željenog stepena smanjenja uzgona, stabilnosti materijala u kome se grade i konstruktivnih uslova. Širina drenažnih rovova pravougaonog preseka obično iznosi $1,2 \div 2$ m, a kod trapeznog preseka zavisi od lokalnih uslova (Slika 3.132-a,b).

Efikan način za sniženje pritiska na povlatni sloj je kopanje bunara na branjenoj strani nasipa (Slika 3.132-a). Svrha bunara je da vodi, koja se nalazi pod pritiskom duboko u vodonosnom sloju, omogući kontrolisani izlaz na površinu i da se na taj način smanji pritisak na povlatni sloj.



Slika 3.132: Objekti za sniženje pritiska na povlatni sloj; (a) uski drenažni rov: 1 – povlatni sloj; 2 – vodonosni sloj; 3 – peščani filter; 4 – šljunak; 5 – perforirana drenažna cev; 6 – nepropusni sloj; (b) drenažni rov trapeznog preseka: 1 – povlatni sloj; 2 – vodonosni sloj; 3 – šljunak; 4 – pokrivač od lokalnog materijala; (c) bunar (prema [234]); 1 – povlatni sloj; 2 – fini pesak; 3 – vodonosni sloj; 4 – betonski element; 5 – peščani drenažni sloj; 6 – puna čelična cev (min $\text{Ø}152,4$ mm); 7 – perforirana čelična cev; 8 – šljunčani drenažni sloj; 9 – zatvarač; 10 – metalni prsten sa gumenom kapom; 11 – plastična cev sa Tompsonovim prelivom; 12 – metalna zaštitna cev sa poklopcem.

Najjednostavniji način gradnje bunara je pobijanje čeličnih cevi $\text{Ø}250 \div 350$ mm kroz povlatni sloj dok ne zađu u vodonosni sloj [69]. Posle ispiranja, bušotina se puni šljunkom i cev se postepeno vadi. Broj bunara i njihovo međusobno odstojanje se probanjem određuje za svaki konkretni slučaj, pri čemu je ključni kriterijum stepen obaranja hidrauličkog gradijenta.

U Americi se primenjuju bunari nešto složenije izrade (Slika 3.132-c). U zavisnosti od pritiska, voda iz bunara slobodno ističe na površinu, a po potrebi, može se isumpavati. Drenažni slojevi se projektuju po filtarskim pravilima, u zavisnosti od granulometrijskog sastava vodonosnog sloja. Nadgradnja sa zatvaračem, prelivom i zaštitnom kapom služe za kontrolu tokom eksploatacije. Generalno, bunari imaju prednost u odnosu na drenažne rove, jer imaju veći domet i kapacitet, a ne zauzimaju veliki prostor u zaleđu nasipa. Nedostaci bunara su smanjenje izdašnosti tokom vremena usled kolmiranja porozne sredine, zapušanja otvora u cevi i formiranja krečnjačkih naslaga, što nameće veće troškove nadgledanja i održavanja.

3.10.4.3 Provera stabilnosti kosina

Za analizu stabilnosti kosina nasipa (a može i obale) ključan parametar je *čvrstoća tla na smicanje*. Reč je o unutrašnjoj otpornosti tla na klizanje, koje se potencijalno može dogoditi po nekoj površi unutar tla. Potsetimo se da je još 1900. Mor (Mohr) postavio teoriju po kojoj je za lom u tlu merodavna kritična *kombinacija* normalnog i smičućeg napona (a ne njihove pojedinačne maksimalne vrednosti). Funkcija loma se može predstaviti u obliku: $\tau_f = f(\sigma)$, gde je: τ_f – kritični tangencijalni napon – čvrstoća tla na smicanje, a σ – normalni napon.

Vodom zasićeno tlo predstavlja dvofaznu (čvrstu i tečnu) sredinu, u kojoj se može smatrati da ukupni lokalni normalni napon ima dve komponente: *efektivni napon* čvrste faze (σ') i porni pritisak tečne faze (p): $\sigma = \sigma' + p$. Važi već ranije navedena Mor-Kulonova zavisnost:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi', \quad (3.194)$$

gde kohezija c' proizilazi iz linearne aproksimacije zavisnosti (τ, σ'), pa stoga *zavisi* od naponskog stanja i nije svojstvena osobina tla. Generalno, za peskove i neorganski mulj, $c' = 0$. Za slabo konsolidovane gline je $c' \approx 0$, dok je kod konsolidovanih (dreniranih) glina, $c' > 0$. Ugao unutrašnjeg trenja ϕ' se još naziva „ugao efektivnog napona i „ugao trenja dreniranog tla”).

Kako je čvrstoća (otpornost) tla na smicanje ključni parametar stabilnosti nasipa, podsetimo se nekih osnovnih pojmova iz Mehanike tla koji su u vezi sa ovim parametrom. Njegova vrednost zavisi od jačine međusobne povezanosti čestica tla i od intenziteta trenja između čestica. Efektivni napon σ' predstavlja *osrednjenu* normalnu silu po jedinici površine kojom čestice tla međusobno deluju jedna na drugu.

Pod uticajem smičućeg napona, zapremina tla se može menjati; ako se poveća, otpornost na smicanje se smanjuje i obrnuto. U trenutku kada se razori veza između čestica, tlo se više ne može širiti niti sabijati, a veza između napona i deformacije postaje konstantna – dostiže se ustaljeno stanje „rezidualne čvrstoće”.

Ako je tlo *nedrenirano* (voda ne može iz njega da izađe), nestišljivost vode uslovljava da se pri smicanju gustina tla ne može menjati, ali se može menjati pritisak vode p i efektivni normalni napon σ' . Za procenu čvrstoće na smicanje nedreniranog tla koristi se kriterijum Treska [270], a čvrstoća opisuje simbolom c_u .

Ako je tlo *drenirano* (pore se mogu osloboditi vode), širenje i sabijanje tla pod uticajem smicanja postaje moguće, a porni pritisak ostaje konstantan. Za procenu čvrstoće na smicanje nedreniranog tla koristi se Mor-Kulonov kriterijum (3.194).

U stvarnosti, tlo je obično delimično drenirano, u stanju koje je negde između idealno dreniranih i nedreniranih uslova. Kako u praksi napraviti razliku između parametara dreniranog i nedreniranog tla? Ako je u pitanju vodom zasićena glina, ona pod opterećenjem neće odmah izgubiti vodu, pa se kratkoročno može treći-

rati kao nedrenirani homogeni materijal, bez razdvajanja črstih čestica od vode. Najveći broj havarija na nasipima dolazi upravo u takvim uslovima. Analiza stabilnosti kosina u tom slučaju sprovodi se pomoću ukupnih (totalnih) napona, koristeći čvrstoću c_u ($\phi = 0$). Zasićeni glinoviti materijali često se opisuju kao „materijali sa $\phi = 0^\circ$ ”.

Posle dužeg perioda (koji se meri mesecima i godinama), glina će izgubiti deo vode, sve dok ne nestane višak pornog pritiska, kada se on izjednači sa lokalnim ambijentnim pritiskom. Tada je uputno analizu stabinosti kosina sprovesti pomoću efektivnih napona, razdvajajući napone na vodu u porama (porni pritisak) i na čestice tla (efektivni napon).

Zrnasta (peskovita) tla se veoma brzo dreniraju („materijali sa $\phi > 0^\circ$ ”), pa se analiza stabilnosti kosina obavlja pomoću efektivnih napona, koristeći parametre ϕ' i c' , pri čemu u nekim slučajevima može biti $c' = 0$.

Analiza nedreniranog tla je lakša, jer se brže dolazi do vrednosti parametara, a odnosi se na kratkoročnu stabilnost, koja može biti aktuelnija od dugoročne stabilnosti. U ovom slučaju potreban je samo jedan parametar – čvrstoća c_u , dok je $\phi = 0$ (anvelopa na Morovom dijagramu je horizontalna prava linija). Do vrenosti parametara dreniranog i nedreniranog tla dolazi se merenjem u laboratoriji i na terenu, što je predmet brojne specijalizovane literature.

U konvencionalnim pristupima, stabilnost kosine se kvantifikuje faktorom sigurnosti – odnosom raspoložive čvrstoće na smicanje i kritičnog smicanja za pojavu loma:

$$FS = \frac{c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'}{\tau_f}. \quad (3.195)$$

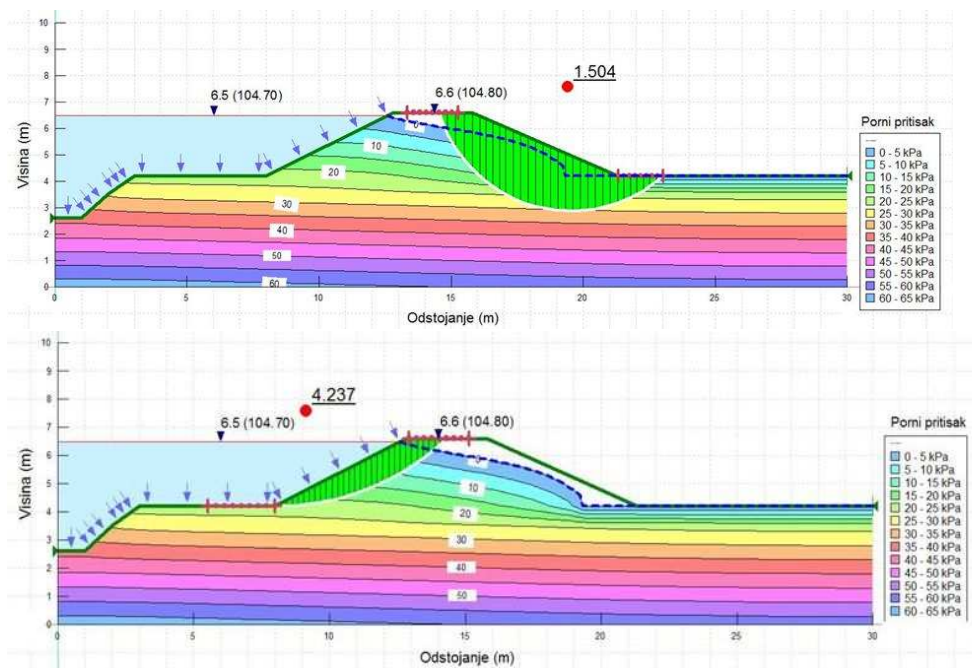
Da bi kosina bila stabilna potrebno je da bude zadovoljen uslov: $FS > 1$.

Na konceptu faktora sigurnosti zasnovane su „metode opšte granične ravnoteže” (engl. *General Limit Equilibrium* – GLE), u kojima se vrednost FS računa pomoću jedne ili dve jednačina ravnoteže (sila/momenata) za masu tla ograničenu konturom kosine i potencijalne klizne površi. Posmatrano u vertikalnoj ravni, najčešće se pretpostavlja kružni oblik klizne površi (ređe klinasti ili poligonalni oblici). Oblast iznad klizne površine se deli većim brojem vertikalnih segmenata, pa se za svaki od njih računaju delujuće sile (sopstvena težina, horizontalne normalne sile na stranicama, vertikalne smičuće sile, normalna i smičuća sila na dnu). Poznavajući vrednosti sila i odstojanja mogu se sračunati momenti.

U zavisnosti koje se sile zanemaruju i kako se računa položaj centra kliznog kruga i njegov poluprečnik, postoji niz poznatih klasičnih metoda, kao što su Felleniusova (Fellenius), Bišopova (Bishop), Modifikovana Švedska i dr. Za računski postupak ovih metoda, njihov domen primene i ograničenja, čitalac se upućuje na specijalizovanu literaturu.

Skreće se pažnja na činjenicu da procena sigurnosti kosine kod metoda granične ravnoteže zavisi od tačnosti određivanja položaja *kritične* klizne površi, one koja daje najmanju vrednost faktora sigurnosti.

Napominje se da postoje metode koje dozvoljavaju specifične formulacije *interakcije* normalnih i smičućih napona između segmenata na koje je podeljena klizna površ (npr. u metodi Morgenstern-Price funkcija rasporeda tangencijalnog napona se može zadati u vidu polusinusoida). Paralelno se primenjuju jednačine sila i momenata, a kombinacijom faktora sigurnosti koje one daju, dobija se kao merodavan, *globalni* faktor (koeficijent) sigurnosti. Savremeni softverski alati nude i mogućnost proračuna prelaza iz vodom nezasićene sredine u zasićenu sredinu [57]. Većina komercijalnih programskih paketa koristi metodu konačnih elemenata (MKE). Ilustrativan primer je dat na Slici 3.133.

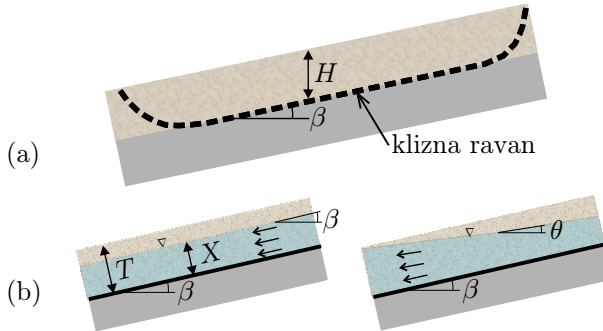


Slika 3.133: Rezultati proračuna stabilnosti nasipa od heterogenog materijala na propusnoj podini (reka Borna – pritoka Vrbasa [105]); uz centar rotacije kritične klizne površi upisana je najmanja vrednost globalnog koeficijenta sigurnosti.

Prednosti savremenih računskih modela je što mogu da: (i) obuhvate složene geometrijske uslove (ojačanja u vidu talpi, potpornih zidova, geotekstilnih membrana), kao i složenu strukturu tla; (ii) identifikuju potencijalne pukotine na osnovu rasporeda napona i deformacija; (iii) sugerišu preduzimanje interventnih mera u toku izvođenja, kada kontrolna merenja na terenu pokažu nedozvoljena odstupanja od projektnih računskih vrednosti.

U specifičnim uslovima, geotehnički problem se može rešavati pomoću neke uprošćene metode. Jedna od njih je „Metoda neograničene kosine” [235], koja se može primeniti kada je:

- kosina od nevezanog tla, sa „plitkim” kliznim krugom;
- sloj slabijeg tla lociran iznad jačeg tla, pa je granica između slojeva klizna ravan (Slika 3.134-a); ako postoji filtracija, pijezometarska linija je paralelna sa kosinom ili je pod nekim uglom (Slika 3.134-b).



Slika 3.134: Oznake u Metodi neograničene kosine [235].

Ključni parametar u ovoj metodi je „faktor pornog pritiska”:

$$r_u = \frac{p}{\rho_s g H} \quad (3.196)$$

gde je: p – porni pritisak, ρ_s – gustina tla, a H – visina delovanja pornog pritiska.

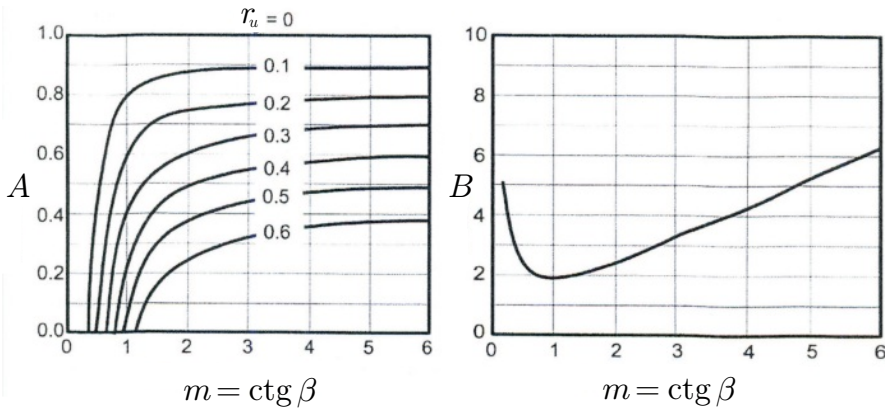
U zavisnosti od nagiba pijezometarske linije (Slika 3.134-(b)), obrasci za faktor r_u imaju oblik [235]:

$$r_u = \begin{cases} \frac{X}{T} \frac{\rho}{\rho_s} \cos^2 \beta & \text{– pijezometarska linija paralelna sa kosinom} \\ \frac{\rho}{\rho_s} \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \theta} & \text{– pijezometarska linija pod uglom } \theta \end{cases} \quad (3.197)$$

Faktor sigurnosti se računa na ovaj način:

$$FS = A \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \beta} + B \frac{c'}{\rho_s g H}, \quad (3.198)$$

gde su: A, B – parametri čija se vrednosti očitava na dijagrama na Slici 3.135, a c' i ϕ' – parametri čvrstoće tla definisani na osnovu efektivnih napona.



Slika 3.135: Pomoćni dijagrami u Metodi neograničene kosine [235].

■ **Primer 3.32.** Preko čvrstog tla nalazi se relativno tanak sloj nestabilnog, slabijeg tla, gustine $\rho_s = 1,85 \text{ t/m}^3$, debljine $T = 1,5 \text{ m}$, u nagibu $\beta = 27^\circ$ ($m = \text{ctg } \beta = 2$). Dubina filtracionog toka je $X = 0,8 \text{ m}$, a nagib pijezometarske linije jednak je nagibu β . Parametri čvrstoće tla su: $c' = 4,8 \text{ kPa}$ i $\phi' = 30^\circ$. Utvrditi da li je ova kosina stabilna.

Rešenje. Potrebne trigonometrijske vrednosti su: $\cos \beta = \cos 27^\circ = 0,891$; $\text{tg } \beta = \text{tg } 27^\circ = 0,510$; $\text{tg } \phi' = \text{tg } 30^\circ = 0,577$. Vertikalna debljina sloja iznosi: $H = T / \cos \beta = 1,5 / 0,891 = 1,68 \text{ m}$. Na osnovu (3.197), za pijezometarsku liniju koja je paralelna sa kosinom: $r_u = 0,23$. Sa pomoćnih dijagrama na Slici 3.135 očitavaju se vrednosti parametara $A = 0,7$ i $B = 2,5$. Na osnovu (3.198) je: $FS = 1,19 \approx 1,2$ (kosina je stabilna). Inverznim postupkom, može se sračunati kritični nagib kosine pod kojim ona postaje nestabilna; za $FS=1$, $\text{tg } \beta = 0,666$, $\beta = 34^\circ$, kritični nagib je 1:1,5.

3.10.4.4 Sleganje nasipa

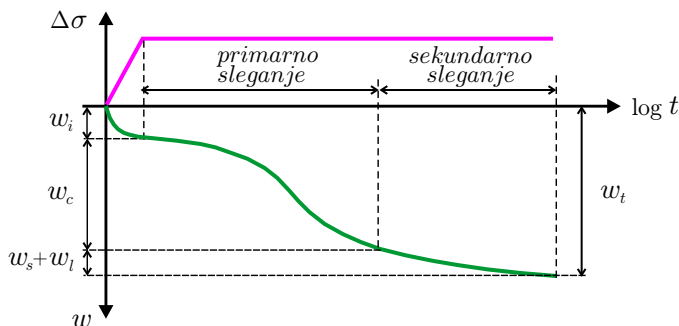
Naponsko stanje tla ispod objekta se menja nakon njegove izgradnje, a odgovarajuće vertikalno pomeranje se zove *sleganje*. Ako je nasip izgrađen na peščanom tlu, sleganje se odvija kao kratkoročan proces već u toku izgradnje, dok kod glinovitog tla, sleganje podrazumeva najpre konsolidaciju tla, a zatim dugotrajni proces vertikalnih (ali i horizontalnih) pomeranja.

Problem sleganja se kod nasipa tretira kao ravanski (u vertikalnoj ravni), što znači da se proračun obavlja po poprečnom preseku nasipa. Sleganje nasipa je naročito značajno jer utiče na stepen zaštite od poplava.

Na Slici 3.136 prikazan je dijagram sleganja kroz vreme. Proces se može podeliti u tri faze. Već u periodu izgradnje nasipa u njegovoj podlozi (ali i u telu nasipa) dolazi do trenutnog sleganja u nedreniranim uslovima (w_i), da bi zatim došlo do dužeg perioda *primarnog sleganja* (w_c), koje karakteriše konsolidacija tla sa disipacijom pornih pritiska.

Kada se optereti zasićeno malo propusno tlo, pritisak $\Delta\sigma$ [Pa] u početku prihvata voda (nestišljiv fluid) u porama tla, tako da se javlja *višak* purnog pritiska jednak pritisku $\Delta\sigma$. Ovaj višak pritiska se postepeno smanjuje sa izlaskom vode iz tla u procesu primarne konsolidacije.

Finalna faza procesa je *sekundarno sleganje*, koje nastaje usled puzanja tla¹¹ w_s [m], kao i nepovratnih bočnih pomeranja tla w_l [m]. Sekundarna konsolidacija puzanjem je karakteristična za meka tla (glina, treset, tla sa organskim primesama).



Slika 3.136: Komponente sleganja u zavisnosti od opterećenja i vremena [33].

Na terenu se sleganje prati sistematskim merenjem u pravilnim vremenskim intervalima. Sleganje se može prognozirati pomoću računskih modela, ukoliko to dozvoli obim i kvalitet ulaznih podataka.

3.10.4.5 Spoljašnja erozija nisipa

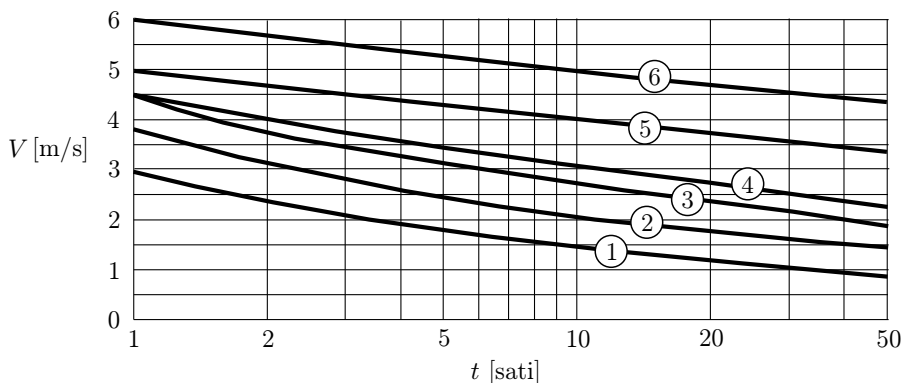
Pored hidrostatičkih i hidrodinamičkih sila, na nasip može nepovoljno delovati vodni tok kroz proces erozije kosine nasipa. Zbog toga je neophodno da se utvrdi najveći očekivani tanagencijalni napon i da se on uporedi sa kritičnim tangencijalnim naponom za karakteristične krupnoće zrna sa granulometrijske krive materijala od koga je izgrađen nasip. Reč je o standardnom pristupu kritičnog tangencijalnog napona koji se primenjuje i u analizi stabilnosti rečnog korita, a koji je zasnovan na poznatoj Šildsovoj zavisnosti (KI-9.2.3). Alternativno, može se koristiti i pristup kritične brzine toka (KI-9.2.1).

Međutim, specifičnost nasipa je značajno učešće vezanog tla i prisustvo travnatog pokrivača. Podsetimo se materijala koji se često koriste u izgradnji nasipa (KI-8.2.2.1-Tab:8.2):

- vezani (kohezivni) materijali: glina $d < 5 \mu\text{m}$; prašina $d < 50 \mu\text{m}$
- nevezani sitnozrni materijali: pesak $50 \mu\text{m} < d < 2 \text{mm}$
- nevezani krupnozrni materijali: šljunak $d > 2 \text{mm}$; kamen $d > 50 \text{mm}$

¹¹Reč je o pojavi rastezanja materijala pod dugotrajnim konstantnim opterećenjem; u slučaju nasipa, puzanje je lagano ugibanje tla, kada nastaju plastične deformacije pri naprezanjima koja su manja od čvrstoće na smicanje.

Za procenu otpornosti zatravljenih nasipa na eroziono dejstvo rečnog toka može se koristiti dijagram na Slici 3.137.



Slika 3.137: Zavisnosti između brzine toka V i trajanja t za procenu stabilnosti zatravljenih kosina nasipa ako su: 1 – lošeg kvaliteta; 2 – prosečnog kvaliteta; 3 – dobrog kvaliteta; trava u kombinaciji sa ojačanjem kosine: 4 – mreže; 5 – tepisi; 6 – betonski raster elementi [33].

3.10.4.6 Unutrašnja erozija nasipa

Unutrašnja erozija nasipa obuhvata sve procese pokretanja i transporta čestica tla pod uticajem filtracionog strujanja, unutar nasipa, na granici sa podlogom i unutar podloge. Dva su uslova neophodna da bi došlo do unutrašnje erozije tla: (i) da smičući napon izazvan filtracijom premaši čvrstoću na smicanje osnovnog tla i (ii) da šupljine unutar tla (pore i pukotine) budu vodoljno velike da propuste pokrenute čestice.

Otpornost na unutrašnju eroziju zavisi od vrste tla; kod glinovitih materijala otpornost je posledica kontaktnih kohezionih sila na nivou čestica, a njihov transport se odvija u vidu suspenzije; kod nevezanih, zrnastih materijala, otpornost zavisi od težine čestica pod vodom i trenja, a transport se odvija klizanjem i kotrljanjem.

U zavisnosti od mehanizma erozije, razlikuju se:

- *progresivna erozija*, koja nastaje pokretanjem čestica pri filtraciji kroz tlo bez filterske zaštite i manifestuje se pojavom mutnih izvora u podnožju nasipa (u branjenom području);
- *koncentrisana erozija* predstavlja intenzivno odnošenje čestica tla kroz formirane cevaste pukotine u telu nasipa i/ili njegovoj podlozi;
- *sufozija* je selektivno odnošenje sitnih čestica iz strukturnog skeleta tla;
- *kontaktna erozija* je odnošenje sitnih čestica na granici sa slojem krupnijih čestica.

Proces unutrašnje erozije odvija se u četiri faze. U prvoj, dolazi do pokretanja čestica. U zavisnosti od stanja filterske zaštite, drugoj fazi evoluira proces ispiranja

čestica. U trećoj fazi dolazi do formiranja erozionih cevi u telu nasipa. Na kraju, u četvrtoj fazi nastaje urušavanje nasipa usled unutrašnje erozije.

Progresivna erozija. Ovaj vid erozije podrazumeva formiranje erozionih cevi u telu nasipa i/ili njegovoj podlozi, kroz koje se čestice transportuju u smeru filtracionog toka i sa njim izbijaju u podnožju nasipa u vidu mutnih izvora. U periodu poplava, sa porastom hidrostatičkog opterećanja na nasip, erozione cevi se progresivno se šire.

Ovaj vid erozije progresivno skraćuje dužinu filtracionog toka i povećava hidrauličke gradijente. Na taj način se intenzitet erozionog procesa povećava. Ovo je karakteristično za peščane slojeve ispod glinovitih slojeva, kao i za podlogu neposredno ispod vodonepropusnog jezgra, u kojoj se može formirati eroziona cev.

Koncentrisana erozija. Ovaj vid erozije vezan je za privilegovane pravce strujanja vode, kao što su postojeće kaverne ili pukotine u telu nasipa. Voda erodira njihovu unutrašnju površinu, što vremenom povećava proticajni presek. Na delu gde ima gline, formira se „svod”, a kaverne i pukotine se povezuju i formiraju erozione cevi. Konvencionalni modeli za proračun koncentrisane erozije su slični modelima za vučeni nanos [33]:

$$\varepsilon = C_e (\tau - \tau_c), \quad (3.199)$$

gde je: ε – jedinični maseni pronos erodiranog materijala [$\text{kg}/(\text{s m}^2)$], τ – tangencijalni napon na površinu cevi [Pa], τ_c – kritični tangencijalni napon za pokretanje čestica tla [Pa], a C_e – koeficijent erozije [s/m].

Empirijski parametri τ_c i C_e karakterišu otpornost tla na eroziju. Eksperimentalno je utvrđeno da pri ustaljenoj filtraciji, prečnik erozione cevi vremenom eksponencijalno raste [33].

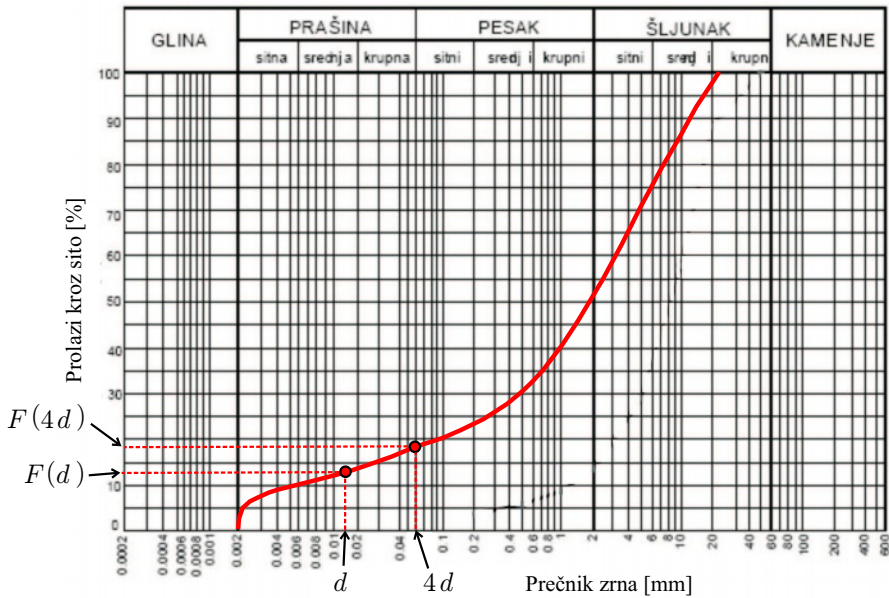
Sufozija. Već je rečeno da se radi o filtracionom razaranju porozne sredine pokretanjem i odnošenjem finih frakcija, dok osnovni skelet tla trpi male promene, ili čak ostaje nepromenjen. Ova pojava je karakteristična za tla sa neujednačnim granulometrijskim sastavom (mešavne prašine, peska i šljunka). Posledica sufozije je sleganje viših slojeva tla. Sufozija se može javiti i pri površini nasipa, tamo gde filtracioni tok izbijaju na kosinu nasipa. Pored ranije navedenih granulometrijskih kriterijuma za procenu rizika od sufozije, postoji i ovakav kriterijum [33]:

$$\min [F(4d) - F(d)] \leq 0,15 \quad (3.200)$$

gde je: d – izabrani prečnik zrna, a $F(d)$ – njegova zastupljenost (Slika 3.138).

■ **Primer 3.33.** Koristeće granulometrijsku krivu na Slici 3.138 i kriterijum (3.200), utvrditi ima li opasnosti od sufozije.

Rešenje. Za niz izabranih prečnika d u rasponu $0,002 \div 5$ mm, sa granulometrijske krive na Slici 3.138 očitane su vrednosti $4d$, kao i odgovarajuće zastupljenosti $F(d)$



Slika 3.138: Kriterijum za ocenu rizika od sufozije prema [33]; prikazana kriva empirijske raspodele krupnoće zrna pokazuje kolika je procentualna zastupljenost zrna sitnijih od zrna prečnika d (granulometrijska kriva „manje od“).

i $F(4d)$. Na osnovu podataka koji su dati u Tabeli 3.56, može se zaključiti da najmanja vrednost $F(4d) - F(d)$ iznosi 0,04 ($< 0,15$), što znači da u ovom slučaju postoji opasnost od sufozije.

Tabela 3.56: Procena opasnosti od sufozije u Primeru 3.33

d [mm]	$4d$ [mm]	$F(d)$ [%]	$F(4d)$ [%]	$F(4d) - F(d)$ [%]	$F(4d) - F(d)$ [-]
5	20	70	97	27	0,27
2	8	50	82	32	0,32
0,5	2	30	51	21	0,21
0,1	0,4	20	27	7	0,07
0,03	0,12	15	20	5	0,05
0,006	0,024	10	14	4	0,04
0,002	0,008	0	12	12	0,12

Kontaktna erozija. Ovaj vid unutrašnje erozije nastaje na granici između dva materijala sa izraženo različitim granulometrijskim sastavima, u uslovima kada nema filtarskog prelaznog sloja, ili kada filterska pravila nisu zadovoljena.

Većina modela kontaktne erozije opisuju slučaj nevezanog, peščanog materijala na sloju finog, prašinstog i glinovitog materijala. Prognoze se zasnivaju na Šildsovoj

zavisnosti i Darsijevoj brzini filtracije. Jedan od izraza za kritičnu brzinu filtracionog toka pri kojoj može doći do kontaktne erozije ima oblik [33]:

$$U_{cr} = \alpha \lambda_o \sqrt{g \Delta d_{50}}, \quad (3.201)$$

gde su parametri gornjeg (peščanog) sloja: $\alpha = 0,65$ – emprijski koeficijent, λ_o – poroznost, Δ – relativna gustina, d_{50} – srednji prečnik zrna. (Izraz (3.201) podseća na izraze za brzinu pokretanja vučenog nanosa, KI-9.2.1). Sličnim eksperimentalno izvedenim izrazima opisan je i obrnut slučaj kontaktne erozije, kada se glinoviti materijal nalazi na sloju peščanog materijala.

3.10.4.7 Seizmički uticaji

Zemljotresi izazivaju dinamičko, ciklično opterećenja nasipa, narušavajući stabilnost materijala u nasipu i tla oko njega. Seizmička analiza treba da obuhvati: verovatnoću zemljotresa, proveru seizmičke stabilnosti, predviđanje sleganja krune nasipa i ocenu mogućnosti zemljotresom indukovane likvefakcije. Generalno, seizmička otpornost nasipa zavisi od čvrstoće i krutosti ugrađenog materijala.

Seizmički hazard. Determinističkim ili probablističkim metodama potrebno je proceniti stepen seizmične opasnosti, seizmički rizik, ili *seizmički hazard*. Probablistička analiza daje kao rezultat krive verovatnoće prevazilaženja nekog seizmičkog parametra (jačine zemljotresa, maksimalnog ubrzanja tla i dr.). Na regionalnim seizmičkim kartama jačina zemljotresa se prikazuje izolinijama, u zavisnosti od povratnog perioda. Svaka seizmička pobuda izaziva vibracije, koje se analiziraju u frekventnom domenu i kao rezultat se dobijaju funkcije *spektralne gustine*, koje su takođe bitne za projektovanje objekata.

Seizmička stabilnost kosina. Za izučavanje ovog važnog svojstva na raspolaganju je čitav niz analitičkih alata, od pseudostatičkih modela kliznih blokova, do dinamičkih, višedimenzionih modela koji omogućavaju predviđanje zemljotresom izazvanih deformacija [33].

Sleganje krune nasipa. Na osnovu podataka o seizmičkim uticajima u prošlosti, formiraju se empirijske zavisnosti procentualnog sleganja krune nasipa u zavisnosti od maksimalnog ubrzanja stenovite podloge i magnitude zemljotresa.

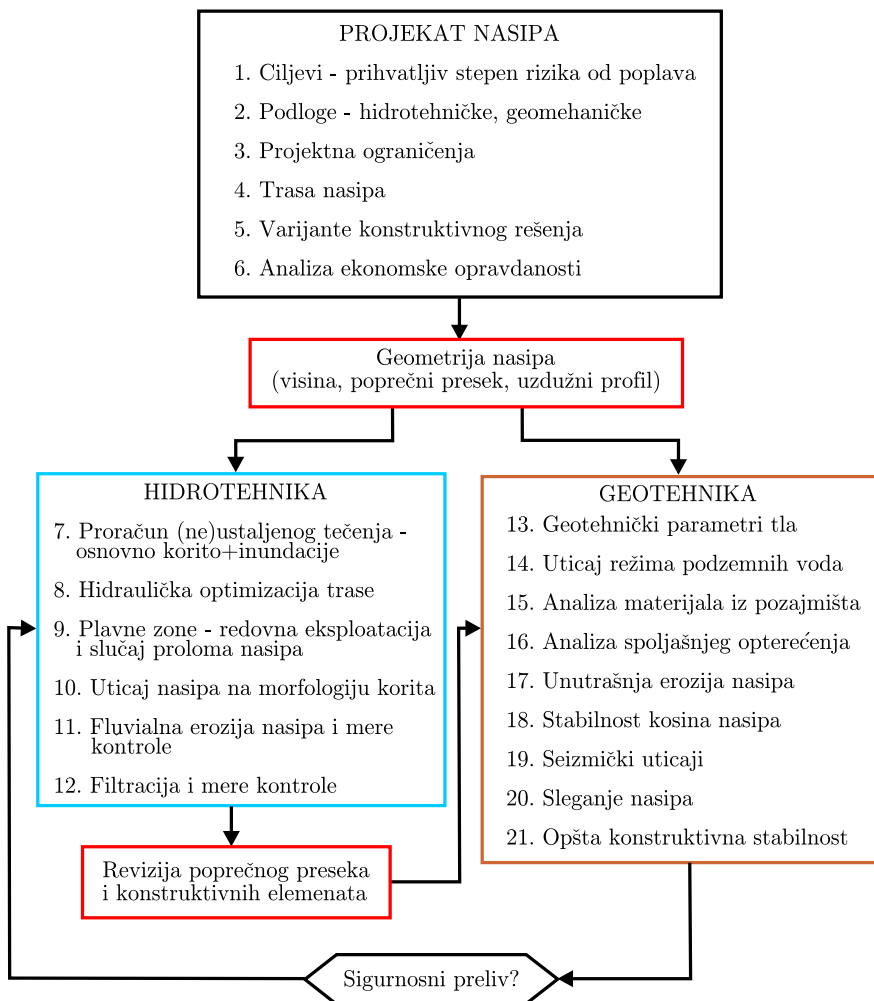
Likvefakcija. Ranije spomenut termin „likvefakcija” označava proces gubitka čvrstoće nezvanog tla, usled viška purnog pritiska izazvanog monotonim i cikličnim seizmičkim opterećenjem. Višak purnog pritiska dovodi do toga da čestice tla izgube međusobni kontakt, a posledica je smanjenje efektivnog napona, omekšanje tla i njegovo pretvaranje u gustu fluidnu masu.

Termin „*osetljivost tla na likvefakciju*” meri stepen otpornosti tla na ciklično smičuće opterećenje (izazvano talasnim prostiranjem seizmičke pobude kroz tlo). Zavisi od teksture tla, krupnoće čestica, poroznosti i početnih uslova. „Livefacioni potencijal” tla, koji predstavlja rizik da se likvefakcija javi u datim seizmičkim

uslovima, zavisi od jačine seizmičke pobude i osetljivosti tla na likvefakciju. Likvefakcija je naročito opasna za peskove uniformne krupnoće zrna. U specijalizovanoj literaturi može se naći nekoliko modela za predviđanje rizika od likvefakcije [33].

3.10.5 Nasip: hidrotehnički ili geotehnički objekat?

Prethodni prikaz nasipa kao funkcionalno složenog objekta upućuje na zaključak da su u njegovom projektovanju podjednako zastupljene hidrotehnička i geotehnička struka i da se one delimično preklapaju i dopunjuju. Ova specifičnost projektovanja nasipa shematski je prikazana dijagramom na Slici 3.139. (Projekat za izvođenje nasipa čini posebanu tehničku dokumentaciju.)



Slika 3.139: Hidrotehnika i geotehnika u projektovanju nasipa



Iz arhive: obaloutvrde u Beogradu; gore: obala ispod pilona Mosta na Adi;
dole: šetališna bankina obaloutvrde na Dunavu, sa vidljivom nožicom pri niskom
vodostaju.

Glava 4

Regulacioni radovi

4.1 Uvodne napomene

Radovi na regulisanju reka su raznovrsni, od onih koji se preduzimaju na dugačkim deonicama radi stabilizacije korita, uspostavljanja ili održavanja plovnog puta i zaštite od poplava, do radova koji imaju lokalni karakter, u zoni mostova, ušća, vodozahvata i drugih objekata.

Mnogo je dokaza da su se radovi na rekama izvodili od vajkada – od Kine, Mesopotamije i starog Egipta, perioda Renesanse (Slika 4.1) i Industrijske revolucije, do danas, pri čemu se motivi nikada nisu menjali, samo su metode vremenom evoluirale, a sredstva izvršenja su se tehnološki usavršavala.



Slika 4.1: *Regulacija reka u delu Leonarda da Vinčija (1452-1519): sleva na desno: radovi na zaštiti od poplava – rasteretni obodni kanal na reci Arno; radovi na stabilizaciji korita – obaloutvda i pragovi na reci Arno kod Firenze; radovi na plovnoj reci – katamaren bager kao preteča savremenih bagera vedričara [262, 175].*

Regulacioni radovi zahtevaju racionalnost projektovanja i efikasnost izvođenja. Podrazumevaju *etapnost izvođenja*, ne samo zbog realizacije u skladu sa finansijskim resursima, već i zbog prilagođavanja reke novonastalim okolnostima. Etapno izvođenje radova omogućava da se amortizuju neizvesnosti u projektovanju, a gradnja lakše prilagodi promenama hidrauličkog i/ili morfološkog režima, nastalih u periodu od projektovanja do završetka radova.

Osnova za započinjanje regulacionih radova je odgovarajuća tehnička dokumentacija. Način izvođenja radova zavisi od raspoloživih resursa (materijala, mehanizacije, radne snage itd.), o kojima treba voditi računa još u fazi razmatranja varijantnih projektnih rešenja.

Finansijski gledano, optimalno projektno rešenje je kompromis između: (a) većeg investicionog ulaganja, a manjih troškova održavanja i (b) manjeg investicionog ulaganja, a većih troškova održavanja. Upravo troškovi održavanja (o kojima se u našoj praksi ne vodi dovoljno računa) predstavljaju važan faktor u odlučivanju.

Praćenje i održavanje regulacionih građevina zahteva odgovarajući Program, koji na *godišnjem nivou* definiše:

1. procedure i vremenski raspored praćenja objekata;
2. radove na redovnom, tekućem održavanju;
3. finansijska sredstva za tekuće održavanje;
4. specifikaciju radova na sanaciji objekata u vanrednim prilikama;
5. izvore finansijskih sredstava za vanrednu sanaciju objekata.

Za uspešnu realizaciju programa neophodno je: planiranje u skladu sa preporukama i standardima, definisanje prioriteta u slučaju nedovoljnih budžetskih sredstava i formiranje baze podataka sa konstruktivnim elementima izvedenih građevina.

Regulacioni radovi obuhvataju:

- izgradnju standardnih regulacionih građevina;
- zaštitu obala od erozije primenom biotehničkih mera;
- prosecanje rečnih krivina;
- pregrađivanje vodotoka;
- uređenje ušća;
- zaštitu suvozemne saobraćajne infrastrukture;
- bagerovanje vodotoka.

Radovima na zaštiti od poplava biće posvećeno naredno poglavlje.

4.2 Izgradnja i održavanje građevina

Izgradnja regulacionih građevina sastoji se od mnogih aktivnosti. One se ovde obrazlažu manje-više načelno, a izvesne specifičnosti, koje proizilaze iz lokalnih uslova i primenjene tehnologije izvođenja, mogu se uočiti u prikazanim ilustrativnim primerima iz naše prakse.

4.2.1 Obaloutvrde

Izgradnja obaloutvrda obuhvata radove prema sledećem redosledu.

Geodetsko snimanje terena. Snimanje tzv. „nultog stanja” služi da bi se, ponovljenim snimanjem po završetku radova, mogao utvrditi obim izvedenih radova i iznos finansijskih obaveza prema Izvođaču. Tu spada i obeležavanje regulacione linije i buduće regulisane obale, prema projektnom rešenju.

Ravnanje terena. Ova aktivnost započinje čišćenjem terena i uklanjanjem suviše vegetacije. U zavisnosti od položaja regulacione linije i projektnog nagiba, obavlja se iskop (u slučaju da obala zadire u buduće regulisano korito), ili nasipanje (u slučaju da se buduća obala nalazi u postojećem koritu). Pri izvođenju radova neophodno je voditi računa da projektovani ugao kosine buduće obaloutvrde, bude bar za 5° manji od ugla mirovanja osnovnog materijala obale. Za obeležavanje projektovanog nagiba obaloutvrde koriste se drveni „šabloni” (Slika 4.4).

Izgradnja nožice. Podloga nožice (fašinski madrac, ojačani geotekstil, tepih od šljunka ili tucanika) postavlja se na rečno dno, ispod nivoa vode. Prethodno se, po potrebi, dno ravna sa plovnog objekta ili sa obale, što podrazumeva bagerovanje viška materijala ili popunjavanje proloka. Najteža faza je potapanje fašinskog madraca ili madraca od geotekstila (Slika 4.2).



Slika 4.2: Ugradnja elastičnog temelja obaloutvrda; sleva na desno: fašinski madrac i njegovo odvoženje do mesta ugradnje [290]; polaganje podloge od geotekstila pomoću dizalice sa nosećim ramom [291].

Fašinski madrac se formira na obali, gde je potrebno izgraditi rampu za njegovo spuštanje na vodu. Zatim se madrac tegli do mesta ugradnje i na kraju potapa tako što se optereti kamenom.

Geotekstil se takođe doprema do mesta ugradnje na posebnom pontonu ili plovilu, gde se polagano spušta sa pomične rampe, ili pomoću dizalice (Slika 4.2). Ugradnja je olakšana kada se koriste specijalni kompozitni geotekstili sa balastnim slojem (peska, gline) za potapanje.

Već je rečeno da se kod nas često na velikim rekama podloga (debljine oko 0,5 m) formira od krupnog šljunka ili tucanika. Nasipanje se obavlja sa obale ili plovnog objekta. U slučaju podvodne ugradnje, za kontrolu položaja podloge za nožicu mogu se po potrebi angažovati gnjurci.

Telo nožice za najčešće gradi od krupnog kamena. Kameni blokovi se dopremaju u teretnom plovilu, a postavljaju na podlogu nožice slobodnim istovarom, ili polaganjem pojedinačnih komada pomoću plovne dizalice sa grabilicom. Na ovaj način se postupa sve dok visina nožica ne dostigne nivo radne vode, posle čega se kamen ređa ručno da bi se postigao projektom predviđeni trapezni poprečni presek nožice. Na kraju se formira uporna greda od tesanog kamena ili armiranog betona. Betoniranje upornih greda se obavlja na licu mesta. Po završetku formiranja tela

nožice, na njenoj kosini ka obali se postavlja obratni filtar od prirodnog materijala ili geotekstila. Prostor između filtra i obale popunjava se lokalnim materijalom iz obližnjeg pozajmišta ili, ako je moguće, nanosom iz rečnog korita. Ukoliko je nožica formirana od izuzetno krupnog kamena (uslovno $> 0,6$ m), uporna greda se može izostaviti.

Izrada obloge obaloutvrde. Obloga u vidu kamenog nabačaja polaže se na prethodno izrađen filtar. Generalno, filtri od geotekstila imaju prednost zbog jednostavnosti i brzine ugradnje. Međutim, za neke granulometrije osnovnog tla sa dominantnim sadržajem prašinstog materijala, nije moguće naći filtar od geotekstila dovoljno otporan na kolmiranje, pa je peščani filtar jedino rešenje. Ugradnja kamena se obavlja pri niskim vodostajima sa obale pomoću mehanizacije (Slika 4.3), ili sa vode, pomoću plovne dizalice sa grajferom. Ručno ređanje kamena je ekonomski opravdano samo na kratkim deonicama, ili u urbanim sredinama, iz estetskih razloga (Slika 4.4). Po kruni obaloutvrde formira se završni venac u vidu tesanih kamenih blokova, ili u vidu armiranobetonske grede. Završna faza izgradnje je ukorenjenje obaloutvrde.



Slika 4.3: Izgradnja obaloutvrde od kamenog nabačaja na podlozi od geotekstila na velikom aluvijalnom vodotoku [141].



Slika 4.4: Izgradnja obaloutvrde od sлагanog kamena na malom vodotoku (reka Bolečica, desna pritoka Dunava, u Leštanima kraj Beograda).

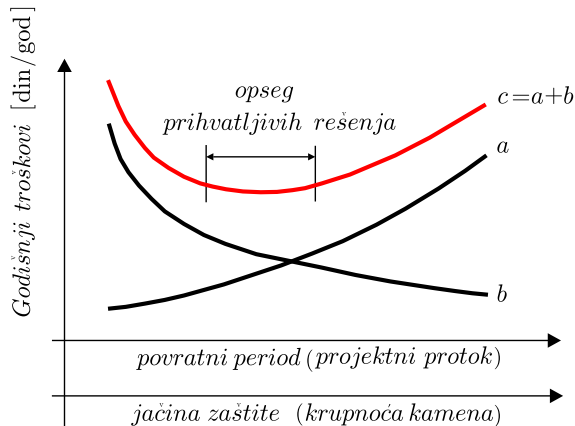
Racionalno je da radove izvodi lokalna operativa, sa iskustvom na sličnim radovima i sa mehanizacijom koja je već na terenu. Favorizovanje lokalne operative može imati ekonomske prednosti čak i ako se smanji stepen mehanizacije, a poveća obim manuelnog rada ili tradicionalnih metoda izgradnje.

Dostupnost materijalnih i ljudskih resursa je bitan element logistike gradilišta. Razvijenost infrastrukture bitno utiče i na način izgradnje. Tamo gde je ograničen pristup obali, radovi se obavljaju sa vode, uz pomoć plovnih objekata sa grajferima. Alternativno, izgradnja obaloutvrde se obavlja pokretnom mehanizacijom sa obale. Podrazumeva se da su troškovi izgradnje ili adaptacije puteva za dopremu materijala i snabdevanje gradilišta obuhvaćeni predračunom radova.

Osmatranje. Kao sve rečne regulacione građevine od kamenog nabačaja, obaloutvrde su podložne oštećenjima. Zbog toga je neophodno njihovo osmatranje. *Redovno osmatranje* se obavlja sa vode i sa obale, uz periodično snimanje korita. *Vanredno osmatranje* se preduzima posle kriznih hidroloških događaja (velike vode, led), kao i zemljotresa, da bi se utvrdio stepen oštećenja i obim sanacionih mera.

Popravke i obnova. Popravke obima do 10% površine obaloutvrde spadaju u mere redovnog (tekućeg) održavanja i imaju za cilj da se mala oštećenja odmah otklone, pre nego što progresivno narastu do te mere da ugroze stabilnost objekta. Vanredne popravke se preduzimaju posle poplava, ledenih perioda i zemljotresa.

Za obaloutvrde (kao i druge regulacione građevine) važno je pitanje učestalosti radova na sanaciji. Već je rečeno da se dobro projektno rešenje zasniva na kompromisu između troškova izgradnje i troškova održavanja. Na primer, ako se projektni protok veže za 5-godišnju veliku vodu, „jačina zaštite” (krupnoća kamena) zahtevaće značajno manje investicije nego ako se projektni protok veže za 100-godišnju veliku vodu.



Slika 4.5: Optimizacija troškova: a - kriva diskontovanih godišnjih troškova izgradnje; b - kriva diskontovanih troškova održavanja; c - sumarna kriva.

S druge strane, troškovi održavanja u prvom slučaju biće znatno veći nego u drugom, zbog češćih popravki. Zato se može desiti da tokom vremena, kumulativni troškovi održavanja u varijanti sa kraćim projektnim povratnim periodima (5, 10 god.) premaše troškove u varijanti sa dužim povratnim periodom (100 godina). Optimalno projektno rešenje se nalazi u zoni minimuma sumarne krive godišnjih

troškova izgradnje i održavanja regulacione građevine (Slika 4.5).

Program održavanja. Ovaj dokument, koji ima za cilj obezbeđenje sistematskog održavanja, ima tri komponente.

(i) *Podaci o vodotoku i obaloutvrđi* po deonicama. Za vodotok se navode: karakteristični protoci, dubine i brzine, sastav obale, vegetacija, nivoi podzemne vode, namena površina u priobalju. Tehnički podaci o objektu obuhvataju: kote, nagib, dimenzije, konstruktivne detalje, datum izgradnje i sanacije. Arhiva obuhvata crteže i fotografije.

(ii) *Procena stanja obaloutvrde.* Podaci se prikupljaju vizuelnom inspekcijom i terenskim merenjem. (Kod velikih i značajnih objekata, predviđa se oskultacija pomoću sistema za kontinualno praćenje deformacija.) Sleganje obaloutvrde i oštećenje obloge prati se pomoću hronoloških zapisa i dijagrama.

(iii) *Planiranje radova* i dinamika njihovog izvođenja realizuju se u skladu sa hidrološko–meteorološkim i terenskim uslovima, kao i finansijskim mogućnostima. Redosled i prioritet pojedinih pozicija, prikazuju se gantogramom aktivnosti.

Rekonstrukcija. Krupniji zahvati se preduzimaju u slučaju izmene hidrološko-hidrauličkog režima vodotoka, ili promene namene same obaloutvrde. Na primer, kanalisanje vodotoka može zahtevati detaljnu rekonstrukciju obaloutvrda. Isto važi kada obaloutvda treba da postane šetalište, pa se mora konstruktivno prilagoditi novim zahtevima.

4.2.2 Prave paralelne građevine

Način građenja prave paralelne građevine (PPG) zavisi od obima radova i potrebnog stepena mehanizacije. Obično se koriste plovni begeri kašikari za frontalno ili čeonno polaganje kamena u telo PPG, na prethodno postavljenoj podlozi.

Izgradnja tela PPG napreduje *od uzvodnog kraja nizvodno*. Izgradnja kamenih traverzi se, u zavisnosti od njihove dužine i dubine vode, obavlja pomoću bagera kašikara, napredujući *frontalno*.

Ako je obim radova relativno mali, isplativije je da se obave ručno. U tom slučaju se započinje izgradnom traverzi, preko kojih se zatim doprema materijal za gradnju tela PPG u periodu niskih vodostaja. Na mestu ukorenjenja traverze, obala se lokalno štiti obaloutvrdom od kamenog nabačaja, na dužini od oko petnaestak metara (uslovno, 5 m uvodno i 10 m nizvodno).

Kako je PPG prelivna građevina, posebna pažnja se poklanja oblikovanju i solidnosti izrade krune tela građevine. Ovaj deo se oblaže *ručno* sлагanim kamenom. Na plovnim rekama, postavljaju se znaci za obeležavanje položaja potopljene PPG (šipka sa zastavicom, ili plovci usidreni za rečno dno). Za održavanje i sanaciju PPG primenjuju se iste preporuke kao one kod obaloutvrda.

4.2.3 Naperi

Gradnja sistema napera počinje od najuzvodnijeg napera i odvija se *nizvodno*, da bi uslovi za rad bili što povoljniji. Kod napera od kamena, redosled radova je sličan kao kod obaloutvrda. Najpre se obavljaju geodetska snimanja na terenu, sa označavanjem položaja napera. Potom se u vreme niskih, stagnirajućih vodostaja pristupa radovima na vodi. Ako je potrebno, prethodno se dno rečnog korita ravna na mestima budućih napera.

Polaganje podloge. Podloga u vidu fašinskog madraca, geotekstila, tepiha od krupnog šljunka ili tucanika, predstavlja savitljivi temelj za telo napera. Kako je naper prelivna građevina, podloga mora imati dugačke prepuste van tela napera, u cilju zaštite korita od lokalne erozije (Slika 3.71). Iskustveno, dužina prepusta treba da bude: $L_p = 3 h_e + (2 \div 4)$ m, gde je: h_e – prognozirana dubina erozionog levka. Najduži prepusti su u zonama glave napera i njegove nizvodne kosine. Podloga se polaže iz plovila na isti način kao kod nožice obaloutvrde.

Izgradnja tela napera. Telo napera se najčešće formira od krupnog kamena. Na velikim rekama izgradnja je mehanizovna. Kamen se doprema teretnim plovilom i jednovremeno ugrađuje po celoj dužini napera, pomoću bagera kašikara (Slika 4.6).



Slika 4.6: Izgradnja napera na Savi – sektor Mrđanovac, km 92+280 [49].

Kod malih vodotoka, ugradnja kamena se može obavljati ručno, od korena ka glavi. Ispod nivoa radne vode, telo napera se formira u vidu kamenog nabačaja, a iznad ovog nivoa, slaganjem kamena u projektovanu pravilnu geometrijsku figuru.

Lokalna zaštita obale. Ukorenjenje napera je važan konstruktivni element. Zaštitu korena napera lokalno obezbeđuje obaloutvrda. Mere osmatranja i održavanja, opisane kod obaloutvrda, mogu se primeniti i na sisteme napera.

Ukoliko se u eksploataciji pokaže da zbog prevelikog razmaka napera, izgrađeni sistem ne daje željene efekte (što je propust u projektovanju), između postojećih napera mogu se naknadno izgraditi *međunaperi*, kao sekundarne građevine manjih dimenzija, koje nisu direktno izložene udaru rečnog toka.

4.2.4 Pregrade i kaskade

Pregrađivanje vodotoka se obavlja u periodu niskih vodostaja. Nasipanje pregrade od kamena može biti čeon, sa obe obale, ili jednovremeno, po celoj dužini objekta. Posebna pažnja se pri izgradnji mora obratiti na:

- (i) koren pregrade sa zaštitnom obaloutvrdom (uzvodno i nizvodno od pregrade) i
- (ii) slapište za zaštitu korita od lokalne erozije (tepih od krupnog kamena).

Najmanji utrošak materijala (a time i cenu izgradnje) imaju pregrade postavljene upravno na tok. Međutim, ponekad hidraulički razlozi nose prevagu nad ekonomskim, pa se pregrade grade pod uglom u odnosu na glavni tok (videti prosecanje krivina u nastavku).

4.2.5 Pragovi

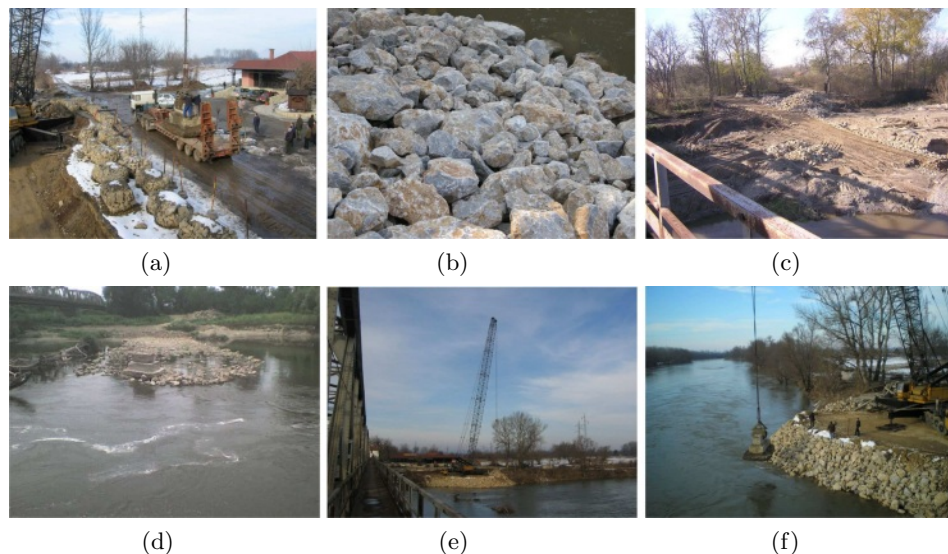
Izgradnji pragova prethodi hidrološka analiza da bi se utvrdile sezonske varijacije vodostaja i optimalni termin za početak radova pri maloj vodi, kao i trajanje malih voda koje određuje raspoloživo vreme za obavljanje radova.

Izgradnja. Projektom izvodnja radova definišu se neophodni resursi – materijal, mehanizacija i radna snaga, kao i redosled radova. Kod većih reka mora se izvršiti skretanje toka, da bi se radovi obavljali pod zaštitom zagata. To podrazumeva faznu realizaciju objekta: pripremne radove, nasipanje zagata prve faze, izgradnju praga pod zaštitom zagata, uklanjanje zagata prve faze, nasipanje zagata druge faze i izgradnju praga na preostalom delu korita. Izgradnja praga se ilustruje primerom na Slici 4.7.

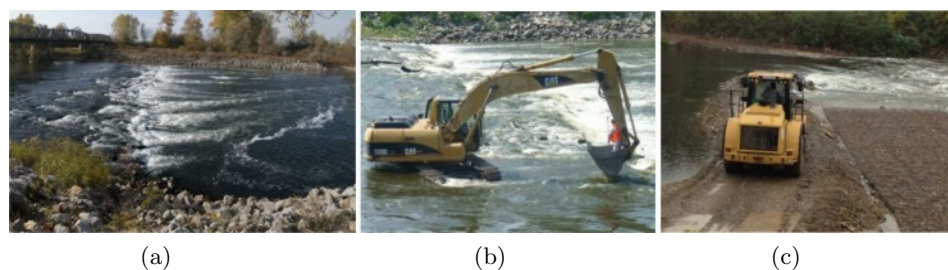
Sanacija i rekonstrukcija. Kao i druge regulacione građevine u rečnom koritu, pragovi i pripadajuće obaloutvrde su podložni deformacijama. Svaka poplava odnese izvesnu količinu kamena, pa su kontinualno praćenje objekta, kao i njegova periodična sanacija, obavezne aktivnosti. Sanacija se sastoji u popunjavanju proloka i popravkama praga, naročito njegove krune, koja je ugrožena turbulencijom prelivnog toka. Radovi se, kao i pri izgradnji praga, obavljaju pri niskim vodostajima (malim dubinama u zoni praga). Popunjavanje proloka kamenim blokovima ili džambo vrećama obavlja se sa obale pomoću bagera ili dizalice, a gde to nije moguće, kamen se izručuje sa kipera ili ugrađuje pomoću bagera guseničara sa nasutog zagata u rečnom koritu (Slika 4.8).

Održavanje praga zahteva izradu odgovarajućeg programa. Njime je predviđeno snimanje praga i pratećih obaloutvrda, kao i rečnog korita uzvodno i nizvodno od praga, naročito posle velikih voda. Geodetska snimanja moraju biti vezana za *vek iste* poprečne profile koji su georeferencirani i obeleženi na terenu.

Preporučuje se uspostavljanje stalnih hidrometrijskih profila (kod praga, uzvodno i nizvodno od njega), sa limnigrafima i automatizovanim transferom podataka o vodostaju. Programom praćenja i sanacije treba predvideti i povremeno merenje vučenog nanosa u cilju analize dinamike psamološko-morfološkog režima.



Slika 4.7: Izgradnja praga na Velikoj Moravi kod Svilajнца [122, 113, 108]; a – doprema gabionskih vreća i betonskih blokova; b – kamen za ugradnju; c – rampa na obali za pristup mehanizacije u toku nasipanja zagata prve faze; d – ostatak zagata prve faze po završetku izgradnje praga do polovine rečnog korita; e i f – pored kamena, u telo praga su ugrađeni i betonski blokovi, spuštani sa obale.



Slika 4.8: Sanacija praga na Velikoj Moravi kod Svilajнца [113, 108]; a – prelivanje praga pri maloj vodi sa uočljivom deformacijom krune praga; b – snimanje proloka duž krune praga ručnim sondiranjem iz korpe bagera guseničara; c – popravka krune praga sa nasutog zagata.

Za regulacione građevine od kamena, projektna dokumentacija mora da obuhvati Tehničke uslove za izvođenje radova. Ne ulazeći u detalje, ovde se samo nabrajaju zakonom predviđene stavke [267]: (1) opšti uslovi, (2) tehnički standardi za nasipanje i radove u kamenu, (3) gradilišna dokumentacija, (4) ugovor o izvršenju

radova sa pogodbenim predmerom, (5) odredbe primopredaje i tehničkog prijema objekta, (6) garantni rok i izmena tehničkih uslova i (7) mere zaštite na radu.

Izgradnju ili sanaciju realizuje kvalifikovani Izvođač, a prati stručni Nadzor. Korito se snima pre početka, u toku i po završetku radova.

4.2.6 Nasipi

Planiranje radova. U koncipiranju Programa radova treba da učestvuju stručnjaci raznih profila. Razmatraju se:

1. ograničenja (hidrološko-meteorološki uslovi, infrastruktura, ekologija);
2. dostupnost i kvalitet materijala za izgradnju, veze sa pozajmištima;
3. metode građenja i faznost izvođenja radova;
4. logistika gradilišta (mehanizacija, ljudski resursi, zaštita na radu itd.);
5. predračun radova revidovan na osnovu izvođačkog plana, stvarnih materijalnih resursa, usvojene metodologije građenja i očekivanih rizika.

Pri planiranju radova treba imati u vidu ograničenje radnog vremena usled: nivoa u reci, temperature, padavina, kao i sušnih perioda (sadržaj vlage je bitan faktor u gradnji nasipa). Tehnički uslovi za izvođenje radova i kontrolu kvaliteta su zakonski propisani [267].

Rizici. U izgradnji nasipa postoji niz potencijalnih rizika:

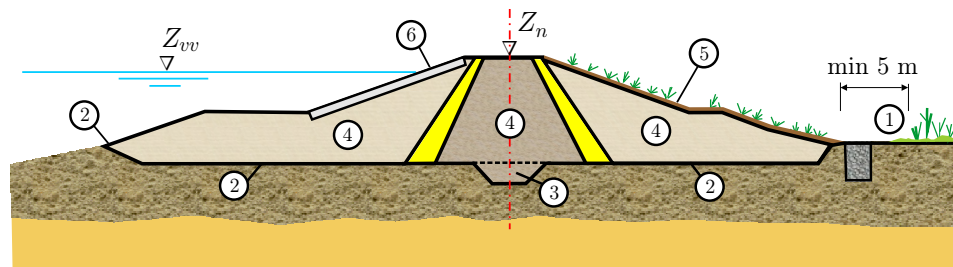
- nepotpun/netačan projekat (nepredviđeno plavljenje gradilišta, prekomerno procurivanje, nedovoljan kapacitet pumpi itd.);
- nepredviđeni geomehanički uslovi (nepovoljan sastav podloge, preterano sleganje itd.);
- nedostaci u izvođenju radova (pucanje betona, netačan predmer, izmene u toku izvođenja itd.);
- neočekivane socijalno-političke okolnosti;
- problemi u vezi sa zaštitom životne sredine.

Podloge. Kao u fazi projektovanja, tako se i u fazi gradnje prikupljaju i obrađuju podloge. Radi se o proveru na terenu pologa iz projektne dokumentacije, kao i njihovoj dopuni geodetskim snimanjem, dopunskim uzorkovanjem i analizom sastava tla, kao i praćenjem nivoa podzemnih voda putem mreže pijezometara.

Zemljani radovi. Na Slici 4.9 prikazan je redosled radova na izgradnji nasipa. Dominantni su zemljani radovi. Za njihovu uspešnu realizaciju, neophodna su gemehanička ispitivanja tla iz lokalnih pozajmišta i drugog materijala.

Standardizovana terenska ispitivanja pre i u toku izvođenja radova obuhvataju:

- granulometrijski sastav (prosejavanje kroz komplet sita);
- krupnoću prašine, gline, krupnih kamenih komada;
- gustinu tla (u suvom stanju, relativnu, poroznost);
- granice plastičnosti i indeks plastičnosti za fine frakcije;



Slika 4.9: Redosled radova na izgradnji nasipa; 1 – uklanjanje vegetacije u branjenom području; 2 – uklanjanje buldozerom površinskog sloja tla debljine 12÷50 cm sa organskim sadržajem; 3 – iskop rova u podini za temelj vodonepropusnog jezgra; 4 – nasipanje tela nasipa – kontrolisani istovar materijala, njegovo mehanizovano razastiranje i nabijanje prema projektnoj specifikaciji; 5 – nasipanje humusom branjene kosine i njeno zatravljenje; 6 – postavljanje (po potrebi) obloge od kamena, betonskih blokova, ili sintetičkih materijala za zaštitu kosine od erozije.

- gustinu tla in situ – na mestu ugradnje¹;
- sadržaj vlage, optimalnu vlažnost, korelaciju gustina – sadržaj vlage;
- sadržaj organskih materija i soli²;
- konzistenciju i čvrstoću tla na pritisak i smicanje (in situ);
- ugao unutrašnjeg trenja, koheziju, koeficijent filtracije.

Sabijanjem tla, njegova se svojstva značajno menjaju – smanjuje se stišljivost i vodopropusnost, a povećava čvrstoća na smicanje. Merenja zbijenosti se obavljaju u tri faze: pre početka radova, u toku radova i po njihovom okončanju. Pre početka radova ispituje se tlo iz jame pozajmišta i iz podine. Ovi podaci su neophodni za ocenu kvaliteta tla i specifikaciju optimalne mehanizacije za razastiranje tla i njegovo nabijanje prema projektnim uslovima.

U toku radova, geomehanička ispitivanja služe za kontrolu ugradnje materijala, a po okončanju radova, za potvrdu da je izgradnja nasipa obavljena u saglasnosti sa ugovorom. Kako ne postoji univerzalna mehanizacija za nabijanje svih vrsta tla i za sve uslove pod kojim se radovi izvode, preporučuje se ispitivanje na *probnoj deonici nasipa*, sa ciljem da se utvrdi najpovoljniji način ugradnje materijala i optimalna debljina slojeva (Slika 4.10).

Učestalost terenskih merenja zavisi od složenosti i veličine projekta, kao i ugovorenih obaveza u pogledu kontrole kvaliteta, ali i od *neočekivanih okolnosti* – velikih varijacija u svojstvima tla, ili nepovoljnih rezultata merenja. Prema američkim standardima [33], gustina sa sadržajem vlage meri se in situ bar 2 puta u svakom sloju od 1600 m² koji se ugradi u telo nasipa u jednoj 8-časovnoj smeni, a bar 2

¹Koriste se metode kupe, utiskivanja cilindra, zagrejane ploče, kalibrisani nuklearni uređaji; ovi poslednji se sastoje od izvora koji emituje oblak ozračenih čestica i senzora koji detektuje broj čestica koje su prošle kroz tlo (zavisno od njegove gustine).

²Prevelik sadržaj krečnjaka CaCO₃ nepovoljno deluje na čestice gline i izaziva preterano sleganje, koje se mora nadomestiti nadvišenjem nasipa.



Slika 4.10: Izgradnja nasipa; sleva na desno: razastiranje i planiranje materijala iz pozajmišta; nabijanje tla u slojevima pomoću jež-valjka; kontrola zbijenosti sloja pomoću nuklearnog mernog uređaja [33].

puta u svakom sloju od 800 m^2 koji se nabija u podlozi nasipa. Zbijenost tla se određuje jednom na svakih 5 testova gustine, a ispuna drenažnih rovova ispituje sa na svakih 150 m dužine.

Sama izgradnja nasipa može se obaviti na tri načina:

1. nasipanjem i nabijanjem optimalno vlažnog tla po slojevima;
2. nasipanjem i nabijanjem prirodno vlažnog tla;
3. nasipanjem peska iz reke pomoću bagera refulera.

Pre formiranja tela nasipa neophodna je priprema temeljne podloge. Prvi korak je čišćenje vegetacije, uklanjanje panjeva i površinskog sloja tla zbog organskog sadržaja. Podloga se nivelise u blagom nagibu da padavine oteknu van pojasa nasipanja. U slučaju da gravitacioni odvod nije moguć, preduzima se crpljenje vode i njeno odvođenje van zone nasipanja.

Ako je temeljna podloga od *slabo nosivog tla*, postoji više načina izgradnje nasipa:

1. nasipanje se sprovodi postepeno, dozvoljavajući nesmetano odvijanje konsolidacije tla u podlozi;
2. nasipanje se sprovodi relativno brzo, uz kontinualno praćenje sleganja podloge, koje se kompenzuje ugradnjom dodatne količine materijala, do projektovane visine nasipa;
3. nasipanje se sprovodi nakon što je uklonjeno slabo noseće tlo iz podloge;
4. nasipanju prethodi ojačanje podloge slojevima peska, postavljanjem tepiha od geotekstila ili kakvog drenažnog sistema, u cilju disipacije pornih pritiska u temeljnoj podlozi.

Ako se u telo nasipa ugrađuje koherentni materijal (glina, humus), vrlo je važna kontrola njegove vlažnosti, a pri ugradnji nekoherentnog materijala (peska, šljunka), najvažnija je kontrola granulometrijskog sastava.

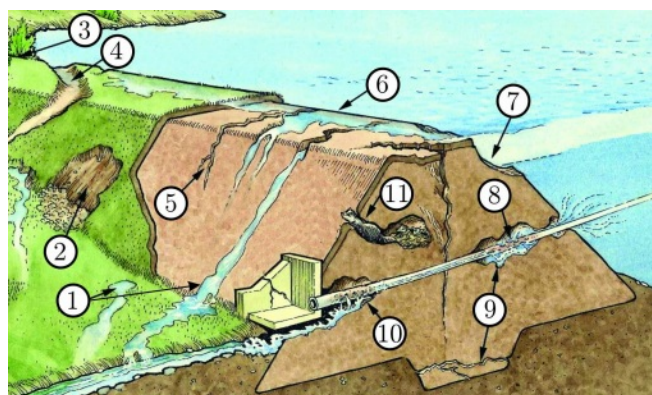
Kod nasipa od homogenog materijala, sitnije frakcije se ugrađuju u centru, a krupnije, ka kosinama trupa nasipa. Kod zoniranih nasipa (od više materijala), nasipanje za nepropusno jezgro i filtarske slojeve napreduje *ispred* nasipanja osnovne

ispune, da bi se obezbedila geometrija zaptivnog elementa i sprečilo mešanje različitih materijala. Debljina nasutih slojeva zavisi od vrste tla i mehanizacije koja se koristi za razastiranje i nabijanje tla. Pre početka nasipanja instalira se oprema za merenje sleganja i praćenje pijezometarskih nivoa.

Pri izgradnji nasipa treba imati u vidu i niz drugih preporuka. Tako na primer, ako se nasipi grade duž rečnog korita, radove treba obavljati *istovremeno* na obe obale. Pozajmište mora biti blagovremeno pripremljeno: očišćeno od vegetacije i kamenja, a kvalitet materijala iz pozajmišta proveren na licu mesta. Mora biti određen optimalni sadržaj vlage. Pri dopremanju materijala iz pozajmišta, putanje kamiona treba stalno menjati da bi se izbeglo brazdanje i prekomerno nabijanje tla u podlozi nasipa.

Posebnu pažnju iziskuje izvođenje branjene kosine nasipa kako bi se izbegli problemi sa procurivanjem i internom erozijom. Već je rečno da sleganje nasipa u toku izgradnje nastaje usled popuštanja temeljne podloge, ali sleganje može nastati i usled sušenja tla, kao i vibracija tokom pobijanja talpi za ojačanje nasipa.

Održavanje. Oštećenja nasipa (Slika 4.11) rastu progresivno ukoliko ne postoji sistematsko održavanje nasipa. Ključne su *redovna inspekcija* i *blagovremene* popravke, što zahteva planiranje budžetskih sredstava na godišnjem nivou.



Slika 4.11: Uzroci oštećenja nasipa [298]: 1 – procurivanje; 2 – odronjavanje; 3 – korenje zapuštenog rastinja; 4 – „divlje“ staze; 5 – pukotine usled opterećenja; 6 – sleganje krune usled prokomernog saobraćaja; 7 – talasi; 8 – erozija tla oko cevi; 9 – nekontrolisana filtracija; 10 – ispiranje tla oko oštećenih cevi; 11 – krtičnjaci.

Sanacija. Najčešće aktivnosti su: (1) popravka kosina; (2) popuna erozijom oštećenih delova nasipa; (3) uklanjanje krtičnjaka; (4) seča viška vegetacije. Za sanaciju oštećenja potrebno je proceniti potrebnu zapreminu materijala, naći adekvatno pozajmište i osigurati finansijska sredstva. Sanacija nasipa u cilju smanjenja procurivanja podrazumeva veće i skuplje zahvate na ugradnji bunara i/ili drenažnih odvoda.

Rekonstrukcija. Kod svih regulacionih građevina postavlja se pitanje funkcionalne održivosti u toku životnog veka. Rekonstrukcija nasipa podrazumeva njihovo konstruktivno prilagođavanje novonastalim okolnostima kao što su: (i) povećanje nivoa u reci usled klimatskih promena, ili izmena vodnog režima u slivu; (ii) nepredviđeno sleganje usled crpljenja podzemne vode; (iii) pukotine izazvane sušom; (iv) izdizanje/spuštanje rečnog korita; (v) potrebe saobraćaja, rekreacije.

Jedna od najčešćih mera rekonstrukcije je nadvišenje nasipa. Može se izvesti nasipanjem lakog, recikliranog materijala, ili postavljanjem po kruni nasipa mobilnih barijera. Druga mera je ojačanje radi smanjenja procurivanja dodavanjem balasta od refulisanog peska (Slike 4.12–4.14), ili ugradnjom ekrana od prefabrikovanih betonskih elemenata, čeličnih talpi i dijafragmi sa cementnom ispunom.

Deaktiviranje nasipa. Radi se o uklanjanju ili napuštanju postojećeg nasipa, usled pomeranja odbrambene linije dublje u branjeno područje u cilju povećanja propusne moći za velike vode. Tehničke mere se sastoje od: postavljanja ispusnih cevi u telu nasipa ili preliva po kruni nasipa radi propuštanja vode i uklanjanja mašinske i elektro opreme iz crpnih stanica.

4.3 Biotehnički radovi

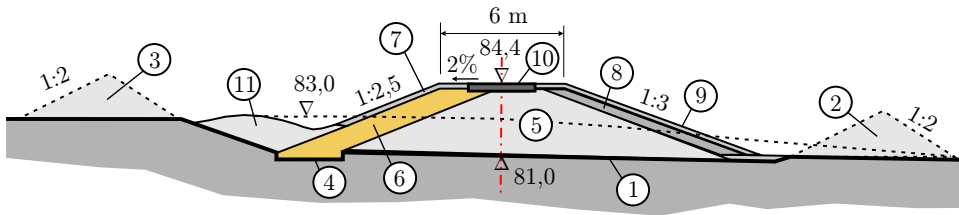
Uporedo sa regulacionim građevinskim objektima i u kombinaciji sa njima, primenjuju se inženjersko-biološki, ili „biotehnički” radovi. Sastoje se u primeni raznih vrsta vegetacije u cilju postizanja određenih efekata. Međutim, korišćenje vegetacije u regulaciji reka zahteva mnoštvo informacija iz botanike koje se odnose na građu biljaka, njihovu otpornost na dejstvo vodnog toka, vegetativni period, brzinu rasta itd. To znači da je već pri izboru vegetacije nužna saradnja sa biologima (ali i kasnije, po završetku radova).

Pozitivni efekti vegetacije su brojni. Dragocena osobina biljaka je sposobnost samoobnavljanja, prilagođavanja okolini i podizanja ambijentalnog kvaliteta. Važna prednost su i niži troškovi u odnosu na konvencionalne rečne konstrukcije. Biotehničkim radovima se doprinosi unapređenju biološke raznovrsnosti u priobalju i stvaraju uslovi za razvoj rekreacije i turizma.

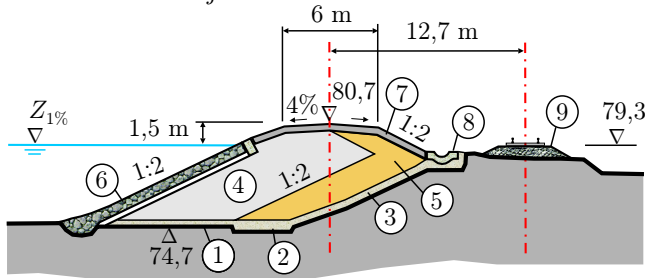
Nepovoljne strane korišćenja biološkog materijala su: zavisnost od klimatskih uslova i vegetativnog perioda, mala efikasnost u početnoj fazi razvoja i potreba neprekidnog održavanja, naročito kada je u pitanju čišćenje korita da bi se očuvala njegova propusna moć za evakuaciju velikih voda.

Pri projektovanju biotehničkih radova, treba odgovoriti na tri osnovna pitanja:

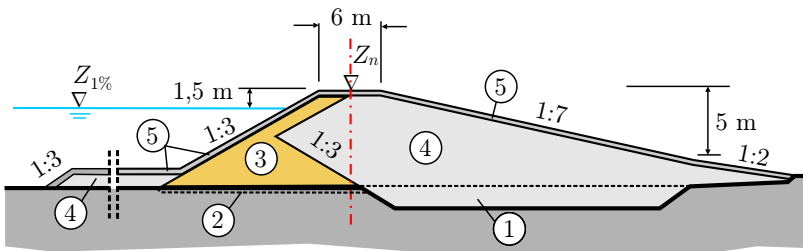
1. Da li se izborom neke vegetacije mogu postići željeni efekti, ili je to moguće samo kombinacijom vegetacije i konvencionalnih građevina?
2. Koliko je koštanje inicijalnih radova i radova na održavanju?
3. U kojoj meri se određena vrsta vegetacije uklapa u postojeći ekološki okvir?



Slika 4.12: Jedna varijanta rekonstrukcije nasipa na Tisi kod Novog Kneževca, prema [170]; 1 – iskop podloge sa humusnim slojem; 2 – deponija humusnog iskopa; 3 – deponija iskopanog lokalnog materijala; 4 – preoran i nabijen koren zaštitnog ekrana; 5 – trup nasipa od refulisanog peščanog materijala; 6 – ekran od koherentnog materijala; 7 – humuzirani sloj debljine 20 cm; 8 – nabijeni sloj po kosini debljine 30 cm; 9 – humuzirani sloj debljine 20 cm; 10 – put po kruni nasipa; 11 – popuna iskopa lokalnim materijalom.



Slika 4.13: Nasip na Dunavu kod Sremskih Karlovaca – varijanta vezivanja za željezničku prugu, prema [131]; 1 – iskop podloge; 2 – brazdanje posteljice za vodonepropusni ekran; 3 – podloga od lokalnog materijala; 4 – refulisani pesak; 5 – ekran od dopremljenog koherentnog tla; 6 – obloga od rolovanog kamena krupnoće 30 cm na podlozi od šljunka i geotekstila; 7 – humusni sloj debljine 30 cm; 8 – betonska rigola za odvodnjavanje; 9 – trup željezničke pruge.



Slika 4.14: Nasip na Dunavu kod Sremskih Karlovaca – varijanta uz korito reke, prema [131]; 1 – skidanje humusa i iskop posteljice; 2 – brazdanje posteljice za vodonepropusni ekran; 3 – ekran od dopremljenog koherentnog tla; 4 – refulisani pesak; 5 – humusni sloj debljine 30 cm.

Da bi se dao odgovor na postavljena pitanja, neophodno je razmatranjem postojeće dokumentacije i obilaskom terena prikupiti značajan fond informacija. Ulazni podaci s kojima treba raspolagati pre preduzimanja biotehničkih radova obuhvataju:

- geomorfologiju korita (uzdužni nagib, zakrivljenost, stabilnost obala);
- hidrološko-hidraulički režim (kote nivoa, trajanje, brzine toka);
- stepen ugroženosti obala erozijom (sastav tla, kritična mesta);
- postojeću vegetaciju (vrsta, gustina, korišćenje);
- projektovanu vegetaciju za učvršćenje obala (vrsta, količin, održivost).

4.3.1 Uticaj biotehničkih radova

Pri razmatranju korišćenja vegetacije u regulaciji reka, treba imati u vidu biološke, hidrauličke i geotehničke aspekte ovog pristupa.

Hidraulički uticaj vegetacije. Biljke štite tlo od fluvijalne erozije smanjujući brzinu toka i učvršćujući podlogu svojim korenim sistemom. U ovome naročitu ulogu imaju razne vrste trava. Izbor se zasniva na empirijskim podacima i iskustvu. Dozvoljene brzine toka za opstanak trave date su u prvoj knjizi (KI-3.3-Tab:3.5), a ovde se ti podaci dopunjuju odgovarajućim trajanjem (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: *Kriterijum za opstanak trave pod vodom* prema [199].

Dozvoljena brzina toka [m/s]	1	2	3 ÷ 4	5
Trajanje [sati]	neograničeno	10	1÷10	< 1

Za ocenu opstanka trave mogu se koristiti i podaci o otpornosti podloge na dejstvo rečnog toka. Podaci o dozvoljenoj brzini toka za razne vrste tla dati su u prvoj knjizi (KI-9.2.1-Tab:9.1).

Alternativno se mogu koristiti i eksperimentalno utvrđeni kriterijumi u pogledu dozvoljenog tangencijalnog napona [Pa] pri kome *neće* doći do razaranja podloge na kojoj raste trava [226]:

$$\tau_{o, doz} = \begin{cases} 0,75 d_{75} & \text{za } d_{75} \geq 1,3 \text{ mm} \\ 0,96 & \text{za } d_{75} < 1,3 \text{ mm.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Za procenu smičuće nosivosti tla mogu se koristiti i podaci iz Tebele 4.2.

Tabela 4.2: *Smičuća nosivost tla* [227].

Vrsta tla:	peskovita glina	muljevita glina	aluvijalni mulj	čvrsta glina
$\tau_{o, doz}$ [Pa]:	0,79	1,04	1,04	1,63

Poznato je da vegetacija značajno utiče na hidrauličku rapavost. Jedan od načina proračuna linijskih otpora u zatavljenom koritu prikazan je u prvoj knjizi (KI-3.3), gde su date vrednosti koeficijenata otpora (KI-3.5-Tab:3.9). U nastavku se navode vrednosti Maningovog koeficijenta, svrstane u četiri kategorije prema stepenu obraslosti korita (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Vrednosti Maningovog koeficijenta za korita obrasla vegetacijom [31].

Stepen obraslosti:	srednji	visok	veoma visok
$n \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$:	0,010÷0,025	0,025÷0,050	0,050÷0,100

U proračunima poplavnih talasa od interesa su i otpori u inundacijama. Vrednosti Maningovog koeficijenta za inundacije date su u (KI-3.5-Tab:3.9) i u Dodatku D5. Za inundacione površine pod šumom (plantažama topole), vrednost Maningovog koeficijenta se može proceniti pomoću izraza [5, 199]:

$$n = n_o \sqrt{1 + \frac{C_d \sum A_{s,i}}{2gLA} \left(\frac{1}{n_o}\right)^2 R^{4/3}}, \quad (4.2)$$

gde je: n_o – Maningov koeficijent u inundaciji bez stabala, L – dužina deonice, A – površina proticajnog preska (ne oduzimajući stabla), R – hidraulički radijus (približno jednak dubini toka).

Prema podacima iz literature [5], vrednost efektivnog koeficijenta lokalnog otpora stabla može se računati pomoću regresionog izraza: $C_d = -10,5R + 20,4$.

Površina obstrukcije toka je: $A_s = D_s h m_s$, gde je D_s – srednji prečnik stabla, h – dubina toka u inundaciji, a $m_s = (BL)/(a_x a_y)$ – broj stabala po širini inundacije B (i dužini L), sa uniformnim razmakom stabala u pravcu toka a_x i upravno na tok a_y ; indeks „i” u (4.2) ukazuje na mogućnost obuhvatanja raznih prečnika stabala i dubina toka duž razmatrane deonice.

■ **Primer 4.1.** Proceniti vrednosti Maningovog koeficijenta za inundaciju dužine $L = 1000$ m, širine $B = 250$ m, pod stablima srednjeg prečnika $D_s = 0,3$ m, na uniformnom razmaku $a_x = a_y = 10$ m. Vrednost Maningovog koeficijenta za inundaciju bez stabala iznosi: $n_o = 0,028 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Proračun obaviti za dubine toka u inundaciji $h = 0,5, 0,8$ i $1,2$ m.

Rešenje. Broj stabala na datom potezu iznosi: $m_s = 2500$. Ostale računске vrednosti date su u Tabeli 4.4.

Tabela 4.4: Rezultati proračuna u primeru 4.1.

$R \approx h \text{ (m)}$	0,5	0,8	1,2
$A_s \text{ (m}^2\text{)}$	375	600	900
$A \text{ (m}^2\text{)}$	125	200	300
$C_d \text{ (-)}$	15,15	12,0	7,8
$n \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$	0,041	0,046	0,048

Geotehnički uticaj vegetacije. Kosine pod vegetacijom su stabilnije od onih bez vegetacije zbog: (i) smanjenja erozionog uticaja toka usled vezivanja tla korijenim sistemom i (ii) smanjenja sadržaja vlage i pornih pritisaka u tlu usled biljne evapotranspiracije.

Korene sisteme čine organska vlakna sa velikom čvrstoćom na istezanje i izraženim kapacitetom prijanjanja za tlo, tako da biljni pokrivač vezuje i „armira” tlo. Trava ima plitak koreni sistem (najviše $0,5 \div 0,8$ m), koji je manje-više uniformno raspoređen po kosini, štiteći površinski sloj obale. Kod nekih trava u ovome ključnu ulogu imaju dugačka podzemna stabla – „rizomi” (Slika 4.15).



Slika 4.15: Trava kao vezivni agens; sleva na desno: obična zubača (*Cynodon dactylon*) sa rizomima, trava livadarka (*Poa pratensis*).

Drveće ima korene sisteme koji duboko prodiru u tlo i deluju kao svojevrсни „potporni zid” na obali; čak i kada dođe do erozije donjih delova obalne kosine, ogoljeni koreni sistem drveća i dalje „drži” nagib kosine od oko 1:1.

Geotehnički uticaji vegetacije procenjuju se, kao i oni hidraulički, empirijski i iskustveno. Razlog je što se analitičkim modelima teško može obuhvatiti mnoštvo uticajnih faktora, kao što su: dužina i gustina vegetacije, pravci pružanja i čvrstoća korenog sistema itd. Postoje indicije da se otpornost tla na smicanje povećava pod uticajem vegetacije za $1,15 \bar{\tau}_{o,k}$, gde se prosečna čvrstoća korenog sistema na istezanje računa pomoću obrasca [199]:

$$\bar{\tau}_{o,k} = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_{o,ki} M_i A_i}{A} \quad (4.3)$$

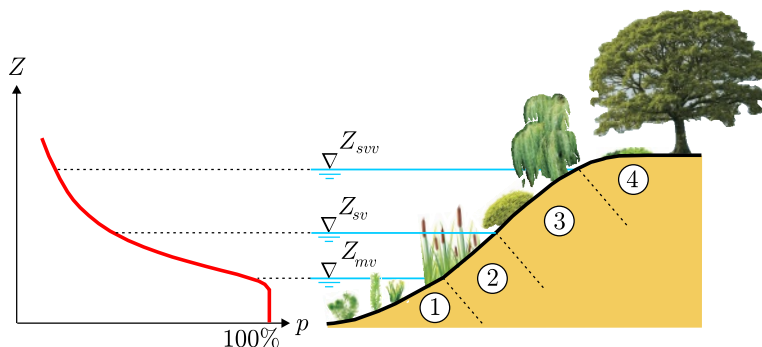
U ovom izrazu su: $\tau_{o,ki}$ i M_i – čvrstoća na istezanje i broj korenih vlakana i -te vrste biljaka, A_i – površina poprečnog preseka koju zauzima koreni sistem i A – ukupna površina poprečnog preseka. Čvrstoća $\tau_{o,k}$ je fiziološko svojstvo konkretne biljke; na primer, kod drveta jove iznosi $4 \div 74$ MN/m².

Pri planiranju biotehničkih radova, treba imati u vidu da puni efekat vegetacije na učvršćenje tla zahteva određeno vreme biljnog razvoja (tipično $4 \div 7$ godina).

4.3.2 Zaštita obala

Postoje četiri karakteristične zone na rečnoj obali (Slika 4.16), u zavisnosti od vrste vegetacije (i podloge na kojoj raste) i hidroloških uslova (visine i trajanja nivoa vode).

U zoni (1) vodene biljke spontano rastu, bez uticaja ljudi. U izvesnoj meri te biljke štite obalu od erozije, što se može poboljšati postavljanjem dodatne zaštite (kamen, fašine, drveno kolje). Ukoliko prekomerno bujanje vodene vegetacije smanji propusnu moć korita, preduzima se selektivno čišćenje korita.



Slika 4.16: Zoniranje vegetacije: 1- zona vodenih biljaka; 2- zona trske; 3- vlažna, sezonski plavna zona; 4- suva, povremeno plavna zona [147].

Između nivoa male i srednje vode, u zoni (2), dobru zaštitu obale od erozije mogu da obezbede razne vrste trske, npr. rogoz (*Scirpus lacustris*). Trska učvršćuje podlogu smanjenjem brzine toka pri obali. Lako podnosi brzinu toka do 1 m/s, a može se kombinovati sa ojačanjem od inertnih materijala (kamen, fašine). Posebno je od koristi na plovnim rekama; ustanovljeno je da pojas trske širine 2 m amortizuje oko 2/3 energije talasa koje stvara ju motorna plovila [199].

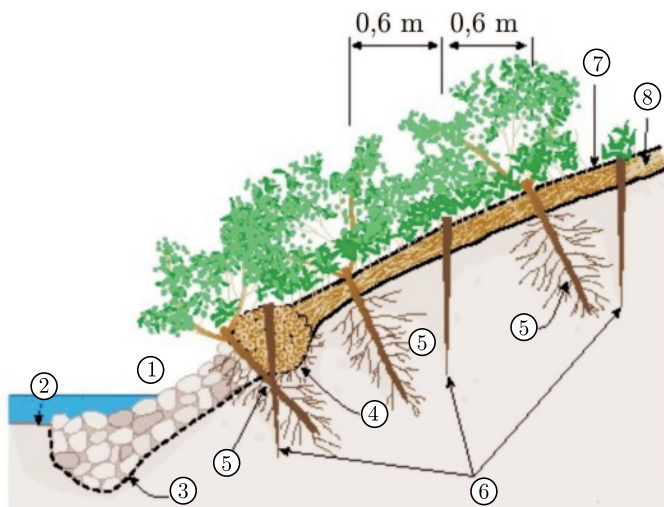
Zonu (3), između nivoa srednje i srednje velike vode, treba da štiti raznovrsna vegetacija koju čini kombinacija trave, žbunja i drveća. Dobra svojstva trave su već opisana. Drveće se sadi po grupama; najčešće su to vrba (*Salix alba*), iva (*Salix viminalis*) i jova (*Alnus incana*). Sadnice vrbe se polažu u prethodno pripremljene rupe u tlu do 1/4 visine, 3÷4 sadnice/m². Ukorenjenje sadnica treba da bude uniformno, a svake dve godine, produkcija vrbe obezbeđuje novi materijal za zaštitu obala.

Povremeno plavna zona (4) je manje ugrožena erozijom. U ovoj zoni treba saditi travu i drveće, koje kod malih vodotoka obezbeđuje zasenčenje obale. Preporuka je da se zadrži što više endemskog drveća. Najčešće zastupljene vrste su hrast, jasen i brest. Imati u vidu da i opalo lišće ima svoju funkciju u okviru ekosistema.

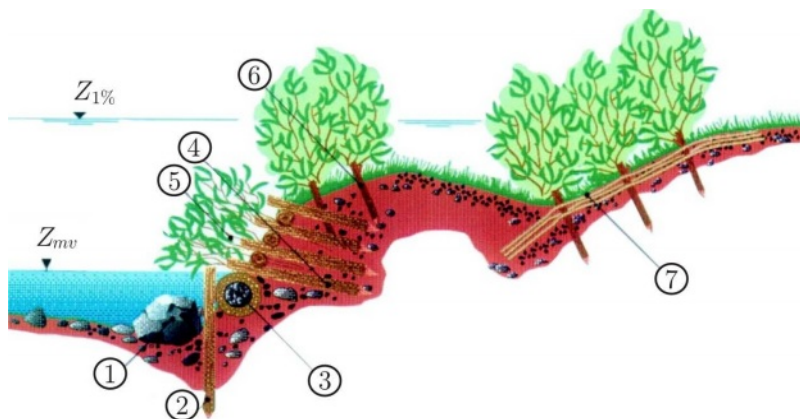
Utvrdjivanje obala vegetacijom ima nesporno ekonomske i estetske prednosti, ali izbor vegetacije nije proizvoljan, već mora biti zasnovan na poznavanju bioloških svojstava zasada i hidrauličko-geotehničkih uslova na konkretnoj lokaciji. Već je rečeno da se za zaštitu obala od fluvijalne erozije najčešće koriste razne vrste trava: pirevina (*Triticum Tepens*), medunika (*Holcus Lanatus*) i troskot (*Polygonum Ari-culare*). Buseni trave se sade prema određenom rasporedu, u kombinaciji sa sadnicama vrbe (*Salix*). Obaloutvrde od biološkog materijala primenjuju se najviše na malim vodotocima. Neki primeri su prikazani na Slikama 4.17 i 4.18.

4.3.3 Zaštita inundacija i nasipa

U inundaciji se sade razne vrste topole (bela, siva, crna, kanadska, sve iz familije *Populus*), koja se sadi u pravilnom rasporedu, na razmaku od oko 5 m (Slika 4.19).



Slika 4.17: PrIMER biološke zaštite obale; 1 - kamena nožica; 2 - dno i nivo male vode; 3 - geotekstil; 4 - fašine; 5 - izdanci; 6 - drveno kolje dužine $0,8 \div 1,0$ m; 7 - žičani povez; 8 - obloga od vrbovog pruća [221].



Slika 4.18: PrIMER biološke zaštite obale; 1 - kamen; 2 - drveno kolje; 3 - punjena fašinska rolna; 4 - noseći „roštilj“ od drvenih grana i trupaca; 5 - biljni izdanci; 6 - biljne reznice; 7 - madrac od vrbovog pruća [286]. Vrbovo pruće odoleva smičućim naponima od 50 N/m^2 (po sađenju) do 150 N/m^2 (posle dve sezone rasta). Pruće se postavlja između kolja, pobijenog po prethodno očišćenju na razmaku od oko $1,2$ m. Povezivanje kolja se obavlja žicom $\varnothing 2$ mm. Pruće staro 2 godine, dužine $1,5 \div 3$ m, polaže se niz kosinu, upravno na tok, i ukopava najmanje 10 cm. Pritezanjem žice, ostvaruje se tesna veza pruća sa tlom. Fašinske rolne se koriste za popunjavanje odnetih delova obale i ukrućenje zaštitne konstrukcije.

Plantaže topole smanjuju brzinu poplavnih talasa i služe kao drvena sirovinska baza. U novije vreme sve je popularnija, topoli slična, paulovnja (familija *Scrophulariaceae*). Ova biljka, poreklom iz Kine, ima brži rast, pruža mogućnost šire primene u industriji i ima dobre ekološke efekte.



Slika 4.19: *Plantaže u inundacijama; levo: sadnice topole visine 20÷35 m, prečnika 30÷40 cm; topola voli vlažno tlo, a koristi se u industriji papira i nameštaja [287]; u sredini: drvo paulovnije ima veoma brz rast, otporno je na sušu, velike je (vodo)otpornosti i čvrstine; široko se koristi u industriji nameštaja, građevinarstvu, brodogradnji, avio-industriji itd. [288]; desno: plantaže paulovnije doprinose ublažavanju klimatskih promena – samo u inundacijama donje Volge planira se sadnja 33 miliona stabala koja treba da spreče emisiju od oko milion tona CO₂ u atmosferu [289].*

Na inundacionim površinama se samo izuzetno sadi trava, već isključivo drveće i žbunje. Obogaćenje inundacija vegetacijom primenjuje se i sa ciljem obnove rečnih dolina devastiranih ljudskom aktivnošću i vraćanje tih prostora u prvobitno „prirodno stanje” (proces „renaturalizacije” vodotoka).

Oblaganje nasipa travnatim pokrivačem ima veliki značaj za stabilnost nasipa. Postavljaju se sledeći zahtevi:

- moraju se koristiti višegodišnje, obnovljive vrste trave, sa dužim korenjem od jednogodišnjih i dvogodišnjih vrsta;
- po mogućstvu koristiti više vrsta trave;
- za opstanak trave veoma je bitna podloga; na kosinama okrenutim vetru, sastav površinskog sloja tla treba da bude mešavina glinovitog i muljevitog materijala (da vetar ne bi preterano isušivao tlo); na kosinama okrenutim niz vetar, može se koristiti manje plodan, peskoviti materijal;
- u slučaju nadvišenja nasipa, treba zadržati prvobitnu slojevitost tla.

4.4 Prosecanje krivina

Uzroci nastanka meandrirajuće trase aluvijalnih vodotoka nisu u celosti razjašnjeni (KI-1.4), a procena dinamike morfološkog razvoja aluvijalnog korita je veoma nesigurna. U određenoj fazi razvoja, krivine postaju uska grla za evakuaciju velikih voda i transport nanosa i leda (Slika 4.20-a). U takvim uslovima, utrošak energije na savlađivanju otpora u koritu postaje previsok, pa reka u krivini sama preseca novo, kraće korito (KI-1.4.3-Sl:1.15,1.16).



(a)

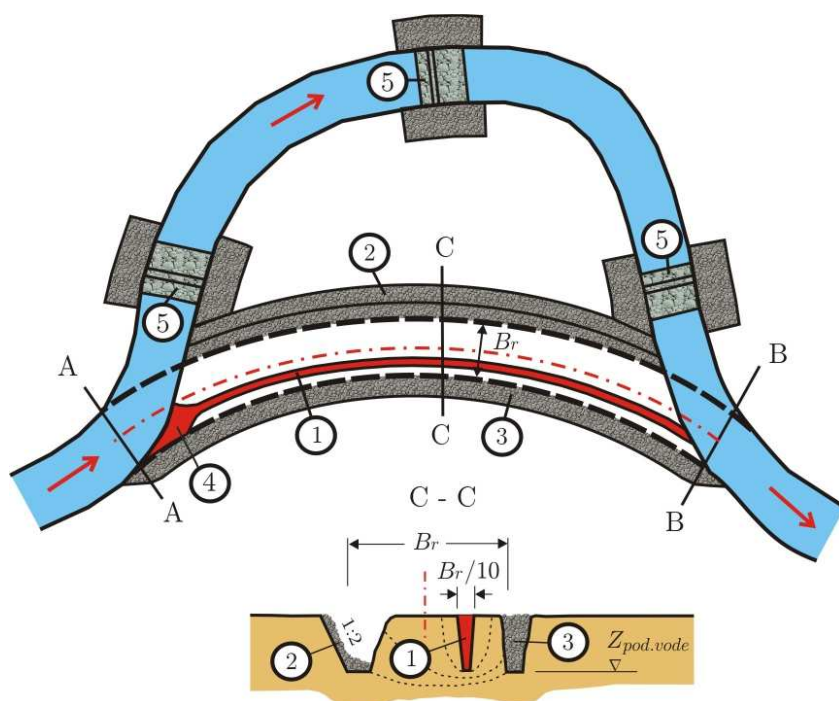
(b)

Slika 4.20: Meandri na Velikoj Moravi uzvodno od Požarevca; a - prirodne promene rečne trase, sa napuštenim delovima korita – „staračama” (C) i deponijama nanosa – sprudovima H (Google Earth®); b - aerofotogrametrijski snimak Velike Morave sa prosecima krivina izvedenim u prvoj plovini XX. veka.

Veštačko prosecanje rečnih krivina je radikalna regulaciona mera koja ima za cilj povećanje propusne moći korta za vodu, nanos i led. Na plovnim rekama, ovoj meri se često pribegava da bi se „ispravile” oštre krivine, poboljšali plovidbeni uslovi i omogućio saobraćaj većih plovila.

Proseci, kao veštački delovi rečnog korita, treba da imaju zakrivljenu trasu. Ona je najčešće definisana u obliku kružnih lukova, sa poluprečnicima i centrima tako odabranim da se novo korito „glatko” poveže sa postojećim koritom. Po pravilu se na reci projektuje i gradi više preseka, da bi nakon regulacije broj *hodova* (KI-1.4.3-SI:1.12) ostao isti. Širina preseka treba da odgovara širini regulisanog korita (B_r), kako bi hidraulički poremećaji na spoju novog i postojećeg korita bili što manji.

Samorazrada preseka. Ukoliko je stepen skraćanja trase u krivini veći od 1:3 i ako se prosek kopa u nevezanom ili slabo vezanom materijalu, umesto iskopa u punom projektovanom profilu, može se iskopati samo deo profila – „*pilot-kanal*” ili „*kineta*”, sa idejom da reka sama iskopa ostatak preseka i da se tako smanje troškovi. Po završetku prokopavanja kinete, voda iz reke se (pri povoljnim hidrološkim uslovima) upušta u kinetu, čime započinje proces njene dubinske i bočne erozije. Vremenom se kineta ograničeno širi i produbljuje sve do projektovane veličine novog korita (Slika 4.21). Ovaj proces se zove „samorazrada preseka”.



Slika 4.21: Prosecanje krivine; 1 – kineta; 2 – rov sa obaloutvrdom; 3 – ukopana kamena deponija; 4 – neprokopani deo kinete na uzvodnom kraju („čep”); 5 – pregrade sa obaloutvrdama.



Slika 4.22: Prosek na Velikoj Moravi kod Bagrdana (km 118): iskop sa obaloutvrdom unapred izrađenom u suvom (levo) i kineta pre otvaranja preseka, ispunjena podzemnom vodom (desno).

Dimenzije kinete su predmet izbora i zavise od sastava tla, načina iskopa i hidrauličkih parametara toka u kineti. Orijentaciono, početna širina kinete u kruni treba da iznosi $B_r/10 \div B_r/3$, a kota dna, nešto ispod nivoa podzemne vode (Slika 4.21). Nagib bokova kinete zavisi od projektovane dubine, sastava tla i načina iskopa; kod mašinskog iskopa i koherentnog tla, može biti čak 5:1 ÷ 10:1, a kod ručnog iskopa i peskovitog tla, nagib bokova je znatno blaži. Iskopano tlo se deponuje duž kinete i ostavlja da ga voda odnese tokom samorazrade preseka.

Da bi se bočna erozija zaustavila na granicama projektovanog novog korita (preseka), neophodno je osiguranje od kamena. Duž regulacione linije konkavne obale novog korita gradi se u suvom obaloutvrda od kamenog nabačaja, u posebno iskopanom rovu. Duž regulacione linije suprotne – konveksne obale, gradi se ukopana kamena deponija (Slike 4.21 i 4.22).

Kopanje kinete (čija je osovinu projektovana između konveksne obale i osovine budućeg korita), započinje sa nizvodnog kraja i napreduje *uzvodno*. Na uzvodnom kraju kinete ostavlja se neprokopan deo – „čep”, koji omogućava da se iskop ne obavlja u tekućoj vodi i da se puštanje kinete u pogon odloži do pojave željenog protoka u reci.

Na početku, u sredini i na kraju „starače” (starog korita koje se napušta), mogu se postaviti pregrade sa krunom na nivou srednje vode, da bi se pospešilo zasipanje starog korita (Slika 4.21). Pregrade ne treba odmah graditi, niti sve odjednom, jer se može ispostaviti da do zasipanja starog korita dođe spontano i bez pregrada.

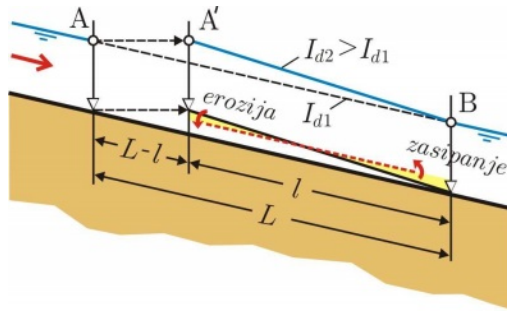
Ukoliko se preseca više krivina, radovi se obavljaju u *uzvodnom* smeru, počev od preseka na nizvodnom kraju deonice koja se reguliše. Svaki uzvodni presek se otvara tek posle razrade nizvodnog preseka. Na taj način se višak energije toka u nizvodnom preseku koristi za razradu uzvodnog, a materijal lakše odnosi nizvodno, gde brže popunjava starače.

Dinamiku samorazrade preseka je veoma teško prognozirati, čak i uz primenu numeričkih i fizičkih modela. Usled brojnih uticajnih faktora koji se teško modeliraju (npr. kohezija tla), rezultati proračuna i/ili laboratorijskih ispitivanja služe isključivo za kvalitativne prognoze. Na primer, polazeći od usvojenih dimenzija kinete i jednačine kontinuiteta: $Q = Q_k + Q_{st}$, (gde su, redom: Q , Q_k , Q_{st} protoci u reci, kineti i starači), može se utvrditi podela protoka na kinetu i staro korito (Q_k , Q_{st}) pomoću računskog modela HEC-RAS [250] (uz odgovarajuće granične uslove i vrednosti Manningovog koeficijenta). Kao rezultat proračuna, dobijaju se linije nivoa u kineti i u starom koritu, sa prostornim rasporedom hidrauličkih parametara od kojih zavisi pronos nanosa (pre svega τ_o). Hidraulički proračun se obavlja za više ulaznih protoka Q .

Za dalju analizu neophodno je poznavanje granulometrijskog sastava nanosa iz rečnog korita i aluvijuma u kome je formirana kineta. Elementarni pristup je da se usvoje srednji prečnici zrna d_r i d_k (gde indeksi r i k označavaju reku

Ako je hidrološki režim voda takav da nije moguće istovremeno obezbediti plovidbu u starom koritu i razradu proseka, ovaj se mora iskopati u punom profilu, pa se tek po završetku radova može pristupiti premeštanju plovnog puta u novo korito.

Efekte prosecanja krivina. Posledica prosecanja krivina je pojava *regresivne erozije* rečnog korita uzvodno od proseka. U težnji da „poništi” lokalni poremećaj izazvan skraćanjem trase, reka teži da postepeno uspostavi pređašnji ravnotežni uzdužni nagib dna kroz mehanizam regresivne erozije korita (Slika 4.24). Ovaj proces, koji seže daleko uzvodno od proseka, može imati niz nepovoljnih posledica, kao što su: obrušavanje obala, sniženje nivoa podzemnih voda, sušenje vegetacije u priobalju, prekid rada vodozahvata, oštećenje regulacionih objekata i dr.



Slika 4.24: Efekte prosecanja krivine; skraćenje trase sa prvobitne dužine krivine L na dužinu proseka l , povećava uzdužni nagib dna, tangencijalni napon i pronos vučenog nanosa; odgovor reke u pravcu uspostavljanja prvobitnog nagiba dna i ravnotežnog hidrauličko-psamološkog režima je erozija rečnog korita uzvodno i zasipanje korita nizvodno od proseka.

Kontrola erozije se može postići postavljanjem pragova u proseku (Slika 4.25-a). Zadatak je projektanta da odredi broj, visinu i razmak takvih pragova. To nije jednostavno, ali se neki rezultati mogu dobiti pomoću uprošćene analize, zasnovane na sledećim pretpostavkama: (i) tečenje je ustaljeno i jednoliko (osim na prelaznim deonicama M_1 i M_2 , Slika 4.25-b), u mirnom režimu; (ii) pragovi su niski i potopljeni, a lokalni energetske gubici su zanemarljivi u odnosu na gubitak usled trenja; (iii) korito je široko pravougaono (hidraulički radijus jednak dubini).

Zbog skraćanja trase, duž proseka se uspostavlja povećani nagib dna: $I_{d2} = k I_{d1}$, gde je: I_{d1} – ravnotežni nagib dna pre prosecanja, a $k > 1$ – faktor povećanja.

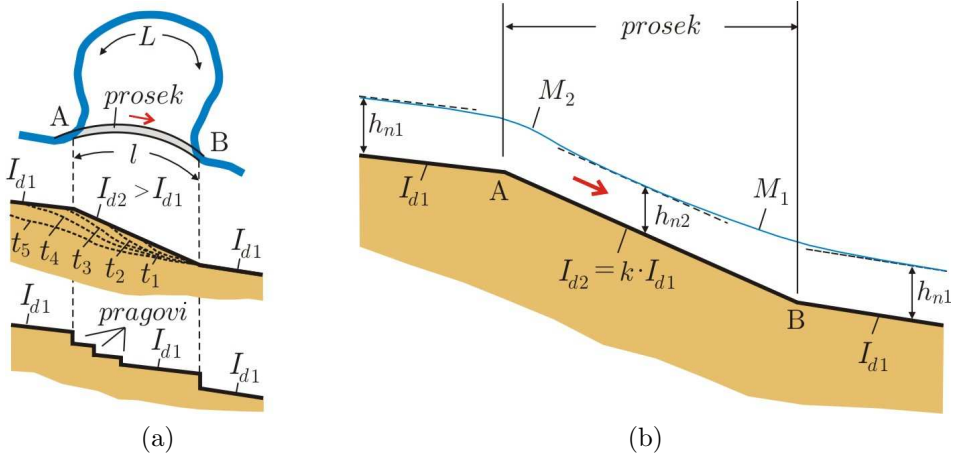
Prema Šezi-Maningovoj jednačini (KI-3.1-(3.1)), normalne dubine su:

$$h_{n1}^3 = q^2 / (C^2 I_{d1}); \quad h_{n2}^3 = q^2 / (C^2 I_{d2}),$$

gde je: C – Šezijev koeficijent trenja, a q – projektni jedinični protok.

Lako se izvodi veza između normalnih dubina pre i posle prosecanja:

$$h_{n2}^3 = \frac{1}{k} h_{n1}^3. \quad (4.4)$$



Slika 4.25: Kontrola regresivne erozije; (a) sistem pragova; (b) u dovoljno dugačkom preseku se uspostavlja normalna dubina; kratke linije nivoa u obliku uspora (M_1) i depresije (M_2) se zanemaruju.

Imajući u vidu da tangencijalni napon na dnu linearno zavisi od dubine i nagiba dna ($KI=2.3 \cdot (2.11)$), najveća vrednost ovog napona može se očekivati na uzvodnom kraju preseka (zona tačke A, Slika 4.25-b):

$$\tau_{o,max} = \rho g h_{n2} I_{d2} = \rho g \left(\frac{1}{k} h_{n1}^3 \right)^{1/3} (k I_{d1}) = \rho g k^{2/3} h_{n1} I_{d1}.$$

Najmanja vrednost tangencijalnog napona je: $\tau_{o,min} = \rho g h_{n1} I_{d1}$, pa je odnos:

$$\frac{\tau_{o,max}}{\tau_{o,min}} = k^{2/3} \equiv \left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}} \right)^{2/3}. \quad (4.5)$$

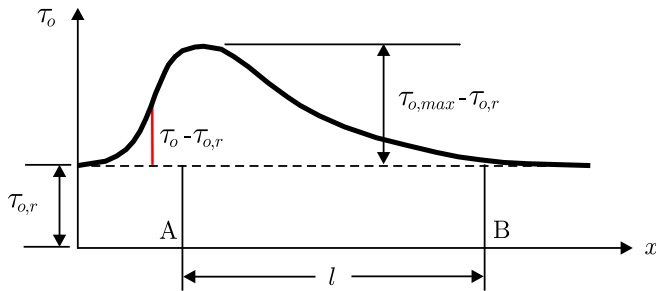
Ako se pretpostavi da je staro korito bilo u ravnoteži (stabilno, dugoročno bez deformacije), onda $\tau_{o,min}$ predstavlja ravnotežni tangencijalni napon $\tau_{o,r}$, pa je shodno (4.5): $\tau_{o,r} = \tau_{o,max} / k^{2/3}$.

Relativni porast maksimalnog tangencijalnog napona usled prosecanja je:

$$\frac{\tau_{o,max} - \tau_{o,r}}{\tau_{o,r}} = k^{2/3} - 1 \equiv \left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}} \right)^{2/3} - 1. \quad (4.6)$$

Geometrijska interpretacija je data na Slici 4.26.

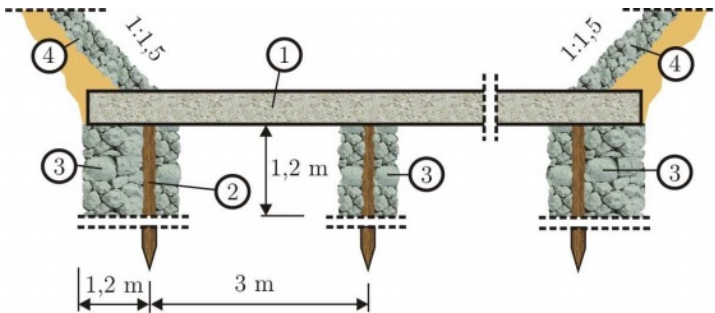
Porast erozionog kapaciteta usled prosecanja $\tau_o - \tau_{o,r}$ ukazuje na porast pronosa nanosa. Ako se uzme da je pronos vučenog nanosa po formuli MPM ($KI-10.3.2$ (10.19)): $q_{vm} \propto \tau_o^{3/2} \propto I_d^{3/2}$, povećanje pronosa usled prosecanja krivine biće



Slika 4.26: Dijagram povećanja erozionog kapaciteta usled prosecanja krivine [7].

proporcionalno faktoru $k^{3/2}$, odnosno $(I_{d2}/I_{d1})^{3/2}$. Na primer, ako je prosecanjem povećan nagib dna dva puta ($k = 2$), pronos nanosa biće povećan $2^{3/2}=2,83$, skoro 3 puta! Treba napomenuti i to da će se povećanje transporta vučenog nanosa vremenom postepeno smanjivati sa rastom erozione jame nizvodno od svakog praga, a eventualno i sa pojavom samopopločavanja korita (KI-9.2.5).

Eroziona dubina nizvodno od svakog praga zavisi od razmaka pragova. Ako su pragovi uniformno raspoređeni (na jednakom odstojanju), oni bliži uzvodnom kraju preseka imaće dublje erozione jame od onih nizvodno. Da bi se ujednačila eroziona dubina, razmak pragova ne treba da bude uniforman; na uzvodnom kraju preseka razmak treba da bude *manji* od onog na nizvodnom kraju. Jedno od konstruktivnih rešenja za pragove u prosecima prikazano je na Slici 4.27.



Slika 4.27: Tipski prag za vodotoke širine korita do 60 m; 1 – armirano-betonska greda dimenzija $0,36 \times 0,60$ m; 2 – drveni šipovi dužine oko 2,2 m; 3 – osiguranje od lomljenog kamena; 4 – obaloutvrda (prema [7]).

Prosek u ulozi rasteretnog kanala. Prosecanje oštih krivina ne podrazumeva uvek potpuno premeštanje toka u novo korito i napuštanje starog korita, prepuštajući ga zasipanju. Često je pogodno da se prosek aktivira samo u periodima velikih voda, dok pri niskim i srednjim protocima voda i dalje teče kroz staro korito. Tada prosek ima funkciju rasteretnog kanala. Prednost ovakvog rešenja je što se razdvajanjem protoka u periodu velikih voda smanjuje opasnost od erozije obala. Pored toga, staro korito ostaje ekološki sačuvano.



Slika 4.28: Prosek u funkciji rasteretnog kanala; levo: 1 – prosek; 2 – prelivni pregradni objekat; 3 – obaloutvrda; u sredini: erodirana konkavna obala koju treba zaštititi obaloutvrdom; desno: optimalna širina preseka B_p je rezultat sumiranja troškova izgradnje preseka i pregradnog objekta T_p i troškova zaštite obale starog korita od erozije T_o ; povećanjem širine B_p rastu troškovi T_p , a smanjuju se troškovi T_o , jer se zbog smanjenja protoka i brzine toka u starom koritu, za obaloutvrdu mogu primeniti jeftinija konstruktivna rešenja.

Pri projektovanju preseka kao rasteretnog kanala dve su mogućnosti. Prva je da njegova kota dna bude značajno iznad kote dna starog korita, tako da razdvajanje protoka započne tek kada nivo velike vode dostigne projektovanu kotu. Druga mogućnost je da kota dna preseka bude na nivou starog korita, a da se na ulazu u prosek izgradi pregradni prelivni objekat za kontrolu protoka. Kota krune preliva je projektni parametar. Na primer, ako je kruna preliva na koti srednje vode Z_{sv} , svi protoci manji od srednje vode biće usmereni ka starom koritu, a pri protocima koji su veći od srednje vode, jedan deo vode će preko preliva dospeti u prosek. Širina preseka B_p , od koje zavisi dužina preliva, predmet je tehničko-ekonomske optimizacije (Slika 4.28).

Rizik prosecanja krivine. Procena dinamike morfoloških promena izazvanih samoprosecanjem i veštačkim prosecanjem krivina je veoma nesigurna. Izvesno je samo da veštačko prosecanje krivine predstavlja *radikalnu* regulacionu meru, sa neizvesnim posledicama u pogledu stabilnosti korita uzvodno i nizvodno od preseka. Kako pojam *rizika* objedinjuje verovatnoću neke slučajne pojave (deformacije korita) i posledice te pojave (štete izazvane deformacijom korita), onda se prosecanje krivine, s pravom može smatrati *rizičnom* interventnom merom.

Zbog toga se projektovanju prosecanja krivina mora pristupiti krajnje studiozno, koristeći rezultate hidrauličkih i psamoloških proračuna i laboratorijskih ispitivanja pomoću fizičkih modela. Čak i tada, potrebna je velika obazrivost pri interpretaciji rezultata i donošenju odluka, jer navedeni modeli imaju svoja ograničenja.

U praksi teškoće nastaju zbog toga što najčešće ne postoji mogućnost kalibracije računskih i fizičkih modela. Nedostaju snimljene linije nivoa, pogotovo nivoi velikih voda. Za proračun deformacije korita neophodni su i ulazni tovari nanosa, koji takođe nedostaju, jer su kod nas (zbog nedostatka finansijskih sredstava i kratkih rokova za izradu tehničke dokumentacije), psamološka merenja retka.

U takvoj situaciji, izlaz se može potražiti u jednostavnom pristupu, zasnovanom na analizi elementarnih indikatora kretanja vode i nanosa. Ovaj pristup ima sledeće komponente:

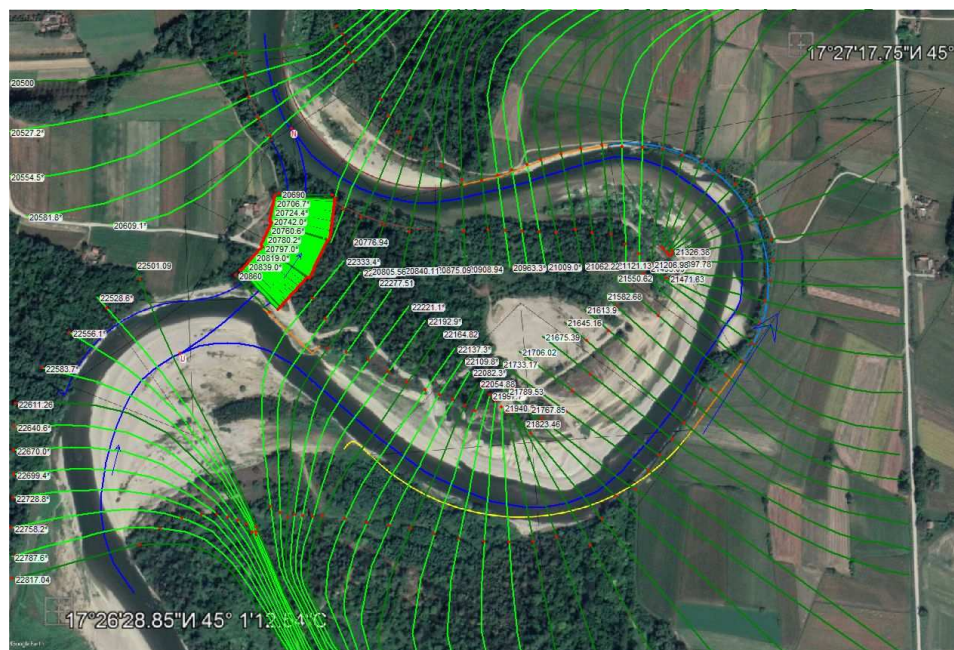
1. Prikupljanje i analiza osnovnih podloga: hidroloških (protoci i nivoi), psamoloških (krupnoća rečnog nanosa) i geomehaničkih (sastav tla u obalama);
2. Hidraulički (1D) proračuni za stanje pre prosecanja (linije nivoa, uzdužni profili srednje profilske brzine i tangencijalnih napona na dnu);
3. Varijantna rešenja preseka (projektna dužina i širina, kineta ili iskop u punom prilivu, ulaz sa pregradom ili bez nje, prosek sa kaskadama ili bez njih);
4. Hidraulički (1D) proračuni za stanje sa presekom i aktivnim starim koritom (protoci, linije nivoa, uzdužni profili brzina i tangencijalnih napona);
5. Analiza hidrauličkih posledica prosecanja (upoređenje protoka, linija nivoa i tangencijalnih napona u preseku i starom koritu za sve varijante preseka);
6. Analiza psamoloških posledica prosecanja (promena osrednjenog tangencijalnog napona na deonicama uzvodno i nizvodno od preseka, raspored osrednjenog transportnog kapaciteta za vučeni nanos, upoređenje pronosa vučenog nanosa pre i posle prosecanja);
7. Ocena prihvatljivosti varijantnih rešenja preseka sa stanovišta zasipanja starog korita;
8. Ocena opravdanosti preseka sa stanovišta dugoročne stabilnosti rečnog korita uzvodno i nizvodno od preseka;
9. Ekonomska analiza u slučaju opravdanosti prosecanja.

Opisani uprošćeni pristup u oceni rizika od prosecanja krivine ilustrovaće se jednim primerom iz prakse [103, 104].

■ **Primer 4.2.** Razmatra se prosecanje razvijenog meandra u donjem toku reke Vrbas (Slika 4.29). Na praspologanju su ove podloge: topografske – snimljeni poprečni profili rečnog korita i priobalja (Slika 4.29), hidrološke – podaci o malim, srednjim i velikim vodama (Tabela 4.5) i psamološke – podaci o aluvijalnom materijalu iz rečnog korita i obala (Tabela 4.6).

Pri trasiranju preseka vodilo se računa da on bude što kraći i da se njegova osovina na hidraulički povoljan način poveže sa osovinom postojećeg korita. Iz usvojenog položaja preseka proizašli su osnovni geometrijski projektni elementi:

- dužina preseka: 170 m;
- dužina postojećeg, „starog” korita: 1625 m;
- stepen skraćivanja trase: $1625/170 = 9,56$;
- kota dna rečnog korita na ulazu u prosek: 95,5 mm;
- kota dna rečnog korita na izlazu iz preseka: 92,0 mm;
- visinska razlika u kotama dna korita: 3,5 m;
- uzdužni nagib dna preseka: $3,5/170 = 2\%$;
- uzdužni nagib dna postojećeg korita: 0,2%.



Slika 4.29: Meander reke Vrbas (km 20+840) sa snimljenim i interpolovanim poprečnim profilima koji su korišćeni u proračunu linijskog ustaljenog tečenja pomoću softverskog paketa HEC-RAS [103, 104].

Tabela 4.5: Merodavni protoci reke Vrbas [103, 104].

Povratni period	Karakteristični protok	Oznaka
-	$Q_{mv} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{mv}
-	$Q_{sv} = 133 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{mv}
5 god.	$Q_{20\%} = 854 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_5
10 god.	$Q_{10\%} = 1037 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{10}
20 god.	$Q_{5\%} = 1249 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{20}
100 god.	$Q_{1\%} = 1815 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{100}

Tabela 4.6: Granulometrijski sastav materijala iz rečnog korita [103].

d [mm]	0,07	0,1	0,2	0,6	1	2	6	10	20	30	60
p [%]	8	10	14	21	25	32	50	65	85	92	100

Projektno rešenje preseka predviđa trapezni poprečni presek sa širinom u dnu 60 m i nagibom kosina 1:2. Razmatraju se tri varijante ulaza u presek:

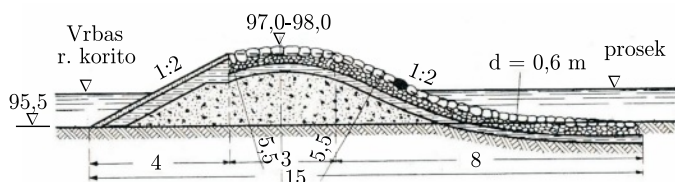
(1) Ulaz bez pregradnog objekta, sa kotom dna 95,5 mm; voda iz korita Vrbasa slobodno ulazi u presek, sa spontanom podelom protoka na presek-staro korito.

(2) Ulaz sa prelivnom pregradom čija kota krune odgovara nivou male vode: $Z_{mv} = 97,0$ mm; svi protoci u domenu malih voda i dalje idu kroz staro korito, a prosek se aktivira samo pri protoka koji su veći od protoka male vode.

(3) Ulaz sa pregradom čija kota krune odgovara koti srednje vode: $Z_{sv} = 98,0$ mm; prosek postaje aktivan samo kada protok u reci premaši protok srednje vode.

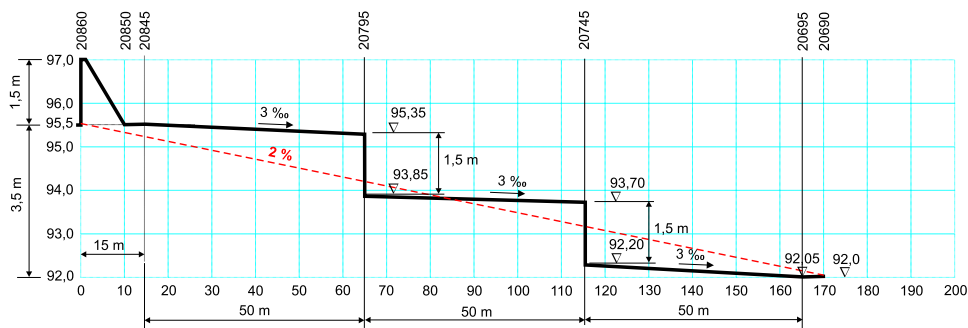
Varijante ulaza sa pregradom osmišljene su sa namerom da se: (a) aktiviranjem preseka *samo u kritičnim periodima* vremenski ograniče nepovoljne posledice prosecanja; (b) spreči potpuno zasipanje starog (postojećeg) korita, u cilju održanja psamološke ravnoteže i ekološkog statusa vodotoka.

Pregradna građevina može biti konstruktivno rešena na više načina (gabioni, betonski prag i dr.) Na Slici 4.30 prikazano je jedno od mogućih rešenja.



Slika 4.30: Pregradna prelivna građevina na ulazu u prosek; dužina pregrade je 60 m, a njena kota krune može biti na nivou male ili srednje vode [103, 104].

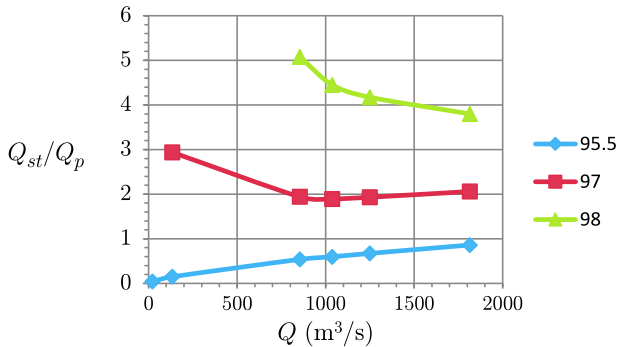
Veliki uzdužni nagib preseka je smanjen kaskadama, kao što prikazuje uzdužni profil na Slici 4.31.



Slika 4.31: Projektni uzdužni profil preseka sa kaskadama visine 1,5 m i uzdužnim nagibom dna od 0,3% [103, 104].

Na raspolaganju su rezultati hidrauličkih proračuna koji se ovde ne prikazuju, a obuhvataju:

- linije nivoa pri zadatim protocima za korito bez preseka i sa presekom;
- podatke o podeli protoka na prosek i staro korito (Slika 4.32) i
- podatke o rasporedu tangencijalnog napona na dnu (Slika 4.33).



Slika 4.32: Podela protoka na staro korito Q_{st} i prosek Q_p u zavisnosti od dotoka sa uzvodne deonice Q i kote dna ulaza u prosek: bez pregrade (95,5 mm) i sa pregradom (97 mm i 98 mm) [103, 104].

Ispitati opravdanost prosecanja sa stanovišta regresivne erozije na uzvodnoj deonici i promena u starom koritu.

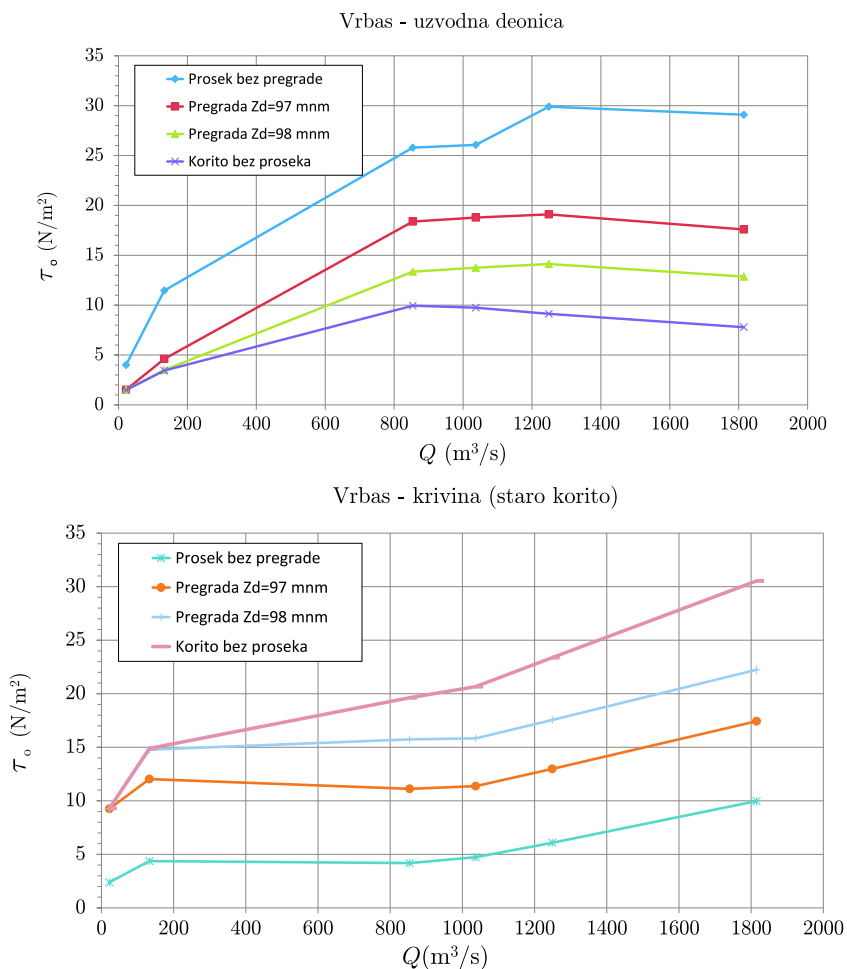
Rešenje. Dijagram na Slici 4.32 pokazuje da je kod preseka bez pregrade na ulazu, odnos protoka $Q_{st}/Q_p < 1$, odnosno $Q_{st} < Q_p$, što znači da prosek previše „odvlači” vodu od starog korita. U slučaju pregrade sa kotom krune preliva na $Z_{mv} = 97,0$ mm, pri velikim vodama je $Q_{st}/Q_p \approx 2$, što znači da je protok u starom koritu približno dva puta veći od onog u preseku, dok je u slučaju preliva sa kotom krune na $Z_{sv} = 98,0$ mm, približno četiri puta veći. Iz ovih odnosa proizilazi da *prosek bez pregrade nije poželjan*, zbog prevelikog opterećenja preseka i potencijalno velike deformacije korita uzvodno i nizvodno od preseka, dok bi staro korito u periodima malih i srednjih voda bilo osiromašeno vodom i prepušteno degradaciji i zasipanju.

Ako se tangencijalni napon na dnu³ uzme kao indikator potencijalne deformacije korita, iz dijagrama na Slici 4.33 proizilazi da je povećanje tangencijalnog napona na uzvodnoj deonici usled prosecanja krivine izuzetno veliko i opasno. U varijanti preseka bez pregradne građevine na ulazu, to povećanje je u domenu velikih voda oko 300%, što ovu varijantu diskvalifikuje. S druge strane, u varijantama preseka sa pregradom na ulazu, podela protoka utiče da tangencijalni napon opadne u starom koritu za 20–45%.

U nastavku analize, može se razmotriti pokretljivost materijala na dnu korita. Koristeći izraz za kritični tangencijalni napon MPM (Mayer-Peter i Müller, KI-10.3.2-(10.21)), može se definisati *gornja granica krupnoće svih pokrenutih zrna* (d_c), pri osrednjenom tangencijalnim naponu na deonici: $d_c = \tau_o / [0,047 g \cdot (\rho_s - \rho)]$.

³Ovde je tangencijalni napon na dnu *osrednjen po deonicama*; reč je o težinskom prostornom osrednjavanju: $\tau_o = \sum \tau_{o,i} \Delta x_i / \sum \Delta x_i$, gde je: $\tau_{o,i}$ – vrednost tangencijalnog napona u profilu; Δx_i – segment korita sa profilom u centru; $i = 1, 2, \dots, N$ – indeks segmenta, odnosno pripadajućeg profila; N – ukupni broj profila.

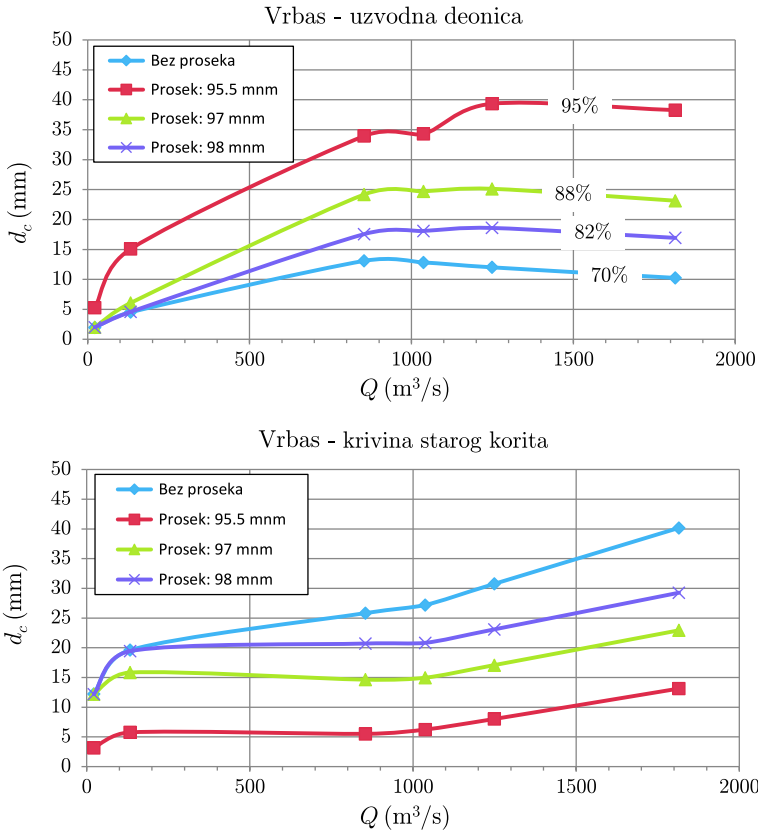
Rezultati su prikazani na Slici 4.34.



Slika 4.33: Raspored osrednjenog tangencijalnog napona na dnu [103, 104].

Može se primetiti da se pri velikim vodama ($> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$), na uzvodnoj deonici, kada nema preseka, kreću sva zrna sitnija od $10 \div 15 \text{ mm}$ (oko 70% svih zrna). U slučaju preseka sa pregradom na ulazu, gornja granica svih pokrenutih zrna raste do krupnoća $18 \div 25 \text{ mm}$ ($82 \div 88\%$ svih zrna). U slučaju preseka bez pregrade, gornja granica pokrenutih zrna dostiže 40 mm , što znači da je 95% zrna u pokretu, odnosno da je praktično celo dno zahvaćeno erozijom. Zaključak je ponovo da prosek bez pregrade nije dobro rešenje.

S druge strane, donji dijagram na Slici 4.34 pokazuje da je u starom koritu manja pokretljivost zrna, što je očekivano, jer reka teži da očuva ukupni pronos nanosa koji je postojao pre prosecanja krivine.

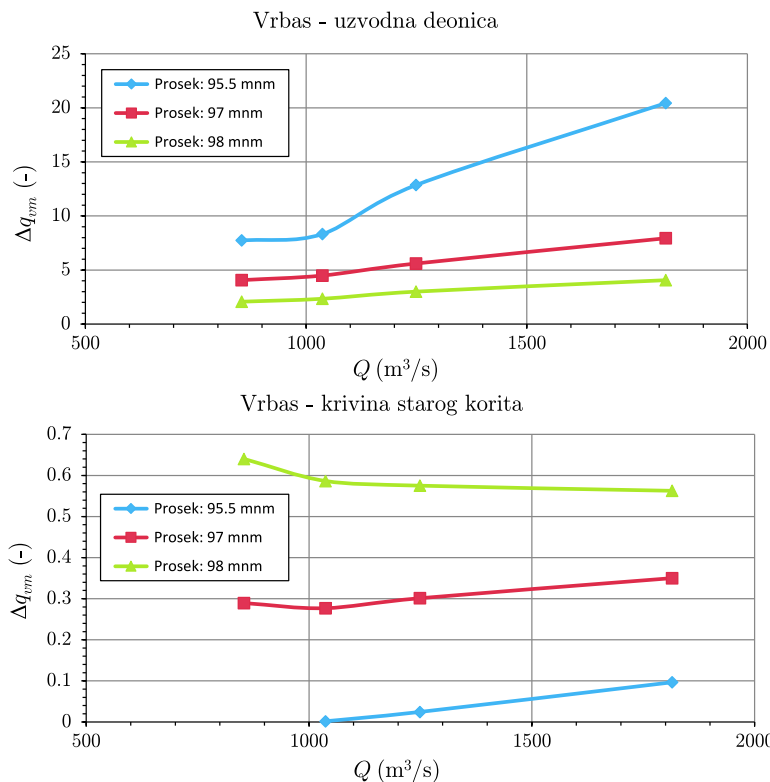


Slika 4.34: Pokretljivost nanosa na dnu, na deonici uzvodno od preseka i u krivini starog korita [103, 104].

Dodatno se može razmatrati *transportni kapacitet* za vučeni nanos (KI-10.2-10.3). Prema obrascu MPM (KI-10.3.2-(10.22)) je: $q_{vm} \propto (\tau_o - \tau_{oc})^{3/2}$, gde je: q_{vm} – jedinični maseni pronos vučenog nanosa (kg/(sm)), τ_o – na deonici osrednjeni tangencijalni napon, a τ_{oc} – kritični tangencijalni napon. Računajući sa srednjim prečnikom zrna $d_{50} = 6$ mm: $\tau_{oc} = 0,047 g(\rho_s - \rho) d_{50} = 4,5$ N/m². Indikator *povećanog (osrednjenog) transportnog kapaciteta* usled prosecanja je odnos:

$$\Delta q_{vm} \propto \frac{[(\tau_o - \tau_{oc})^{3/2}]_{\text{sa presekom}}}{[(\tau_o - \tau_{oc})^{3/2}]_{\text{bez preseka}}}. \tag{4.7}$$

Vrednosti Δq_{vm} ukazuju na veličinu poremećaja u pronosu nanosa nakon prosecanja (Slika 4.35). Rezultati su indikativni u *kvalitativnom* smislu. Oni ne kvantifikuju potencijalnu deformaciju korita, jer ona ne zavisi samo od transportnog kapaciteta, već i od dotoka nanosa sa uzvodne deonice (uzvodnog graničnog uslova).



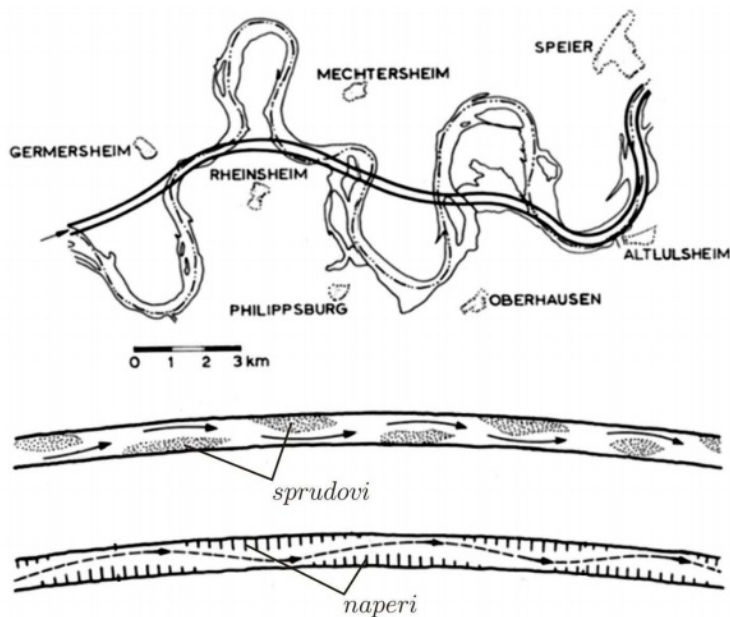
Slika 4.35: Odnos indikatora transportnog kapaciteta pri velikim vodama [103, 104].

Prikazni primer pokazuje da se posledice prosecanja mogu kvalitativno analizirati na krajnje uprošćen način, razmatranjem rasporeda osnovnih hidrauličko-psamoloških veličina. Za inženjere je bitno sagledavanje trendova i upoređenje rezultata u relativnom smislu: „stanje bez preseka - stanje sa presekom”; „jedna varijanta preseka - druga varijanta preseka” itd. Složeniji proračuni zahtevaju mnogo veći fond ulaznih podataka vezanih za terenska merenja, za koja najčešće nedostaju kadrovi, novac i vreme.

Istorija prosecanja krivina u svetu i kod nas. Jedan od najpoznatijih primera iz svetske prakse je uređenje reke Rajne u XIX veku. Cilj uređenja je bilo povećanje propusne moći korita za velike vode. U gornjem toku, ovu reku je karakterisalo razuđeno, a u srednjem toku, meandrirajuće korito (Slika 4.36). Do 1879. godine, izveden je veći broj preseka⁴. Ostvaren je primarni cilj, ali sa veoma nepovoljnim posledicama; došlo je do dubinske erozije korita, velikog sniženjenja nivoa podzemnih voda (za oko 6 m) i sušenja šuma u priobalju.

⁴Regulacija Rajne je vezana za ime Johana Tule (Johan Gottfried Tulla, 1770–1828), nemačkog potpukovnika i inženjera, osnivača inženjerske škole iz koje je nastao Univerzitet u Karlsruheu (Karlsruhe) i nosioca francuskog ordena Oficira legije časti.

Pravolinijske i blago zakrivljene deonice postale su nestabilne zbog formiranja naizmeničnih sprudova, što je ugrozilo plovidbu. Zato su duž obe obale naknadno izgrađeni sistemi napera (Slika 4.36). U periodu 1918-1977, Rajna je kanalisana izgradnjom sistema brana sa brodskim prevodnicama, čime je poboljšan režim površinskih i podzemnih voda i zaustavljen proces regresivne erozije korita.



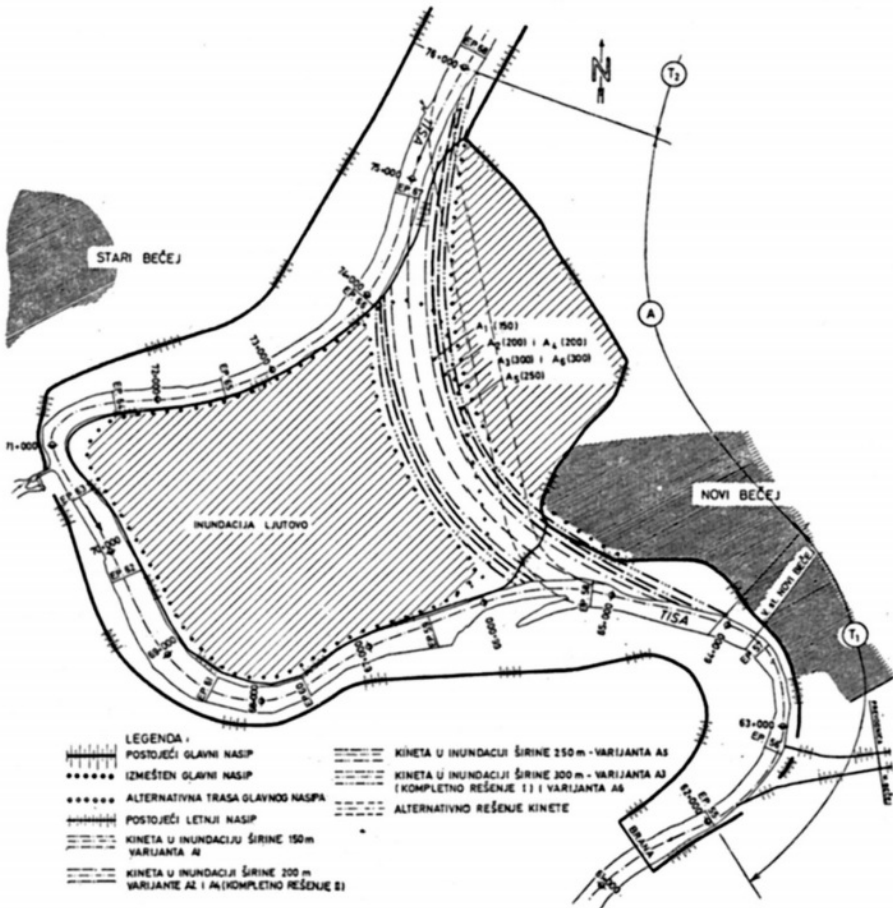
Slika 4.36: Uređenje reke Rajne; gore: isključenje razuđenog korita; u sredini: ispravljanje krivina i skraćenje trase za oko 80 km; dole: stabilizacija pravolinijskih deonica pomoću sistema napera [92].

Kod nas je po prosecanju krivina poznata reka Tisa. Radovi na uređenju ove reke započeti su još u XIII veku. U XVIII veku u Austrougarskoj je aktuelizovano pitanje plovidbe izgradnjom kanala Bezdán-Bečej, a u XIX veku, zaštite od velikih voda, naročito posle katastrofalnih poplava 1830. i 1844-1845. godine. Izrada projekta regulacije Tise poverena tada poznatom stručnjaku Palu Vašarheljiju⁵, koji je u cilju skraćanja trajanja plavljenja inundacionih prostora predvideo prosecanje 121 krivine, od kojih 13 na našoj teritoriji, na sektoru dužine 170 km. Prvobitni projekat nije realizovan, a u periodu 1847-1885 je bio dva puta prerađivan⁶, da bi do 1875. godine na Tisi bilo izvedeno 112 proseka ukupne dužine 136 km. Efekti ovih prosecanja su bili polovični, jer su proseci rađeni sporadično, ne poštujući uzvodni redosled gradnje.

⁵Pal Vašarhelji (Vasarhelyi Pal, 1795-1847, mađarski inženjer, rukovodio snimanjem Tise i njenih pritoka, kao i đerdapske klisure 1892. godine.

⁶Autori: Pietro Paleokapa (1789-1867), šef Direkcije voda za Lombardiju i Veneciju i Florijan Paseti (Florian Ritter von Pasetti, 1793-1875), bečki hidroinženjer, poznat i po radu na uređenju Dunava.

Do 1970. godine, kod nas je na Tisi izvedeno više preseka, ukupne dužine 31,5 km. Na Slici 4.37 prikazane su varijante preseka u inundaciji Ljutovo između Novog i Starog Bečeja. Razmatrano je ukupno 7 varijanti širine preseka u rasponu 150÷300 m i dve opcije kota dna na uzvodnom i nizvodnom kraju preseka [70]. Rezultati hidrauličkog proračuna poslužili su kao osnova za ekonomsko vrednovanje i izbor optimalnog rešenja.



Slika 4.37: Regulacija Tise kod Bečeja km 65+170–km 74+880; ispravljanjem krivine „Ljutovo”, tok je skraćen za 1,5 km; brzina toka u punom koritu (1,2÷1,3 m/s) bila je ključan faktor u optimizaciji geometrije korita; naime, uspor usled brane kod Bečeja pospešuje zasipanje predmetne deonice pri malim i srednjim vodama, pa brzina toka pri velikim vodama treba da bude dovoljno velika da pokrene istaloženi nanos [70].

4.5 Pregrađivanje i skretanje vodotoka

Pregrađivanje i skretanje vodotoka može imati dva motiva: (i) regulaciju vodotoka i (ii) hidroenergetiku – izgradnju hidročvora (skupa funkcionalno povezanih objekata – brane, hidroelektrane i brodske prevodnice).

Pregrađivanje i skretanje vodotoka u vreme regulacionih radova preduzima se samo na malim rekama. Tada ova mera ima lokalni karakter i obavlja se tako što se vodotok sprovede kroz privremeni derivacioni kanal ili cevasti provodnik van mesta gde se radovi obavljaju u koritu. Izgradnja cevastih derivacija u sklopu mini hidroelektrana je veoma štetna, jer rečno korito ostavlja u suvom, sa katastrofalnim ekološkim posledicama.

Na velikim rekama, pregrađivanje vodotoka se uglavnom izvodi za potrebe hidroenergetike (Slika 4.39). Koristi od pregrađivanja reke mogu imati i druge grane vodoprivrede (plovidba, vodosnabdevanje). Pregrađivanje sistemom brana, poznato kao „kanalisanje” vodotoka, izaziva drastičnu izmenu njegovog hidrauličko-psamološkog režima. Upravljanje protocima i nivoima omogućava efikasno korišćenje vodotoka (energetika, plovidba, zaštita od poplava), ali po cenu niza dugoročno negativnih posledica po morfologiju i ekologiju rečnog korita. U nastavku se se razmatraju neki hidrotehnički aspekti pregrađivanja.

Dimenzionisanje zagata. Izgradnju hidročvora (brana, prevodnica, elektrana) karakteriše etapnost. Jedna mogućnost je da se objekti hidročvora grade na obali pored rečnog korita, a da se po završetku radova, reka iz svog prirodnog korita skrene ka izgrađenom hidročvoru.

Druga (verovatnija) mogućnost je da se objekti hidročvora grade u rečnom koritu etapno, tako što se radovi izvode na jednom delu korita koji je pod zaštitom zagata, dok drugi deo korita prihvata celokupni protok. Zatim se taj deo korita izoluje zagatom i izvode radovi, a voda se usmerava na deo korita u kome su već izgrađeni objekti hidročvora.

Podsetimo se da se pri izgradnji brana često pristupa pregrađivanju celog rečnog korita pomoću uzvodnog i nizvodnog zagata, dok se tok skreće oko gradilišta kroz derivacioni tunel. Redosled radova obuhvata izgradnju: derivacionog tunela, privremenog uzvodnog i nizvodnog zagata, ispušavanje vode iz prostora unutar zagata, a potom, formiranja gradilišta brane.

Propusna moć derivacionog tunela, kao i visina zagata, zavise od projektne velike vode, što je predmet tehno-ekonomskih analiza. Pri dimenzionisanju zagata osnovno pitanje bi se moglo formulisati na sledeći način: „koja je verovatnoća da se projektna T -godišnja velika voda desi *bar jednom* u nizu od N godina, koliko će trajati izgradnja brane?”. Odgovor daje elementarna statistika.

Verovatnoća da se data velika voda desi u *bilo kojoj godini* je: $p = 1/T$, a broj takvih dešavanja N je definisan binomnom raspodelom $B(N, p)$ [14, 193].

Statistički rizik R je zbir verovatnoća $1, 2, \dots, N$ poplava koje se mogu javiti u periodu od N godina izgradnje. Alternativni način proračuna rizika je da se on definiše preko *verovatnoće odsustva* poplava u periodu od N godina $P(0)$:

$$R = 1 - P(0) = 1 - (1 - p)^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N. \quad (4.8)$$

Riziku komplementarna veličina je *pouzdanost*:

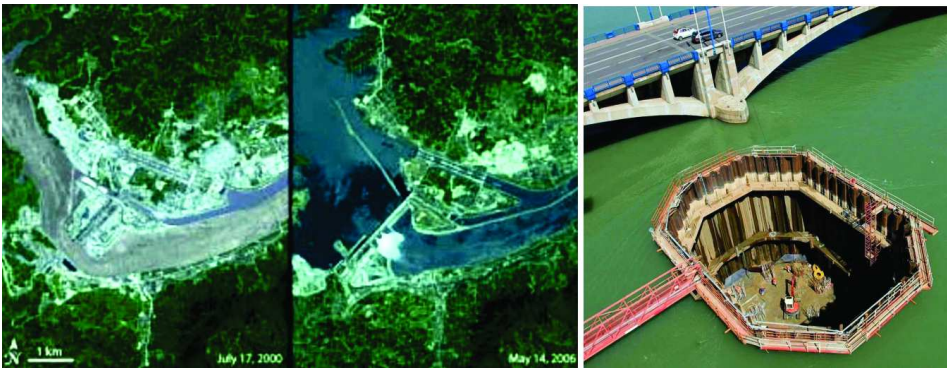
$$Po = 1 - R = (1 - p)^N = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N. \quad (4.9)$$

Koncept rizika i pouzdanosti je vrlo važan u hidrotehničkoj praksi; izrazi (4.8) ili (4.9) se mogu koristiti za određivanje projektne velike vode, koja odgovara *prihvatljivom stepenu rizika* u datom vremenskom periodu. Evo jednog primera.

■ **Primer 4.3.** Za zaštitu gradilišta jednog objekta, predviđen je zagat dimenzionisan na 20-god. veliku vodu. Izgradnja objekta traje 3 godine, $B(3, 0,05)$. Razmotriti rizik preliivanja zagata u ovom periodu.

Rešenje. Verovatnoća da zagat *neće* biti preliven u toku izgradnje objekta (pouzdanost) iznosi: $Po = P(x = 0) = (1 - 1/20)^3 = 0,95^3 = 0,86$. To znači da je rizik da se zagat prelije bar jednom u 3 godine: $R = 1 - Po = 0,14$. Verovatnoća da će zagat biti preliven u bilo kojoj godini je: $p = 1/T = 1/20 = 0,05$. Verovatnoća da će zagat biti preliven bar jednom u 3 godine je: $P(x = 1) = \binom{3}{1} p^1 (1 - p)^2 = 3 \cdot 0,05 \cdot 0,95^2 = 0,135$. Verovatnoća da će zagat biti preliven samo u trećoj godini iznosi: $P = (1 - p)(1 - p)p = 0,95^2 \cdot 0,05 = 0,045$.

Na Slici 4.38 prikazana su dva ilustrativna primera zagata.



Slika 4.38: Primeri zagata; levo: satelitski snimci izgradnje brane Tri klisure na reci Jangce u Kini (2000-2006) prikazuju zagat prve faze na desnoj obali, dužine 580 m, visine 140 m, i završeni objekat [195]; desno: zagat za izgradnju mostovskog stuba na reci Godavari u Indiji [292].

Dimenzionisanje kamena za pregrađivanje korita. Pregrađivanje korita se u načelu može obavljati na dva načina: (i) postepenim sužavanjem korita do konačnog zatavaranja, tako što nasipanje kamenih ili betonskih blokova napreduje od jedne obale ka drugoj, ili simultano od obe obale ka osovini toka i (ii) ravnomernim nasipanjem po celoj širini korita, pri čemu se kameni ili betonski blokovi ispuštaju sa posebne konstrukcije ili iz plovila.

Denivelaciju, koja se javlja tokom pregrađivanja, prati povećanje brzine toka i erozije korita. Pri kraju bočnog pregrađivanja, brzine mogu biti toliko velike da samo izuzetno krupni kameni ili prefabrikovani betonski blokovi mogu odoleti snazi toka (Slika 4.39).



Slika 4.39: Pregrađivanje Dunava u toku izgradnje HEPS Đerdap I; radovi su sa srpske strane obavljani ubacivanjem betonskih kocki, a sa rumunske strane, nasipanjem kamena sa privremenog mosta [51].

Za određivanje krupnoće kamena može se primeniti izraz Izbaša (Izbash) [90] (K1-9.2.3-(9.35)):

$$d = \frac{1}{2g \Delta} \left(\frac{u_{dc}}{a_1} \right)^2, \quad (4.10)$$

gde je u_{dc} – kritična brzina toka, $a_1 = 0,85 \div 1,2$ – empirijski koeficijent, a Δ – relativna gustina kamena; za vrednosti $a_1 = 1,2$ i $\Delta = 1,65$, izraz (4.10) daje jednostavnu vezu: $d = 0,02 u_{dc}^2$.

■ **Primer 4.4.** Pregrađivanjem se na kratkom odstojanju uspostavlja denivelacija $\Delta Z = 1,5$ m. Odrediti potrebnu krupnoću i težinu kamena ($\Delta = 1,65$).

Rešenje. Zanemarujući gubitke energije, brzina toka je: $V = \sqrt{2g \Delta Z} = 5,42$ m/s. Pretpostavljajući da je $V = u_{dc}$, iz (4.10) sledi: $d = 0,55 \approx 0,6$ m. Ovom prečniku odgovara težina kamenog komada sfernog oblika: $G_k = \rho_s g (d^3 \pi / 6) = 2900$ N.

Morfološke posledice kanalsanja reka. Ozbiljnost morfoloških posledica kanalsanja reka zahteva brojne analize pre započinjanja bilo kakvih radova. One započinju sa Prethodnom studijom opravdanosti, sa ograničenim fondom podataka, da bi se u kasnijim fazama projektovanja, zasnivale na opsežnim istražnim radovima i rezultatima numeričkog i fizičkog modeliranja.

U nastavku se navode neophodne informacije za procenu psamološko-morfoloških posledica kanalisanja reka [247].

a) Podaci o razmatranom području

- Položaj projektovanih brana/akumulacija (tematske karte).
- Ciljevi kanalisanja, projektovane zapremine, eksploatacioni vek (ako su primarni cilj energetika i zaštita od poplava, vek akumulacije za analizu zasipanja je 100 godina, a ako je primarni cilj plovidba, 50 godina).
- Konstruktivni elementi brana, naročito kote krune preliva.
- Krive površine i zapremine svake akumulacije.
- Uzdužni i poprečni profili rečnog korita.
- Hidrauličko-psamološki granični profili i ušća pritoka.

b) Psamološki ulazni podaci

- Produkcija nanosa u slivu. Računa se pomoću empirijskih obrazaca, koristeći podatke o nameni površina, vrstama tla i velikim vodama. Ako se ulazni podaci tretiraju kao slučajne veličine, rezultati se statistički obrađuju i prikazuju sa intervalima poverenja.
- Karakteristike nanosa u rečnom koritu, kao i sastav materijala iz obala. Podaci se prikupljaju obilaskom terena i uzorkovanjem na više lokacija. Fotodokumentacija je obavezna.

c) Rezultati psamološko-morfološke analize uzvodno od svake brane

- Efikasnost zadržavanja nanosa u akumulaciji i smanjenje njene zapremine.
- Prognoza nivoa u uslovima zasipanja akumulacije.
- Procena pojave mutnih struja u akumulaciji, koje su posledica spiranja koloidnog tla u slivu.
- Procena opasnosti od erozije obala.

d) Rezultati psamološko-morfološke analize nizvodno od svake brane

- Izmenjene krive trajanja protoka i nivoa u profilu brane.
- Erozija (degradacija) korita nizvodno od brane. Procena sniženja donje vode je bitna za rad hidroelektrane i projektovanje slapišta.
- Procena erozije korita pritoke; uzeti u obzir izmenjenu krivu trajanja nivoa i sniženje donje vode glavnog vodotoka; proceniti dužinu zaštite korita pritoke uzvodno od ušća.

4.6 Uređenje ušća

Složenost uređenja ušća proizilazi iz geometrijskih uslova pod kojim se spajaju dve reke, interakcije njihovih hidrološko-hidrauličkih režima i posledica koje ta interakcija ima na psamologiju i morfologiju oba rečna korita. Ušća reka u more su specifična zbog problematike razvoja delti i ovde se neće razmatrati.

Hidrološko-hidraulički uslovi. Uređenje rečnih ušća suočava se već na početku sa problemom definisanja međusobnog hidrološkog uticaja jedne reke na drugu. Radi se o određivanju uslovne verovatnoće velikih voda i mogućnosti istovremene pojave – koincidencije vršnih protoka i nivoa. Od interesa su i trajanja ekstremnih hidroloških pojava.

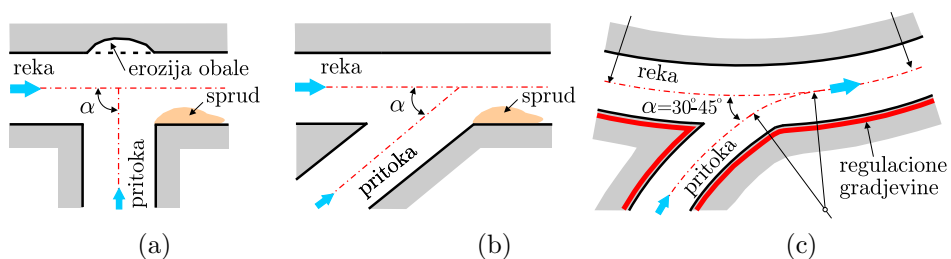
Iz složene hidrološke interakcije proizilazi složena hidraulička međuzavisnost. Ona se manifestuje kroz usporavanje matične reke ili pritoke, u zavisnosti od trenutnih protoka. Odnos trenutnih protoka i nivoa utiče na prostiranje poplavnih talasa uzvodno od ušća.

Detalji hidrauličkog proračuna spoja dve reke (primena jednačina održanja energije ili bilansne jednačine sila) dati su u prvoj knjizi (KI-6.8) i ovde se neće ponavljati. Isti principi proračuna važe i kada je u pitanju račvanje tokova – bifurkacija.

Psamološko-morfološki uslovi. Psamološke uslove matične reke i pritoke diktiraju veličina i karakteristike njihovih slivnih područja. Kada se ta područja znatno razlikuju, kišne epizode i oticaj su fazno neusaglašeni, tako da je priliv nanosa na ušću neravnomeran. Tome bitno doprinosi i geometrija korita, posebno uzdužni nagib dna; pritoke po pravilu imaju veći nagib dna, tako da je i nanos u pritokama krupniji od nanosa matične reke. Na ušću se granulometrijski sastav menja tokom vremena, a česta je pojava segregacije nanosa po krupnoći i armiranja korita.

Morfološke karakteristike ušća uslovljene su ne samo hidrauličkim režimom i karakteristikama nanosa, već i geometrijom spoja matične reke i pritoke.

Glavni geometrijski parametar je ugao ulivanja α (Slika 4.40).



Slika 4.40: Ušće; (a) ulivanje pod pravim uglom; (b) ulivanje u nizvodnom smeru; (c) projektovano ulivanje sa regulacionim građevinama (obalouturdama/pravim paralelnim građevinama) prema [60, 173].

Najčešće je $\alpha \leq 90^\circ$. Ulivanje pod pravim uglom ($\alpha = 90^\circ$) ne omogućava efikasno odnošenje nanosa, što ima za posledicu pojavu spruda u zoni ušća (KI-1.4.3-Sl:1.12). Ovaj sprud predstavlja deponiju krupnijeg nanosa iz pritoke, za čije odnošenje transportni kapacitet matične reke nije dovoljan. Kod spoja bujičnih vodotoka pod pravim uglom, u zavisnosti od veličine korita i odnosa protoka, može doći do erozije obale matične reke izložene udaru pritoke (Slika 4.40-a).

Ako je ugao $\alpha > 60^\circ$, pri spajanju dva toka dolazi do izraženog vrtloženja koje u koritu formira proloke i plicake. Hidraulički uslovi i odnošenje nanosa povoljniji su ako je ulivanje usmereno nizvodno ($\alpha < 90^\circ$). Generalno, što je manji ugao ulivanja, blaži je hidraulički poremećaj. Međutim, čak i tada je prisutna pojava spruda nizvodno od samog ušća (Slika 4.40-b).

U periodima koincidencije velikih voda u reci i pritoci, nanos se, zbog uspora, može taložiti u koritu pritoke, uzvodno od ušća. To se naročito dešava kada je nizak nivo vode u pritoci, a visok, u matičnoj reci. Posledica je da se na samom ušću formira poprečni sprud, koji u hidrauličkom smislu deluje kao prag.

Kada dođe do toga da pritoka više ne može da „savlada” nanosni prag, na ušću dolazi do razdvajanja toka i grananja pritoke. Merenjem na preko 100 ušća velikih aluvijalnih vodotoka ($B/h > 5$, $Fr < 0,3$) utvrđeno je da u više od 50% slučajeva na ušću postoji visinska razlika između dna reke i dna pritoke [39].

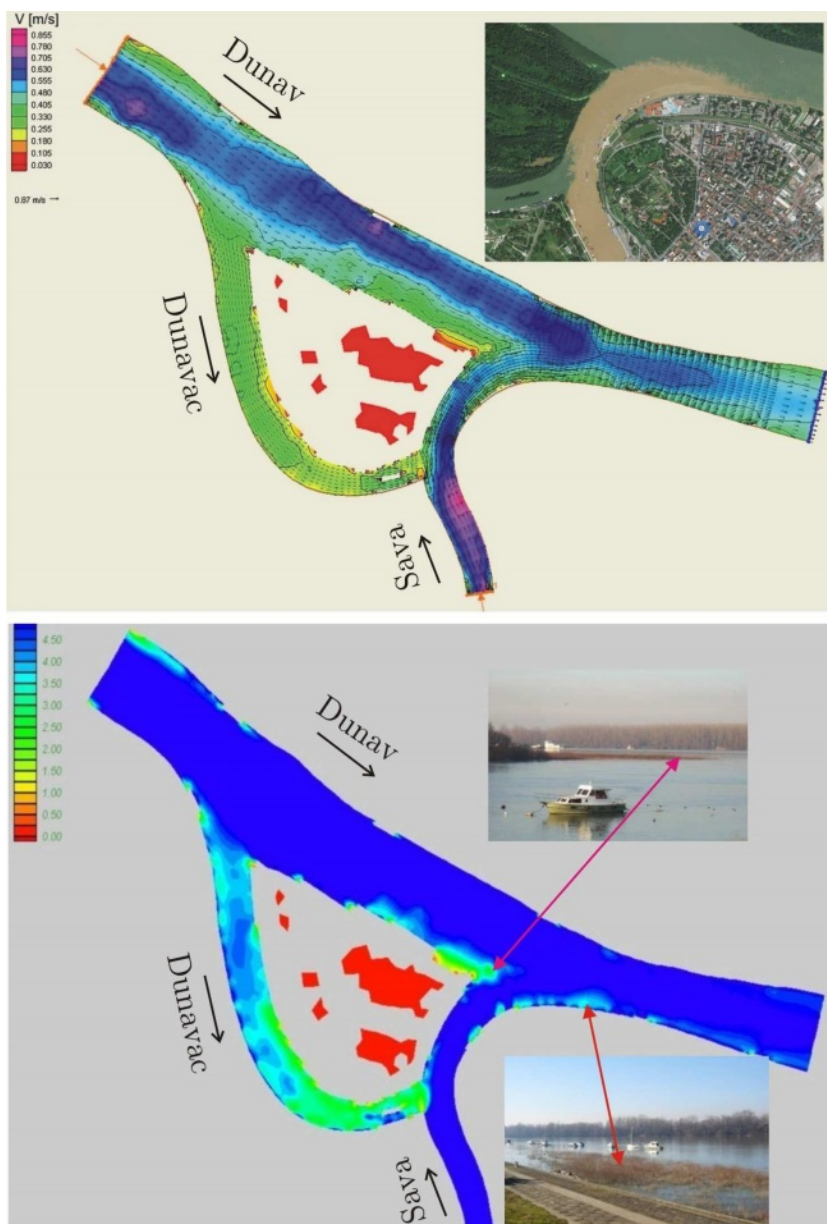
Radovi na uređenju ušća. Uređenje ušća ima za cilj da se u ravnotežnim uslovima obezbedi propusna moć matične reke za vodu i nanos, uzimajući u obzir zbirni protok vode i ukupni pronos nanosa matične reke i pritoke. Ako se uređenjem ušća to ne postigne, javiće se lokalni problem zasipanja uliva i širenja korita nizvodno od ušća.

Pravilo je da ušće treba da bude *u krivini*, duž konkavne obale, jer su tu brzina toka i intenzitet kretanja nanosa najveći (Slika 4.40-c).

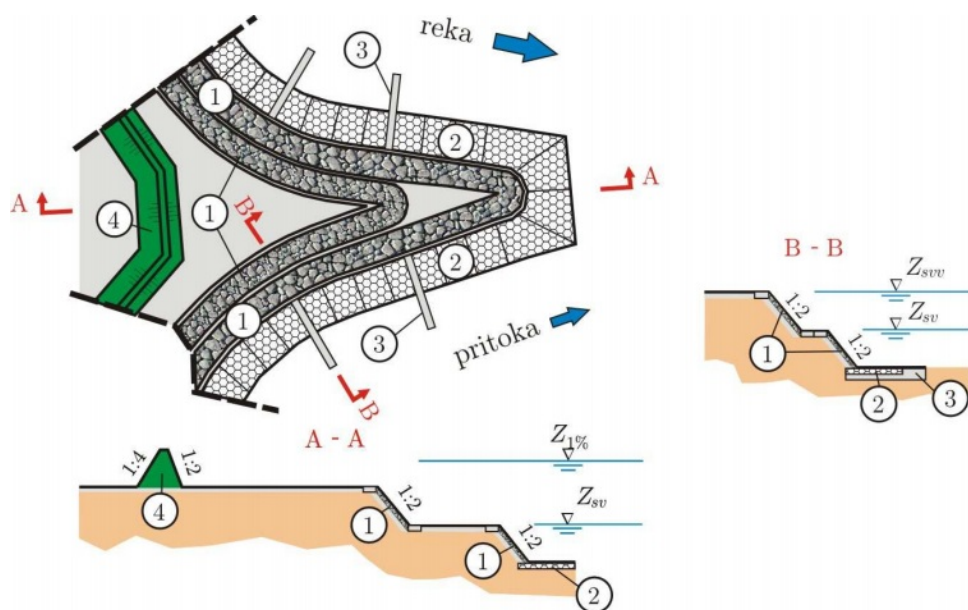
Iskustvo pokazuje da je najpovoljniji ugao ulivanja $\alpha = 30^\circ \div 45^\circ$ [173], odnosno $\alpha = 20^\circ \div 30^\circ$ [93, 199]. Različite preporuke važe za reke različite veličine. Veći uglovi ulivanja odgovaraju velikim rekama i malim pritokama (sa značajno manjim pronosom nanosa od matične reke). Manji uglovi ulivanja odgovaraju rekama i pritokama koje su uporedive veličine i sličnih transportnih kapaciteta za nanos.

Optimalna veličina ugla ulivanja, kao i sam položaj ušća, definišu se pomoću numeričkih i/ili fizičkih modela. Ovi modeli omogućavaju prostorno definisanje polja brzine i mesta na kojima se može očekivati taloženje nanosa (Slika 4.41), što je bitno za projektovanje regulacionih građevina. Pored toga, ovi modeli daju uvid i u mešanje voda susstiđućih vodotoka, što je bitno u analizi kvaliteta vode i zaštite životne sredine.

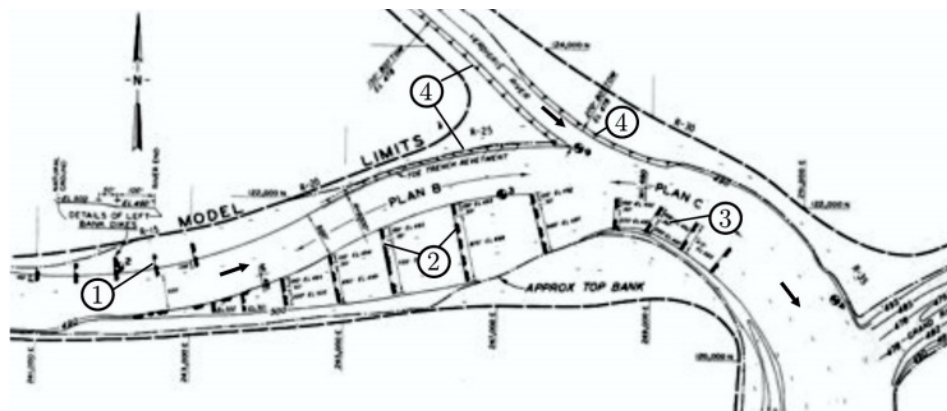
Na Slici 4.42 prikazane su građevine za regulaciju ušća, a na Slici 4.43, jedan primer iz prakse.



Slika 4.41: Rezultati numeričke 2D simulacije strujnog polja na ušću Save u Dunav u Beogradu; gore: raspored brzine pri odnosu protoka: Dunav $2480 \text{ m}^3/\text{s}$, Sava $1580 \text{ m}^3/\text{s}$ i satelitski snimak mešanja voda na ušću; dole: raspored vrednosti parametra V^*/W (V^* – smičuća brzina toka, W – brzina taloženja suspendovanog nanosa) koje ukazuju na mesta intenzivnog zasipanja i formiranja sprudova [111].



Slika 4.42: Tipične građevine za regulaciju ušća; 1 – obaloutvrda; 2 – tepih od gabiona; 3 – stabilizacioni prag; 4 – nasip [173].



Slika 4.43: Primer uređenja ušća na plovnoj reci (reka Arkansas, SAD); 1 – sistem napera A; 2 – sistem napera B; 3 – sistem napera C; 4 – obaloutvrda; varijantna rešenja su ispitivana pomoću fizičkog modela u horizontalnoj razmeri 1:120 i vertikalnoj razmeri 1:80 (stepen distorzije 1,5) [52].

4.7 Zaštita saobraćajnica

Uređenje vodotoka na mestima ukrštanja sa saobraćajnicama ima lokalni karakter i prvenstveno je motivisano očuvanjem bezbednosti saobraćaja. Radi se o rešavanju problema produbljenja ili zasipanja korita, kao i fluvijalne erozije obala. Dubinska erozija rečnog korita može izazvati potkopavanje mostovskih stubova i oporaca, a zasipanje korita, smanjiti proticajne profile i podići nivoe uzvodno od mostova i propusta. Ove neželjene pojave su često posledica ljudskih aktivnosti (loše projektovane trase, prosecanja krivina, eksploatacije šljunka, urbanizacije).

Za projektanta regulacije reka, važno je pitanje mesta ukrštanja saobraćajnice i vodotoka. Ako je u poziciji da utiče na izbor lokacije mosta, projektant mora da sagleda mnoštvo uslova – hidrauličkih (usporavanje toka, evakuacija velikih voda), psamoloških (pronos nanosa, stabilnost korita) i ekonomskih (troškovi izgradnje i održavanja mosta). Logično, najpovoljnije lokacije mosta su u stabilnoj, pravolinijskoj deonici, ili u krivini velikog poluprečnika, bez izraženih proloka. Dobar uvid u ovu problematiku dat je u [77].

Od svih uzroka oštećenja i rušenja mostova, lokalna erozija korita u periodu velikih voda je najčešći (Slika 4.44). To potvrđuju statistički podaci u svetu i u Srbiji [224]. U cilju rešavanja ovog problema, aktuelan je razvoj metodologije za procenu godišnjeg rizika od oštećenja/rušenja mostova usled potkopavanja stubova i oporaca. Ovo je praćeno formiranjem baza podataka⁷ i pratećeg softvera [224].



Slika 4.44: Oštećeni mostovi u vreme poplava; sleva udesno: r. Tamnava – Koce-ljeva, r. Ljig – Ljig (2014.) [36] i r. Ljubovača – Ljubovija (2020.) [294].

Ne postoji opšte prihvaćena sistematizacija mostovskih oštećenja. Radi se o deformaciji stubova, obalnih oslonaca i kolovozne konstrukcije, kao i o kombinaciji ovih deformacija (Slika 4.45).

4.7.1 Lokalna erozija korita u zoni mostova

Kada su u pitanju saobraćajnice, u okviru regulacije reka se razmatraju tri vida deformacije rečnog korita: (i) opšta deformacija, (ii) lokalna erozija usled mostovskog suženja i (iii) lokalna erozija oko mostovskih stubova i oporaca. Superpozicijom sva tri vida deformacije, dolazi se do *ukupne* deformacije na lokaciji nekog mosta.

⁷U Srbiji postoji informaciona baza inventarskih i inspekcijskih podataka o postojećim mostovima - BMP („Baza Podataka Mostova”), od 1998. u elektronskoj verziji „SR-03”.



Slika 4.45: Vrste mostovskih oštećenja usled lokalne erozije rečnog korita; sleva na desno: sleganje stuba; rotacija stuba; deformacija mostovskog obalnog stuba (oporca); kolaps kolovozne konstrukcije usled gubitka oslonca (prema [18]).

Proračuni lokalne erozije oko mostovskih stubova i oporaca obavljaju se *posle* analize dugoročne opšte deformacije korita, da bi se utvrdila referentna kota dna u odnosu na koju se računa lokalna eroziona dubina. Podsetimo se da se opšta deformacija odvija na dugačkim rečnim deonicama i da se računa postupkom koji je opisan u prvoj knjizi (KI-12.1).

Mostovska suženja. Ovaj vid erozije nastaje usled lokalnog povećanja brzine u suženju osnovnog korita u zoni mosta. Efekat suženja je naročito vidljiv u periodima poplava, kada prilazne mostovske konstrukcije u inundacijama opstruiraju evakuaciju velikih voda.

Procena eroziona dubine u suženjima je zasnovana na empirijskim istraživanjima. Ovde se razmatraju samo zavisnosti koje su implementirane u softverskom okruženju HEC-RAS [250]. Polazi se od fizike erozionog procesa, koji se može odvijati u uslovima „čiste vode” ili „opšte pokretnog dna”. U prvom slučaju se radi o eroziji korita u suženju bez priliva nanosa sa uzvodne deonice (ili kada je taj priliv manji od transportnog kapaciteta u suženju).

U drugom slučaju, lokalna erozija u suženju se odvija pri intenzivnom transportu nanosa duž cele razmatrane deonice, uključujući suženje. Kriterijum za režim lokalne erozije zasnovan je na poređenju srednje profilske brzine ispred suženja (V_1) i kritične brzine za pokretanje srednjeg zrna nanosa (V_c) [19, 250]:

$$V_c = 6,19 h_1^{1/6} d_{50}^{1/3}, \quad (4.11)$$

gde je h_1 – dubina ispred suženja, a d_{50} – srednji prečnik zrna. Ako je $V_1 < V_c$, radi se o eroziji u čistoj vodi, a ako je $V_1 \geq V_c$, o eroziji pri opšte pokretnom dnu.

Označavajući profil ispred suženja indeksom „1”, a suženje indeksom „2”, povećana dubina u suženju usled erozije biće [250]:

$$h_2 = h_o + h_{se} = \begin{cases} \left[\frac{Q_2^2}{40 (1,25 d_{50})^{2/3} B_2^2} \right]^{3/7} & \text{- bez priliva nanosa} \\ h_1 (Q_2/Q_1)^{6/7} (B_1/B_2)^{k_n} & \text{- uz pronos nanosa} \end{cases} \quad (4.12)$$

gde je: h_o – dubina u suženju pre erozije, h_{se} – eroziona dubina, dok su u suženju: h_2 , Q_2 i B_2 – dubina, protok i širina korita. Vrednost eksponenta k_n zavisi od režima transporta nanosa (Tabela 4.7).

Tabela 4.7: Vrednosti empirijskog koeficijenta k_n u izrazu (4.12) [250].

Režim kretanja nanosa	V_*/W	k_n
Dominira vučni nanos	$< 0,5$	0,59
Vučeni+suspendovani nanos	$0,5 \div 2,0$	0,64
Dominira suspendovani nanos	$> 2,0$	0,69

$V_* = (g h_1 I_e)^{1/2}$ – smičuća brzina ispred suženja;

$W = W(d_{50})$ – brzina tonjenja srednjeg zrna.

Treba napomenuti da se u složenom mostovskom profilu proračun obavlja posebno za osnovno korito i za inundacije.

■ **Primer 4.5.** U pravougaonom rečnom koritu sa prosečnim uzdužnim nagibom dna $I_d = 0,2\%$, nalazi se suženje širine $B_2 = 110$ m. Srednja krupnoća materijala na dnu iznosi $d_{50} = 3$ mm, sa brzinom tonjenja $W = 0,22$ m/s.

Dubina u suženju pre erozije iznosi: $h_o = 3,5$ m. Sračunati erozionu dubinu u suženju pri protoku $Q_1 = Q_2 = 500$ m³/s, ako su dati sledeći podaci za profil uzvodno od suženja: (a) $B_1 = 160$ m; $h_1 = 3,65$ m i (b) $B_1 = 120$ m; $h_1 = 3,75$ m.

Rešenje. Primenom izraza (4.11) i (4.12) dobijaju se sledeći rezultati:

(a) Stepen suženja: $B_1/B_2 = 160/110 = 1,45$

$V_1 = Q_1/(B_1 h_1) = 500/160/3,65 = 0,85$ m/s;

$V_c = 1,11$ m/s; $V_1 < V_c \dots$ erozija bez priliva nanosa („u čistoj vodi”);

$h_2 = 3,73$ m; $h_{se} = h_2 - h_o = 3,73 - 3,50 = 0,23$ m; $V_2 = 1,22$ m/s;

Povećanje brzine u suženju: $(V_2 - V_1)/V_1 = (1,22 - 0,85)/0,85 = 0,435 = 43,5\%$.

(b) Stepen suženja: $B_1/B_2 = 120/110 = 1,09$

$V_1 = Q_1/(B_1 h_1) = 500/120/3,75 = 1,11$ m/s;

$V_c = 1,11$ m/s $\approx V_1 \dots$ erozija uz pronos nanosa (pri „opšte pokrentom dnu”);

Ako se pretpostavi da se uzdužni nagib dna ne menja:

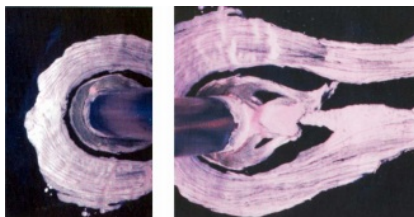
$V_* = (9,81 \cdot 3,75 \cdot 0,002)^{1/2} = 0,27$ m/s; $V_*/W = 1,23$; $k_n = 0,64$;

$h_2 = 3,96$ m; $h_{se} = 0,46$ m; $V_2 = 1,15$ m/s;

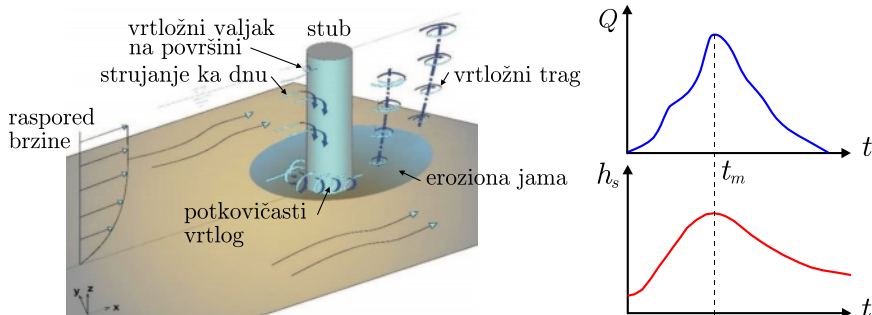
Povećanje brzine u suženju: $(1,15 - 1,11)/1,11 = 0,036 = 3,6\%$.

Mostovski stubovi. Eroziya korita oko mostovskih stubova nastaje usled povećane lokalne brzine i tangencijalnog napona duž čvrste konture, kao i dejstva vrtložnog sistema prikazanog na Slikama 4.46 i 4.47. Za formiranje erozione jame potrebno je da lokalni transportni kapacitet za odnošenje materijala sa dna bude veći od priliva nanosa sa uzvodne deonice. Sve dok je brzina toka V manja od „kritične brzine” za pokretanja *svih* zrna na dnu V_c : $V < V_c$, odvija se „erozija u čistoj vodi”, a kada je $V \geq V_c$, „erozija pri opšte pokretnom dnu”. U ovom drugom slučaju, konačna (terminalna) dubina erozione jame uspostavlja se pri ravnotežnom stanju – kada se izjednači lokalni transportni kapacitet toka koji odvlači nanos iz erozione jame sa količinom nanosa koji u nju pristiže.

Izučavanje lokalne erozije se obavlja eksperimentalno pomoću fizičkih modela. Ispituju se razni uticaji, kao što su: granulometrijski sastav nanosa na dnu, oblik stuba, uticaj nanosnih formacija, nagomilavanje naplava oko stubova i dr. (Slika 4.48).



Slika 4.46: Strujnice potkovičastog vrtloga uzvodno od cilindričnog stuba (levo) i nizvodno od stuba (desno); snimak je načinjen u laboratorijskom kanalu pomoću obojenih čestica ($Re = 60000$) [172].



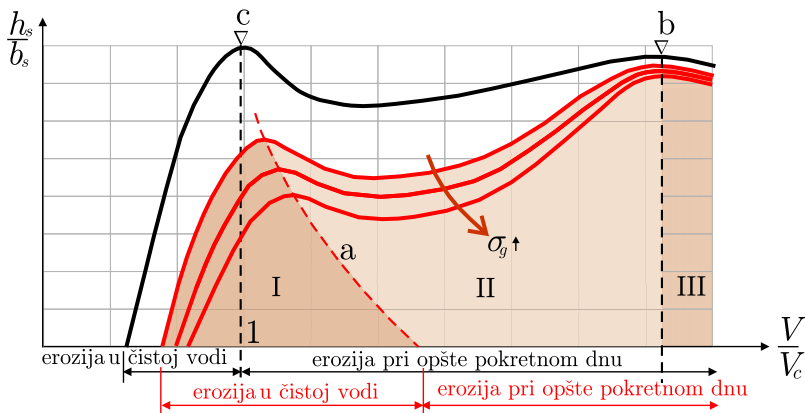
Slika 4.47: Evolucija eroziona jame oko mostovskog stuba; levo: vrtložna struktura kao uzrok lokalne erozije [91]; desno: dinamika formiranja eroziona jame; u fazi nadolaska talasa, eroziona dubina iza stuba h_s brzo raste do svog maksimuma u vreme vršnog protoka t_m , dok se u recesionoj fazi eroziona jama polako puni zbog smanjenja protoka vode i pronosa nanosa.

Evolucija eroziona jame zavisi i od prisustva pokretnih nanosnih formacija. Brzina kretanja dina ili antidina je mnogo manja od brzine formiranja eroziona jame. Čak i u uslovima ustaljenog tečenja, dubina eroziona jame osciluje u skladu sa pomeranjem dina ili antidina. Kada vrh dine ili antidine dospe do eroziona jame, eroziona jama se privremeno zatrpava, a eroziona dubina smanjuje. Obrnuto, kada dolja dine ili antidine dospe do eroziona jame – eroziona dubina se privremeno povećava. Prosečna dubina eroziona jame predstavlja ravnotežnu dubinu lokalne deformacije (KI-12.3.1-Sl:12.16).

Sintezni dijagram uticaja granulometrijskog sastava, prikazan je na Slici 4.49. Nanos se može smatrati da je uniformnog sastava ako je geometrijska standardna devijacija krupnoće (KI-8.2.2.1-(8.28)) $\sigma_g \leq 1,3$; u protivnom je neuniformnog sastava [167]. Prema [54] nanosi sa $\sigma_g < 1,5$ u procesu erozije dna nemaju tendenciju segregacije i formiranja „armirajućeg sloja” (KI-9.2.5, Slika 4.48).



Slika 4.48: Laboratorijska ispitivanja lokalne erozije oko mostovskih stubova; sleva na desno: veličina i oblik eroziona jame oko cilindričnog stuba, armirajući sloj oko stuba, uticaj naplava (granja i balvana) na potkopavanje mostovskog stuba [47, 277].



Slika 4.49: Relativna dubina eroziona jame u zavisnosti od relativne brzine toka; linije crne boje: nanos uniformnog sastava; c – erozioni prag u „čistoj vodi” ($V/V_c = 1$) definiše maksimalnu dubinu eroziona jame, posle koje nastaje erozija „pri opšte pokretnom dnu”, sa promenljivom erozionom dubinom koja kulminira u tački b; linije crvene boje: nanos neuniformnog sastava; a – erozioni prag pri formiranju armirajućeg sloja ($V/V_a = 1$); b – erozioni prag pri opšte pokretnom dnu (ne zavisi od σ_g) i odgovara ravnom dnu, na prelasku iz mirnog režima u burni režim tečenja; ostale oznake: I – oblast formiranja armirajućeg sloja; II – oblast razgradnje armirajućeg sloja; III – oblast opšte pokretnog dna – sva zrna u pokretu. (Prema [167]).

Kao kod suženja, erozija u čistoj vodi se dešava sve dok brzina toka V ne dostigne „erozioni prag” – kritičnu brzinu pokretanja svih zrna: $V/V_c \leq 1$, posle čega se odvija u uslovima opšte pokretnog dna. Uslovi za eroziju u čistoj vodi su tipični za inundacije, gde vegetacija sprečava (ili u velikoj meri ometa) transport nanosa.

Kod nanosa neuniformnog sastava ($\sigma_g > 1,3$), postoji mogućnost formiranja armirajućeg sloja, pa je merodavan parametar V/V_a , gde je V_a – brzina pri kojoj je armirajući sloj najveći (Slika 4.49). Eksperimenti pokazuju da je: $V_a \approx 0,8 V_{ca}$, gde je V_{ca} – srednja profilska brzina iznad koje održivost armirajućeg sloja više nije moguća.

Metode proračuna. Početni korak u izvođenju svih empirijskih izraza je dimenziona analiza, sa formiranjem bezdimenzionih brojeva koji obuhvataju sve veličine od značaja za razmatrani fizički proces. Eksperimentalno utvrđena veza između tih brojeva predstavlja obrazac koji opisuje datu pojavu. Kada su u pitanju mostovski stubovi, postupak formiranja bezdimenzionih brojeva je objašnjen u prvoj knjizi (KI-12.3.1) i ovde se neće ponavljati.

U Tabeli 4.8 dati su, u svetu često korišćeni, empirijski izrazi za lokalnu eroziju oko prizmatičnih stubova.

Tabela 4.8: *Empirijski izrazi za prizmatične stubove* [117, 133, 250].

CSU, HEC-RAS (Richardson, 1990, 1995):

$$\frac{h_{se}}{h_1} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b_s}{h_1} \right)^{0,65} Fr_1^{0,43} \quad (4.13)$$

FHWA, HEC-RAS (Froehlich, 1996):

$$\frac{h_{se}}{h_1} = 0,32 K_1 \left(\frac{b_s}{h_1} \right)^{0,62} \left(\frac{h_1}{d_{50}} \right)^{0,09} Fr_1^{0,22} \quad (4.14)$$

U navedenim izrazima figurišu sledeće veličine: h_{se} – terminalna eroziona dubina (u ravnotežnom stanju transporta nanosa), h_1 – srednja dubina vode u neporemećenom strujnom polju uzvodno od stuba, b_s – širina stuba (upravno na pravac toka), $Fr_1 = V_1/\sqrt{g h_1}$ – Frudov broj, V_1 – srednja profilska brzina toka, $K_1 \div K_4$ – empirijski koeficijenti, d_{50} – srednji prečnik materijala na dnu, g – gravitaciono ubrzanje. Obrasci važe bez obzira da li je erozija u čistoj vodi ili pri opšte pokretnom dnu.

Koeficijentima K obuhvaćeni su sledeći uticaji:

- (1) oblika horizontalnog preseka stuba: $K_1 = 0,9 \div 1,1$ (videti Sliku 4.52);
- (2) zakošenosti stuba u odnosu na tok:

$$K_2 = \left(\cos \varphi + \frac{L_s}{b_s} \sin \varphi \right)^{0,65} \quad (4.15)$$

gde je: L_s – dužina stuba, b_s – širina stuba, $\varphi = 0^\circ \div 90^\circ$ – ugao između duže ose stuba i osovine toka („napadni ugao”, videti Tabelu 4.11);

- (3) stanja rečnog korita: $K_3 = 1,1$ - erozija u čistoj vodi, ravno dno, male dine, antidine; $1,2$ - srednje velike dine; $1,3$ - velike dine;
- (4) armiranja eroziona jame ($d_{50} \geq 2$ mm i $d_{95} \geq 20$ mm):

$$K_4 = 0,4 V_r^{0,15} \quad (\text{najmanja vrednost } K_4 = 0,4) \quad (4.16)$$

gde je:

$$V_r = \frac{V - V_{a50}}{V_{c50} - V_{c95}} \quad \text{- relativna brzina;} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} V_{c50} &= 6,19 h_1^{1/6} d_{50}^{1/3} && \text{- kritična brzina za pokretanje zrna } d_{50} \\ V_{c95} &= 6,19 h_1^{1/6} d_{95}^{1/3} && \text{- kritična brzina za pokretanje zrna } d_{95} \\ V_{a50} &= 0,645 (d_{50}/b_s)^{0,053} V_{c50} && \text{- brzina za razgradnju arm. sloja, } d_{50} \\ V_{a95} &= 0,645 (d_{95}/b_s)^{0,053} V_{c95} && \text{- brzina za razgradnju arm. sloja, } d_{95} \end{aligned} \quad (4.18)$$

U slučaju veoma širokih stubova u plitkoj vodi, u obrascu (4.13) se može uvesti dodatni koeficijent:

$$K_5 = \begin{cases} 2,58 (h_1/b_s)^{0,34} Fr_1^{0,65} & \text{za } V_1/V_c < 1 \\ (h_1/b_s)^{0,13} Fr_1^{0,25} & \text{za } V_1/V_c \geq 1. \end{cases} \quad (4.19)$$

Napominje se da faktor 2 u obrascu CSU (4.13) ima ulogu koeficijenta sigurnosti. Interesantno je da se ovaj obrazac može primeniti za procenu dubine erozije u čistoj vodi i za cilindrične stubove poređane u nizu duž toka, pri čemu treba staviti da je proizvod svih K koeficijenata jednak 1,0 (KI-12.3.1-(12.38)).

Za proračun erozije pri opšte pokretnom dnu, za cilindrične stubove prečnika D u koritu širine B može se koristiti neki od izraza datih u Tabeli 4.9.

Tabela 4.9: *Empirijski izrazi za cilindrične stubove* [148, 159, 155].

Kothyari et al. (1992):

$$\frac{h_{se}}{D} = 0,88 \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{0,67} \left(\frac{h}{d_{50}}\right)^{0,4} \left[\frac{B-D}{B}\right]^{-0,3} \quad (4.20)$$

Lee, Sturm (2009):

$$\frac{h_{se}}{D} = \begin{cases} 5 \log\left(\frac{D}{d_{50}}\right) - 4 & \text{za } 6 \leq \frac{D}{d_{50}} \leq 25 \\ \frac{1,8}{((0,02 D - 0,2)/d_{50})^2 + 1} + 1,3 & \text{za } 25 < \frac{D}{d_{50}} \leq 10^4 \end{cases} \quad (4.21)$$

Lança et al. (2013):

$$\frac{h_{se}}{D} = \begin{cases} 7,3 \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{-0,29} \left(\frac{h}{D}\right)^{0,12} & \text{za } 60 \leq \frac{D}{d_{50}} \leq 500 \\ 1,2 \left(\frac{h}{D}\right)^{0,12} & \text{za } \frac{D}{d_{50}} > 500 \end{cases} \quad (4.22)$$

Za brzu procenu, može se smatrati da je terminalna dubina erozije jame približno jednaka dvostrukoj vrednosti širine stuba, odnosno prečnika cilindričnog stuba (KI-12.3.1-Sl:12.17).

■ **Primer 4.6.** Odrediti terminalnu dubinu erozije oko stuba dimenzija $L_s \times b_s = 6 \times 1,6$ m, koji se nalazi pod napadnim uglom $\varphi = 15^\circ$, ako su dati sledeći podaci: brzina toka i dubina uzvodno od mosta $V_1 = 1,8$ m/s, $h_1 = 3$ m, krupnoće zrna $d_{50} = 8$ mm, $d_{95} = 50$ mm, konfiguracija dna: male dine.

Rešenje. Primenom izraza (4.13)-(4.19) dolazi se do ovih rezultata:

$$Fr_1 = 1,8 / (9,81 \cdot 3,0)^{1/2} = 0,33;$$

$$V_{c50} = 6,19 \cdot 3,0^{1/6} \cdot 0,008^{1/3} = 1,49 \text{ m/s} < V_1 \dots \text{ opšte pokretno dno};$$

$$V_{c95} = 6,19 \cdot 3,0^{1/6} \cdot 0,050^{1/3} = 2,74 \text{ m/s};$$

$$V_{a50} = 0,645 \cdot 1,49 (0,008/1,5)^{0,053} = 0,73 \text{ m/s};$$

$$V_{a95} = 0,645 \cdot 2,74 (0,050/1,5)^{0,053} = 1,47 \text{ m/s};$$

$$V_r = (1,8 - 0,73) / (1,49 - 1,47) = 91,65; K_4 = 0,4 \cdot 91,65^{0,15} = 0,79.$$

Ostali koeficijenti: $K_1 = 1,1$; $K_2(\varphi = 15^\circ, L_s/b_s = 4) = 1,57$; $K_3 = 1,1$. (K_5 se ne uzima u obzir jer se ne radi o širokom stubu u plitkoj vodi.)

$$h_{se} = (2 \cdot 1,1 \cdot 1,57 \cdot 1,1 \cdot 0,79 \cdot 0,66^{0,65} \cdot 0,33^{0,43})^3 = 3,69 \text{ m}.$$

Mostovski oporci. Uzroci propadanja mostovskih oporaca⁸ mogu biti: (i) prelivanje oporca i/ili prilazne konstrukcije; (ii) bočna migracija korita ili njegovo širenje; (iii) velika brzina u mostovskom suženju i lokalna erozija. Moguća je i kombinacija navedenih uzroka, naročito u periodima velikih voda. Čak i kada su oporci u inundacijama udaljeni od glavnog korita, u podnožju oporaca se mogu javiti velike proloke (Slika 4.50). Najnepovoljniji slučaj je kada oporci u osnovnom koritu remete evakuaciju velikih voda i indukuju potkovičaste vrtložne sisteme (kao kod stubova) sa pratećim prolukama.

Metode proračuna. Opstrujavanje mostovskih oporaca eksperimentalno se izučavaju (Slika 4.50) i postoji mnoštvo empirijskih izraza za lokalnu eroziju (Tabela 4.10). (Alternativa je primena numeričkih 2D/3D modela.)



Slika 4.50: Mostovski oporci; s leva na desno: skica erozije oko oporca u inundaciji; oporci u glavnom koritu [154]; fizički model vertikalnog oporca [58].

U izrazu (4.23) konstanta C_A ima vrednosti: 2,15 ako su stranice oporca vertikalne, a 1,1, ako su zakošene. U izrazu (4.24), koji se može koristiti i za eroziju u čistoj

⁸U skladu sa našom praksom, u ovoj knjizi se koristi termin „mostovski oporac” (od nemačkog *Widerlager*) iako je možda ispravnije koristiti termin „obalni stub” ili „obalni oslonac”.

Tabela 4.10: Empirijski izrazi za oporce [117, 133, 250].

Liu (1961), Richardson (1975):

$$\frac{h_{se}}{h_1} = \begin{cases} C_A \left(\frac{L_e}{h_1} \right)^{2/5} Fr_1^{1/3} & \text{za } \frac{L_e}{h_1} < 25 \\ 4 Fr_1^{1/3} & \text{za } \frac{L_e}{h_1} \geq 25 \end{cases} \quad (4.23)$$

CSU, HEC-RAS (Richardson, 1995):

$$\frac{h_{se}}{h_1} = 4 (K_1/0,55) K_2 Fr_1^{1/3} \quad (4.24)$$

vodi, koeficijent K_1 ima vrednosti: 1,0 za vertikalni zid, 0,82 za vertikalni zid sa krilima i 0,55 za „protočni” oporac [250] (videti i podatke na Slici 4.52).

Koeficijent K_2 se odnosi na zakošenost osovine mosta u odnosu na rečni tok: $K_2 = (\varphi/90)^{0,13}$, pri čemu je $\varphi < 90^\circ$ za *nizvodno* usmeren oporac, $\varphi > 90^\circ$ za *uzvodno* usmeren oporac i $\varphi = 90^\circ$ za oporac upravan na rečni tok (videti i podatke iz Tabele 4.11).

Pri određivanju *projektne* dubine fundiranja oporaca, mora se uzeti u obzir kumulativna deformacija korita, tako što se najpre sračuna opšta deformacija, a zatim lokalni uticaji – suženje i lokalna erozija oko stuba/oporca.

Kada se koristi linijski (1D) model strujanja, tačniji rezultati se dobijaju kada se rečno korito podeli na segmente (KI-6.4-Sl:6.7), pa se lokalna erozija računa na osnovu srednje brzine i dubine segmenta naspram mostovskog stuba, odnosno oporca. Referentna dubina se usvaja na osnovu najnovijih ehograma, ili statističkom analizom višegodišnjih snimanja (ako postoje).

Integralni model. Model Melvila (Melville) objedinjuje proračun lokalne erozije oko mostovskih stubova i oko oporaca (obalskih oslonaca) [19, 167, 168, 169]. Kao i drugi modeli lokalne erozije, empirijskog je karaktera i inkorporira rezultate mnogih istraživača. Primenjuje se za mostovske stubove i oporce u glavnom koritu i inundaciji. Sastoji se od tri računске komponente: I – karakteristične brzine; II – uticajni „ K ” faktori; III – ravnotežna dubina eroziona jame.

I – Karakteristične brzine

Pored srednje profilske brzine toka, merodavna je i kritična brzina za pokretanje nanosa. U zavisnosti od granulometrijskog sastava, kritična brzina se definiše na različite načine. Kod nanosa skoro uniformnog sastava merodavan je srednji prečni zrna d_{50} , a kod neuniformnog sastava, gde se može očekivati formiranje armirajućeg sloja, koristi se srednji prečnik zrna u armirajućem sloju: $d_{50a} = d_{\max}/1,8$, gde je d_{\max} – najkрупnije zrno sa granulometrijske krive [168].

Kritična smičuća brzina pokretanja zrna krupnoće d može se odrediti pomoću empirijskih izraza:

$$u_{*c} = \begin{cases} 0,0115 + 0,0125 d^{1,4} & \text{za } 0,1 \text{ mm} < d \leq 1 \text{ mm} \\ 0,0305\sqrt{d} - 0,0065/d & \text{za } 1 \text{ mm} < d < 100 \text{ mm}, \end{cases} \quad (4.25)$$

u kojima se prečnik zrna $d \equiv d_{50}$ ili $d \equiv d_{50a}$ unosi u mm, da bi se brzina u_{*c} , odnosno u_{*ca} , dobila u m/s.

Podsetimo se da se kritična brzina pokretanja zrna alternativno može dobiti pomoću Šildsovog dijagrama, odnosno izraza: $u_{*c} = \sqrt{\Theta_c g \Delta d_{50}}$ (KI-9.2.2-(9.16)), ako se usvoje vrednosti kritičnog Šildsovog broja $\Theta_c = 0,047$ ili $0,056$ i relativne gustine $\Delta = 1,65$ (KI-8.2.1.1-(8.2)).

Kritične brzine za pokretanje svih zrna (opšte pokretno dno) su⁹:

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5,75 \log \left(5,53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad - \text{uniformna granulometrija} \quad (4.26)$$

$$\frac{V_{ca}}{u_{*ca}} = 5,75 \log \left(5,53 \frac{h}{d_{50a}} \right) \quad - \text{armirajući sloj.} \quad (4.27)$$

Da bi se erozioni prag armirajućeg sloja kod *neuniformnog* nanosa ($\sigma_g > 1,3$) doveo u vezu sa erozionim pragom uniformnog nanosa, koristi se parametar koji u sebi objedinjuje uticaj brzine i granulometrijskog sastava:

$$A = \frac{V - (V_c - V_a)}{V_c}. \quad (4.28)$$

(Kod uniformnog nanosa je: $V_a \equiv V_c$, pa je: $A = V/V_c$).

II – Uticajni faktori

(1) Faktor dubine K_h (uticaj veličine stuba/oporca u odnosu na dubinu toka h)

$$\text{stubovi: } K_h = \begin{cases} 2,4 b_s & \text{za } b_s/h \leq 0,7 \\ 2\sqrt{h b_s} & \text{za } 0,7 < b_s/h \leq 5 \\ 4,5 h & \text{za } b_s/h > 5 \end{cases} \quad (4.29)$$

$$\text{oporci: } K_h = \begin{cases} 2 L_e & \text{za } L_e/h \leq 1 \\ 2\sqrt{h L_e} & \text{za } 1 < L_e/h \leq 25 \\ 10 h & \text{za } L_e/h > 25, \end{cases} \quad (4.30)$$

gde je L_e – dužina oporca *upravno* na pravac toka.

⁹Izrazi predstavljaju jednu varijantu logaritamskog rasporeda brzine po vertikali (KI-2.9-(2.44), 9.2.4-(9.51)), uz pretpostavku da je $u = V$.

Kod cilindričnih stubova, u izrazu (4.29) se, umesto širine stuba (b_s), koristi prečnik stuba (D). Eksperimentalno su utvrđeni i izrazi za tzv. „ekvivalentni prečnik” cilindričnog stuba, koji se uvodi da bi se obuhvatili uticaji dela temelja koji se našao iznad postojećeg dna, kao i naplava nagomilanog na površini vode oko stubova (Slika 4.51):

$$D_e = D \left(\frac{h - Z}{h + D^*} \right) + D^* \left(\frac{D^* + Z}{D^* + h} \right) - \text{temelj} \quad (4.31)$$

$$D_e = [0,52 T_d D_d + (h - 0,52 T_d) D] / h - \text{naplav.} \quad (4.32)$$

Izrazi (4.31)-(4.32) mogu se koristiti i za stubove paralelepipednog oblika ako se stavi: $D = b_s$.



Slika 4.51: Ekvivalentni prečnik stuba i snimak naplava oko stuba mosta na Velikoj Moravi kod Markovca.

(2) Faktor brzine K_v (uticaj intenziteta brzine na erozionu dubinu)

- nanos uniformnog sastava ($\sigma_g \leq 1,3$):

$$K_v = \begin{cases} V/V_c & \text{za } V/V_c < 1 \\ 1 & \text{za } V/V_c \geq 1 \end{cases} \quad (4.33)$$

-nanos neuniformnog sastava ($\sigma_g > 1,3$):

$$K_v = \begin{cases} A \equiv \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} & \text{za } A < 1 \\ 1 & \text{za } A \geq 1 \end{cases} \quad (4.34)$$

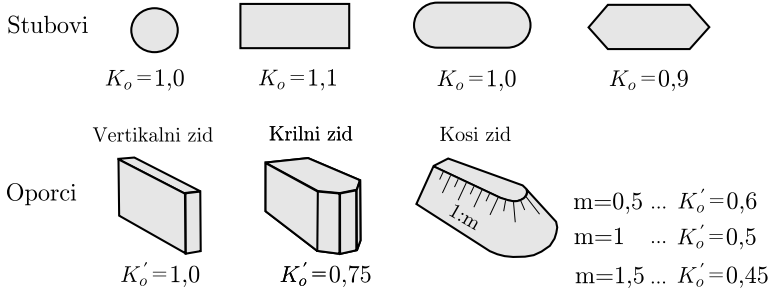
(3) Faktor krupoće zrna K_d (uticaj granulometrijskog sastava):

$$K_d = \begin{cases} 1,57 \log \left(2,24 \frac{L}{d} \right) & \text{za } L/d \leq 25 \\ 1 & \text{za } L/d > 25, \end{cases} \quad (4.35)$$

gde je: $L \equiv b_s$ (ili D , D_e) – stubovi, $L \equiv L_e$ – oporci, $d \equiv d_{50}$ – nanos uniformnog sastava, $d \equiv d_{50a}$ – nanos neuniformnog sastava.

(4) Faktor oblika K_o (uticaj oblika stuba/oporca)

Empirijske vrednosti faktora K_o navedene su na Slici 4.52. Za mostovske oporce,



Slika 4.52: Vrednosti koeficijenta oblika stubova i oporca, prema [168].

navedene vrednosti faktora oblika su naknadno korigovane u zavisnosti od odnosa dužine oporca (L_e) i dubine (h) [168]:

$$K_o = \begin{cases} K'_o & \text{za } L_e/h \leq 10 \\ K'_o + 0,667(1 - K'_o)(0,1 L_e/h - 1) & \text{za } 10 < L_e/h \leq 25 \\ 1 & \text{za } L_e/h > 25. \end{cases} \quad (4.36)$$

(5) Faktor položaja K_φ (uticaj zakošenja stuba/oporca u odnosu na tok)

Vrednosti ovog parametra date su u Tabeli 4.11. Naknadnim istraživanjima, ustanovljeno je da vrednosti iz ove tabele treba korigovati na sledeći način:

$$K_\varphi = \begin{cases} K'_\varphi & \text{za } L/h \geq 3 \\ K'_\varphi + (1 - K'_\varphi)(1,5 - 0,5 L/h) & \text{za } 1 < L/h < 3 \\ 1,0 & \text{za } L/h \leq 1, \end{cases} \quad (4.37)$$

gde je za stubove: $L \equiv L_s$, a za oporce: $L \equiv L_e$. Kod cilindričnih stubova napadni ugao nema uticaja, pa je uvek: $K_\varphi = 1,0$. Kod oporca, napadni ugao $\varphi < 90^\circ$ znači da je oporac *nizvodno* usmeren (i obrnuto, kada je oporac *uzvodno* usmeren, $\varphi > 90^\circ$).

Tabela 4.11: Vrednosti faktora položaja K'_φ u zavisnosti od napadnog ugla φ [168].

Objekat		φ (°)							
		0	15	30	45	60	90	120	150
Stubovi	$L_s/b_s=4$	1,0	1,5	2,0	2,3	-	2,5	-	-
	8	1,0	2,0	2,75	3,3	-	3,9	-	-
	12	1,0	2,5	3,5	4,3	-	5,0	-	-
Oporci		-	-	0,9	-	0,97	1,0	1,06	1,08

Poseban slučaj predstavljaju temelji na ogoljenim šipovima oko kojih teče voda; eksperimentalno su utvrđene vrednosti kombinacije faktora $K_o K_\varphi$ za šipove u nizu, u jednom ili dva reda Tabela 4.12. (Razne konfiguracije šipova kod mostovskih stubova razmatraju se detaljno u publikaciji [20].)

Tabela 4.12: Vrednosti kombinacije faktora $K_o K_\varphi$ u zavisnosti od prečnika šipova D , njihovog razmaka s i ugla zakošenosti temelja u odnosu na rečni tok [168].

Broj redova šipova	s/D	φ (°)		
		5	5÷45	90
1	2	1,12	1,40	1,20
	4	1,12	1,20	1,10
	6	1,07	1,16	1,08
	8	1,04	1,12	1,02
	10	1,00	1,00	1,00
2	2	1,50	1,80	-
	4	1,35	1,50	-

(6) Faktor geometrije korita K_g (prilazne deonice)

U slučaju kada mostovska prilazna konstrukcija preseca inundaciju i završava se oporcem u glavnom rečnom koritu, uvodi se faktor K_g prema sledećoj formuli.

$$K_g = \sqrt{1 - (L_i/L_e) [1 - (h_i/h)^{5/3} (n/n_i)]}, \quad (4.38)$$

gde je: L_i – širina inundacije, L_e – dužina oporca koji delimično ulazi u glavno korito, h_i i h – dubina u inundaciji i glavnom koritu, n_i i n – Manningov koeficijent u inundaciji i glavnom koritu. (Za stubove je $K_g=1$).

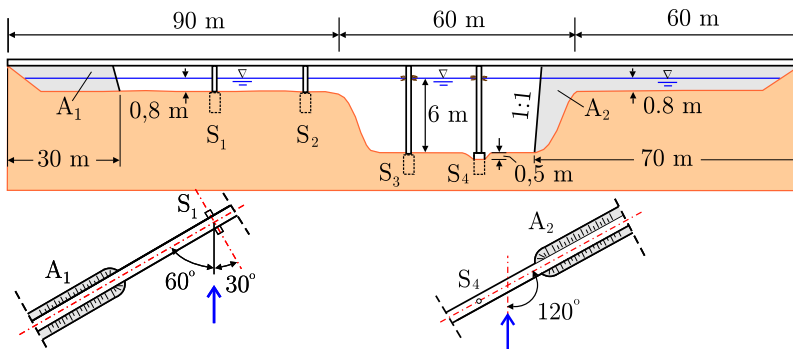
III – Ravnotežna eroziona dubina

Sumiranjem vrednosti svih uticajnih faktora, dobija se najveća, tzv. „ravnotežna eroziona dubina” oko mostovskih stubova i oporaca, kojoj odgovara *ravnotežno stanje* korita (KI-12.3.1-2):

$$h_{se} = K_h K_v K_d K_o K_\varphi K_g \quad (4.39)$$

Uočiti da samo faktor K_h ima dimenziju dužine, a da su svi ostali faktori bez dimenzija. Faktor K_h primarno određuje dubinu erozije jame, dok ostali faktori imaju korektivni karakter. Takođe treba napomenuti da opisani pristup ima neka ograničenja: (i) ne daje vremensku sliku erozionog procesa, što znači da ne može predvideti erozionu dubinu manju od ravnotežne – dubinu koja bi se ostvarila kada je trajanje velike vode kraće od vremena potrebnog za dostizanje ravnotežnog stanja i (ii) nije primenljiv kada mostovski otvor izaziva značajno suženje korita.

■ **Primer 4.7.** Na Slici 4.53 prikazan je most sa dva stuba u obliku kvadra u inundaciji (S1, S2), dva cilindrična stuba u rečnom koritu (S3, S4) i oporcima u vidu kosog zida (A₁, A₂). Dimenzije stubova S1 i S2 su: $b_s/L_s = 2 \text{ m}/8 \text{ m}$, a stubova S3 i S4: $D = 2 \text{ m}$. Prečnik temelja cilindričnih stubova je: $D_* = 3 \text{ m}$, pri čemu je temelj stuba S4 ogoljen za $Z = 0,5 \text{ m}$. Oko stubova S3 i S4 je nagomilan naplav dimenzija $D_d \times T_d = 2 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$. Prilazna konstrukcija sa oporcima ima nagib $m = 1$. Ostali podaci vezani za položaj stubova i oporaca dati su na Slici 4.53 i u Tabeli 4.13. Odrediti ravnotežnu erozionu dubinu za stubove i oporce.



Slika 4.53: Skica mosta u primeru 4.7.

Tabela 4.13: Ulazni podaci u primeru 4.7.

Delovi korita	h (m)	V (m/s)	d_{50} (mm)	d_{max} (mm)	σ_g (-)	n $\text{m}^{-1/3}/\text{s}$
glavno korito	6,0	3,4	20	120	3,24	0,025
inundacije	0,8	0,6	7	40	1,15	0,044

Rešenje. Najpre se pomoću izraza (4.25)-(4.28) računaju karakteristične brzine.

Glavno korito: $\sigma_g = 3,24 > 1,3 \dots$ nanos je neuniformnog sastava (armiranje)

$$d_{50} = 20 \text{ mm} = 0,020 \text{ m};$$

$$u_{*c} = 0,0305 \sqrt{20} - 0,0065/20 = 0,136 \text{ m/s};$$

$$u_{*c} = (0,056 \cdot 9,81 \cdot 1,65 \cdot 0,020)^{1/2} = 0,135 \text{ m/s (Šilds)};$$

$$V_c = 0,136 [5,75 \log(5,53 \cdot 6/0,02)] = 2,52 \text{ m/s};$$

$$d_{50a} = d_{max}/1,8 = 66,67 \text{ mm} = 0,067 \text{ m};$$

$$u_{*ca} = 0,0305 \sqrt{66,67} - 0,0065/66,67 = 0,249 \text{ m/s};$$

$$V_{ca} = 0,249 [5,75 \log(5,53 \cdot 6/0,067)] = 3,86 \text{ m/s};$$

$$V_a = 0,8 V_{ca} = 3,09 \text{ m/s}.$$

$$A = [3,4 - (3,09 - 2,52)]/2,52 = 1,12 > 1 - \text{erodija pri opšte pokretnom dnu}.$$

Inundacije: $\sigma_g = 1,15 < 1,3 \dots$ nanos je uniformnog sastava

$$d_{50} = 7 \text{ mm} = 0,007 \text{ m};$$

$$u_{*c} = 0,0305 \sqrt{7} - 0,0065/7 = 0,08 \text{ m/s};$$

$$u_{*c} = (0,056 \cdot 9,81 \cdot 1,65 \cdot 0,007)^{1/2} = 0,08 \text{ m/s (Šilds)};$$

$$V_c = 0,08 [5,75 \log(5,53 \cdot 0,8/0,007)] = 1,29 \text{ m/s};$$

$$V/V_c = 0,6/1,29 = 0,467 < 1 - \text{erodija u čistoj vodi.}$$

Za proračun uticajnih K -faktora potrebno je odrediti ulazne veličine:

$$\text{Oporac } A_1: L_e/h = 30/0,8 = 37,5; L_e/d_{50} = 30/0,007 = 4286;$$

$$\text{Stubovi } S_1 \text{ i } S_2: b_s/h = 2/0,8 = 2,5; b_s/d_{50} = 2/0,007 = 286;$$

$$\text{Stub } S_3: D_e = [0,52 \cdot 3 \cdot 0,5 + (6 - 0,52 \cdot 0,5) 2]/6 = 2,04 \text{ m - naplav (4.32);}$$

$$D_e/h = 2,04/6 = 0,34; D_e/d_{50a} = 2,04/0,067 = 30,4;$$

$$\text{Stub } S_4: D_e = 2,04 \text{ m - naplav (4.32);}$$

$$D_e = 2(6 - 0,5)/(6 + 3) + 3(3 + 0,5)/(3 + 6) = 2,39 \text{ m - temelj (4.31);}$$

$$\text{usvojeno } D_e = 2,39 \text{ m; } D_e/h = 2,39/6 = 0,4; D_e/d_{50a} = 2,39/0,067 = 36.$$

Sa ovim podacima, iz empirijskih izraza (4.29)-(4.38) proizilaze vrednosti uticajnih K -faktora. Na osnovu izraza (4.39) dolazi se konačno do ravnotežne erozione dubine za stubove i oporce razmatranog mosta. Rezultati su dati u Tabeli 4.14.

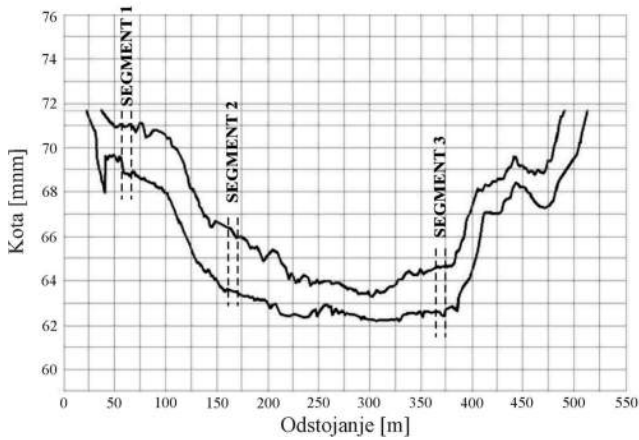
Tabela 4.14: Rezultati proračuna u primeru 4.7.

K -faktor	Oporac A_1	Stub S_1	Stub S_2	Stub S_3	Stub S_4	Oporac A_2
1- K_h (m)	8,00	2,53	2,53	4,90	5,73	8,00
2- K_v	0,467	0,467	0,467	1	1	0,467
3- K_d	1	1	1	1	1	1
4- K_o	1	1,1	1,1	1	1	1
5- K_φ	0,97	2,0	2,0	1	1	1,06
6- K_g	1	1	1	1	1	0,40
h_{se} (m)	3,6	2,6	2,6	4,9	5,7	1,6

Stohastički pristup. Kada se u hidrotehnici govori o neizvesnostima, obično se misli na nepouzdanost ulaznih podataka koji se unose u analitički model. Ta nepouzdanost je nekad uslovljena fizičkim razlozima, a nekad, ograničenjem finansijskih sredstava i vremena za prikupljanje ulaznih podataka. Problem neizvesnosti se donekle može prevazići analizom osetljivosti rezultata na ulazne podatke. Međutim, korak dalje je pristup po kome se sve promenljive veličine tretiraju kao *slučajne (stohastičke)*, sa svojstvenim raspodelama. Ako sve veličine imaju normalnu raspodelu, stohastička analiza je „prvog reda”, a ako svaka promenljiva ima raspodelu koja nije nužno normalna, analiza je „drugog reda”. Ovak pristup se može najpre primeniti za određivanje referentne kote rečnog dna u zoni mostovskog stuba, a zatim i za proračun erozione dubine oko tog stuba.

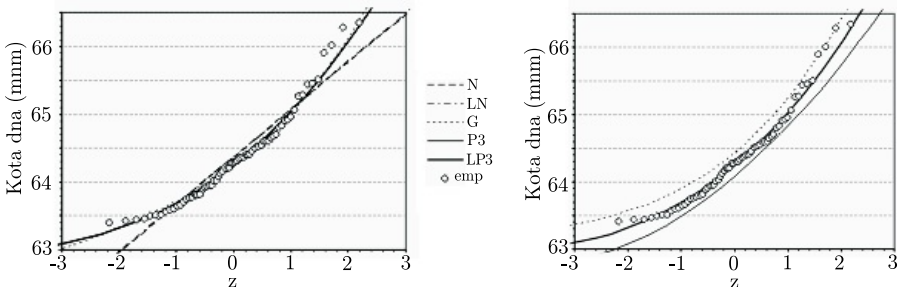
A. Referentna kota dna. Postupak se objašnjava pomoću jednog primera.

■ **Primer 4.8.** Na Slici 4.54 prikazan je poprečni presek korita reke Dunav kod Beške, sa položajem 3 mostovska stuba. Oko stubova su izdvojeni segmenti 1, 2 i 3 (širine 15 m), unutar kojih su analizirane promene kota dna, ustanovljene na osnovu ehograma snimanih tokom 20 godina (1987-2006) [124, 123]. Cilj je određivanje najniže kote dna verovatnoće 1% u segmentu br. 2.



Slika 4.54: Anvelope najviših i najnižih kota dna, unutar kojih su formirane serije podataka za statističku analizu [123].

Rešenje. Očitavanjem kota dna sa ehograma unutar segmenta br. 2, formiran je uzorak od oko 70 podataka i određena je odgovarajuća funkcija empirijske raspodele (verovatnoće) kota dna. Utvrđeno je da je u višegodišnjem periodu snimanja, 98% kota dna bilo iznad kote 63,41 mm, a da srednja kota dna (medijana) iznosi 64,3 mm. Pretpostavljajući da je uzorak homogen, ispitana je saglasnost empirijske raspodele sa teorijskim raspodelama: normalnom (N), log-normalnom (LN), Gumbelovom (G), Pirson 3 (P3) i log-Pirson 3 (LP3) [193], sa ciljem prognoze retkih ekstremnih vrednosti (Slika 4.55).



Slika 4.55: Statistička analiza kota dna: levo: saglasnost empirijske raspodele kota dna sa teorijskim raspodelama; desno: raspodela Pirson 3 sa 95%-tnim intervalom poverenja (z - standardizovana normalna promenljiva) [123].

Rezultati ocene saglasnosti empirijske raspodele i teorijskih raspodela pomoću testova Kolmogorova (D_{max}) i χ^2 [193] pokazali su da najbolju saglasnost daju raspodele Pirson 3 i log-Pirson 3. Usvojena je raspodela Pirson 3 (Slika 4.55), sa statističkim parametrima $a = 4/C_s^2 = 4,36$, $b = sC_s/2 = 0,33$ i $c = m - a \cdot b = 62,90$, gde je m - medijana, s - standardna devijacija, C_s - koeficijent asimetrije [193].

Ova raspodela omogućava prognozu ekstremno *niskih* kota dna merodavnih za proračun lokalne erozije oko stuba. Tako na primer, očekivana kota dna verovatnoće pojave 1% (povratnog perioda 100 godina) iznosi 63,23 mm, sa gornjom granicom poverenja 63,48 mm, odnosno donjom granicom, 62,97 mm¹⁰.

B. Erozijska dubina oko mostovskog stuba.

Tradicionalni pristup podrazumeva da se dubina fundiranja projektuje na osnovu dubine lokalne erozije, sračunate pomoću nekog izabranog empirijskog obrasca i uvećane shodno usvojenoj vrednosti faktora (koeficijenta) sigurnosti. Ovaj deterministički pristup daje jednoznačno rešenje koje zavisi od zadatih vrednosti hidrauličkih veličina u obrascu za lokalnu eroziju. Nedostatak je u tome što u ovom slučaju vrednost *faktora sigurnosti nije objektivni indikator rizika*¹¹, već je rezultat subjektivnog izbora projektanta, zasnovanog na rezonu da većoj vrednosti faktora sigurnosti odgovara manji stepen rizika i obrnuto.

Savremeni pristup u rešavanju ovog problema nalaže da se utvrdi *verovatnoća* potkopavanja temelja mostovskog stuba, odnosno verovatnoća da eroziona dubina premaši dubinu fundiranja. Tek kada se ta verovatnoća dovode u vezu sa faktorom sigurnosti, on dobija obeležje realnog indikatora pouzdanosti projektnog rešenja [96, 97, 98].

Ako se izabere obrazac CSU (4.13) i uzme da su u njemu veličine b_s i $K_1 \div K_4$ poznate i nepromenljive, ovaj obrazac se može preformulisati tako da sadrži dve *slučajne* promenljive: jedinični protok q i dubinu h :

$$h_e = c q^{0,43} h^{-0,30}, \quad (4.40)$$

pri čemu je: $c = 2 K_1 K_2 b_s^{0,65} / \sqrt{g}$ – konstanta.

Polazeći od jednostavnog slučaja temeljne stope parapipednog oblika na podlozi od nevezanog materijala, može se smatrati da granično stanje stabilnosti stuba nastaje u trenutku kada eroziona dubina h_e dostigne donju ivicu temeljne stope, odnosno dubinu fundiranja h_f (Slika 4.56).

Verovatnoća potkopavanja temeljne stope („otkaza stabilnosti”) je:

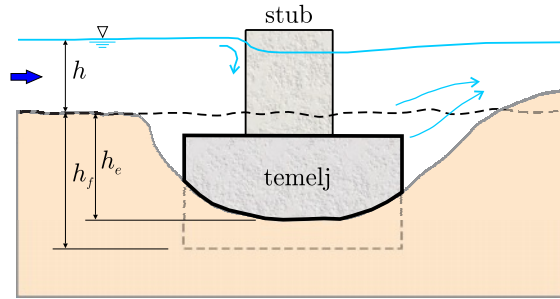
$$P_0 = P \{h_e \geq h_f\}, \quad (4.41)$$

ili u razvijenom obliku:

$$P_0 = P \{c q^{0,43} h^{-0,30} \geq h_f\}. \quad (4.42)$$

¹⁰Kotu dna određene verovatnoće pojave ne treba vezivati za veliku vodu iste verovatnoće, jer se dno korita menja pod kumulativnim uticajem brojnih talasa velikih voda. Morfološke promene korita i hidrološko-hidrauličke promene odvijaju se u različitim vremenskim razmerama.

¹¹Već je rečeno da rizik objedinjuje verovatnoću pojave i njenu posledicu; u ovom slučaju, pojava je erozija oko stuba, a posledica je izazvana šteta. Problemom neizvesnosti i rizika kod mostovskih stubova iscrpno se bavi publikacija [153].



Slika 4.56: Shematski prikaz erozije oko mostovskog stuba; uslov stabilnosti stuba je vezan za odnos eroziona dubine h_e i dubine fundiranja h_f : stub je stabilan ako je $h_e < h_f$, a nestabilan, ako je $h_e \geq h_f$.

Verovatnoća P_0 se određuje primenom metode Monte Karlo. Vrednosti slučajnih veličina q i h se generišu po njihovim zadatim raspodelama pa se, primenom modela (4.40), obavi veliki broj numeričkih simulacija koje daju vrednosti tražene veličine (h_e). Kako je ishod svakog numeričkog eksperimenta drugačiji, kao rezultat se dobija najpre funkcija *gustine raspodele* veličine h_e , a zatim integracijom, njena empirijska raspodela (verovatnoća). Primenom relacije (4.42) dolazi se do verovatnoće potkopavanja temelja stuba (P_0) za *zadatu* dubinu fundiranja h_f .

Pouzdanost rezultata zavisi od izbora tipa raspodele slučajnih veličina. Najbolje je da se ove raspodele definišu na osnovu merenja. Tako se može usvojiti da raspodela za jedinični protok q u izrazu (4.40) odgovara teorijskoj raspodeli velikih voda koju hidrometeorološka služba definiše na osnovu višegodišnjih osmatranja. Ovo se može opravdati činjenicom da je u uslovima velikih voda stepen opšte i lokalne erozije rečnog korita najveći.

Definisanje raspodele za lokalnu dubinu h u modelu (4.40) je složenije, sa većom mogućnošću greške. Pod pretpostavkom kvazi-jednolikog tečenja uzvodno od mosta, dubina se može izraziti preko jediničnog protoka q , Maningovog koeficijenta n i nagiba energetske linije I_e :

$$h = \left(\frac{nq}{\sqrt{I_e}} \right)^{3/5}, \quad (4.43)$$

što pokazuje da se uvode dve nove raspodele – za veličine n i I_e .

Raspodela Maningovog koeficijenta n može biti normalna ili uniformna. U ovom drugom slučaju, koeficijent varijacije: $C_v = [(n_2 - n_1)/(n_1 + n_2)]/\sqrt{3}$ sadrži parametre n_1 i n_2 – najmanje i najveće vrednosti Maningovog koeficijenta na predmetnoj deonici.

Vrednosti n_1 i n_2 , kao i nagibi I_e , dobijaju se kalibracijom modela linijskog ustaljenog tečenja pomoću snimljenih linija nivoa. Smatra se da kod velikih reka, slučajna veličina I_e ima normalnu raspodelu, sa vrednostima koeficijenta varijacije $C_v = 0,01 \div 0,2$ [123].

Metoda Monte Carlo zahteva generisanje pseudo slučajnih brojeva po nekoj usvojenoj raspodeli, za šta postoje standardni postupci¹². Broj simulacionih ciklusa mora biti veliki. Taj broj zavisi od konkretnog slučaja, nije unapred poznat i utvrđuje se probanjem. Pri malom broju ciklusa, vrednosti P_0 fluktuiraju (velika standardna greška). Povećanjem broja ciklusa fluktuacije se smanjuju, sve kad se potpuno ne izgube, kada vrednost koeficijenta C_v dostigne najmanju vrednost (preporuka je $C_v < 0,1$ [96]).

Faktor (koeficijent) sigurnosti:

$$FS = \frac{h_f}{h_e}, \quad (4.44)$$

u kombinaciji sa verovatnoćom „otkaza” P_0 , postaje mera sigurnosti projektovane dubine fundiranja. Evo primera.

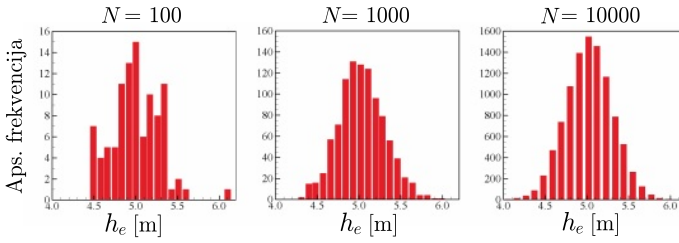
■ **Primer 4.9.** Jedan od stubova mosta na Dunavu kod Beške ima horizontalni presek u obliku poligona, formiranog od pravougaonika dimenzija $2 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ i trougaonih dodataka na uzvodnom i nizvodnom kraju [68]. Temelj ovog stuba je kesonskog oblika, pravougaone osnove. Stub se nalazi u segmentu br. 2 (Slika 4.54) iz primera 4.8.

Statističkom obradom protoka, registrovanim tokom 72 godine (1931–2003) na hidrološkim stanicama Bogojevo i Novi Sad, utvrđeno je da se raspodela velikih voda dobro aproksimira teorijskom raspodelom Pirson-3, sa vrednostima parametara (medijanom i koeficijentima varijacije i asimetrije): $m \equiv Q = 5561 \text{ m}^3/\text{s}$, $C_v = 0,20$ i $C_s = 0,43$ [124].

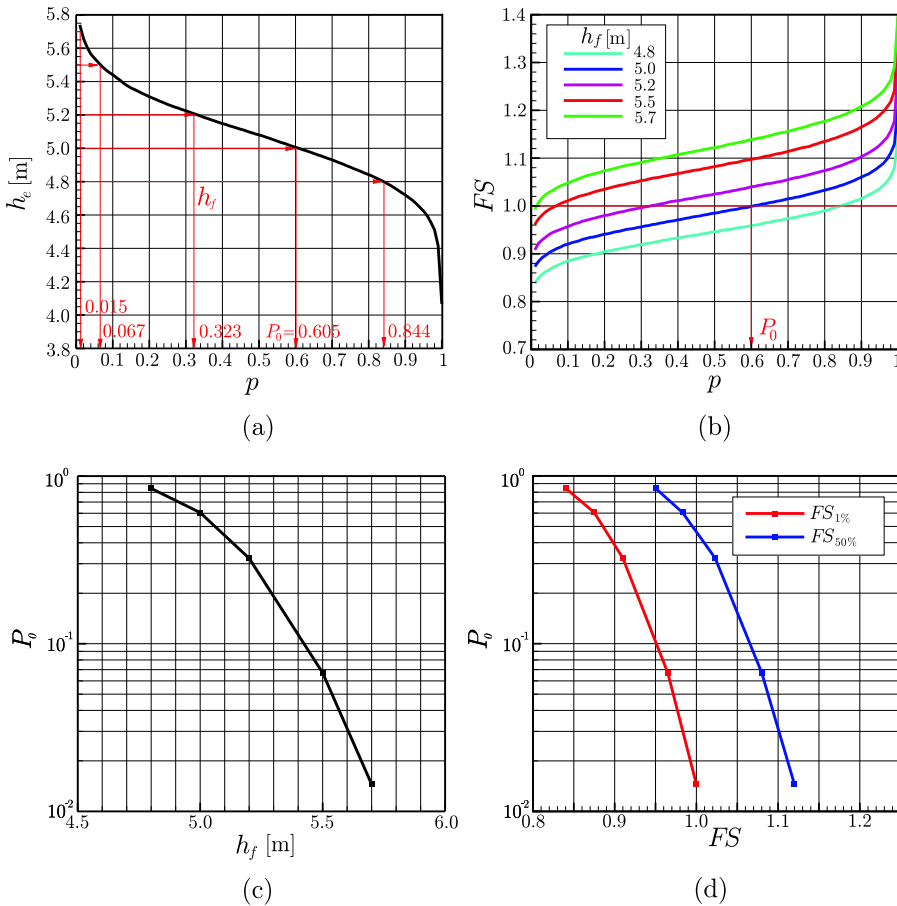
Kalibracijom je utvrđeno da vrednosti Manningovog koeficijenta variraju u rasponu $0,022 \div 0,028 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Srednji nagib linije energije na ovom sektoru iznosi $0,3 \times 10^{-4}$. Proceniti rizik od potkopavanja temelja ovog stuba.

Rešenje. Pretpostavljajući da je raspodela jediničnog protoka u obrascu CSU identična raspodeli maksimalnih godišnjih protoka, ocena matematičkog očekivanja za jedinični protok u segmentu 2 iznosi: $m \equiv q = 13 \text{ m}^3/(\text{sm})$. Za uski opseg vrednosti Manningovog koeficijenta, može se usvojiti uniformna raspodela [4, 96], sa vrednostima parametara: $m = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, $s = 0,0017$ i $C_v = 0,069$. Za raspodelu promenljive I_e usvaja se normalna raspodela, sa vrednostima parametara: $m = 0,3 \times 10^{-4}$, $s = 0,6 \times 10^{-5}$ ($C_v = 0,2$). Primenom metode Monte Carlo, generisani su slučajni brojevi po navedenim raspodelama, a zatim su primenom obrasca (4.40), računane slučajne vrednosti erozionih dubina h_e . Histogrami apsolutne frekvencije prikazani su na Slici 4.57.

¹²Najpre se generišu slučajni brojevi po uniformnoj raspodeli u intervalu $(0,1)$, a zatim se, primenom tzv. funkcija „inverzne transformacije” [197], ovi brojevi prevode u odgovarajuće slučajne brojeve neke druge raspodele (uniformne na proizvoljnom intervalu, normalne, eksponencijalne, Pirsonove itd.) [123].



Slika 4.57: *Histogrami apsolutne frekvencije erozionih dubina (h_e) u zavisnosti od broja simulacionih ciklusa N ; može se primetiti da sa povećanjem broja ciklusa, empirijska gustina raspodele teži normalnoj raspodeli.*



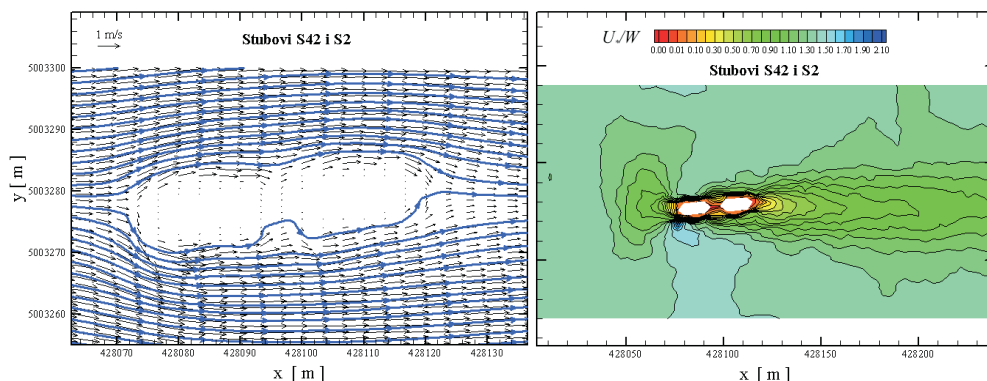
Slika 4.58: *Rezultati Monte Carlo simulacije; (a) empirijska verovatnoća erozionih dubina; (b): veza između erozione dubine, dubine fundiranja i faktora sigurnosti; (c): verovatnoća potkopavanja temelja stuba; (d): veza između faktora sigurnosti i verovatnoće potkopavanja u slučaju prosečne i ekstremno velike erozione dubine.*

Na Slici 4.58-a prikazana je odgovarajuća funkcija verovatnoće prevazilaženja erozionih dubina posle 10000 simulacionih ciklusa. Vrednosti h_e se kreću od 3,85 m do 5,74 m. Eroziorna dubina sa verovatnoćom $p = 50\%$ (medijana) iznosi 5,08 m, a sa verovatnoćom $p = 1\%$, 5,7 m.

Za proračun verovatnoće potkopavanja temelja mostovskog stuba (4.42) razmatra se niz dubina fundiranja: $h_f \in (4,8, 5,0, 5,2, 5,5, 5,7)$ m. Nanošenjem ovih vrednosti na dijagram na Slici 4.58-a, određene su verovatnoće potkopavanja P_0 (Slika 4.58-c). Može se primetiti da najmanja dubina fundiranja $h_f = 4,8$ m ima veliku verovatnoću potkopavanja ($P_0 = 0,84$), a da sa ukopavanjem, te verovatnoće naglo opadaju (za $h_f = 5,7$ m, $P_0 \rightarrow 0,01$). Imajući u vidu (4.44), definisana je parametarska zavisnost na Slici 4.58-b. Vrednosti $FS = 1$ odgovara niz verovatnoća P_o u zavisnosti od dubine h_f .

Ako se sa dijagrama na Slici 4.58-b za vrednost $p = 0,5 = 50\%$, očitaju vrednosti FS , pa se ove povežu sa vrednostima P_o sa Slike 4.58-c, dobija se zavisnost $FS_{50\%}(P_0)$ (Slika 4.58-d). Ona opisuje pojavu *prosečnih* erozionih dubina. Analogno, za $p = 0,01 = 1\%$ dobija se zavisnost $FS_{1\%}(P_0)$, koja opisuje pojavu *ekstremno velikih* erozionih dubina ($h_e \geq 5,7$ m), relevantnu za sigurnost mosta.

Na kraju, ukazuje se na činjenicu da „arsenal alata” koji su na raspolaganju projektantima uključuje i laboratorijska ispitivanja pomoću fizičkih modela, kao i numeričke simulacije pomoću matematičkih modela. Takav primer je prikazan na Slici 4.59.



Slika 4.59: Numerička simulacija strujanja oko stubova mosta na Dunavu kod Beške ($Q = 4400 \text{ m}^3/\text{s}$); levo: vektori brzine i strujnice; desno: raspored vrednosti U_*/W (odnosa brzine smicanja τ_o/ρ i brzine taloženja čestica srednje krupnoće 0,2 mm); kriterijum zasipanja korita: $U_*/W < 1$ [125].

4.7.2 Osiguranje korita oko mostovskih stubova i oporaca

Mostovski stubovi. Sistematski pregled velikog broja empirijskih obrazaca za određivanje krupnoće kamena za zaštitni tepih oko stubova dat je u literaturi [154].

Sintezni zaključak je da se svi obrasci mogu svesti na *opšti bezdimenzioni* oblik:

$$\frac{d_{50}}{h} = \frac{\text{const}_1}{\Delta^a} \text{Fr}^b, \quad (4.45)$$

gde je: d_{50} – srednja krupnoća kamenog bloka, a $\Delta = 1,65$ – relativna gustina. Vrednost $\text{Fr} = V/\sqrt{gh}$ se računa sa brzinom i dubinom na prilaznoj deonici. Vrednosti eksponenata u izrazu (4.45) su u većini slučajeva: $a = 1$ i $b = 2$, samo su vrednosti const_1 različite. Iz (4.45) sledi da *opšti dimenzioni* obrazac ima oblik:

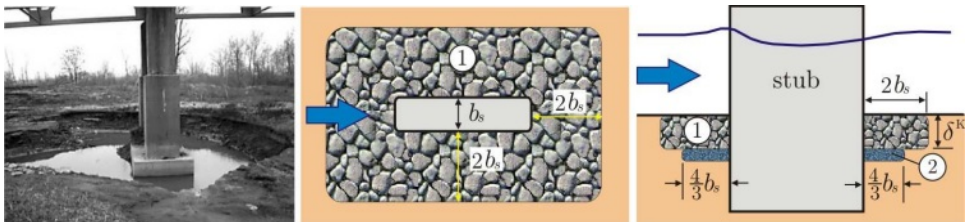
$$d_{50} = \frac{\text{const}_2}{\Delta} \frac{V^2}{2g}. \quad (4.46)$$

Tipičan primer je poznati obrazac Izbaša (Izbash), koji se koristi u projektovanju kamenih tepiha oko mostovskih stubova i umirujućih bazena:

$$d_{50} = \frac{0,7}{\Delta} \frac{V^2}{2g}. \quad (4.47)$$

Kod mostovskih stubova je važno da brzina V bude reprezentativna za uslove u neposrednoj blizini stuba, uključujući mostovsko suženje. Zbog toga se srednja profilska brzina množi korekcionim faktorima za oblik stuba: $K_1 = 1,5$ – stubovi sa zaobljenim ivicama, $K_1 = 1,7$ – oštroični stubovi (ne treba brkati sa podacima na Slici 4.52) i za položaj stuba u rečnom koritu: $K_2 = 0,9$ – stub blizu obale ili na prvolinijskoj deonici; $K_2 = 1,7$ – stub blizu matice toka ili u oštroj krivini [154].

Dno rečnog korita oko mostovskog stuba štiti se tepihom od krupnog kamena (KI-12.3.1-SI:12.20). Najjednostavnija varijanta je prikazana na Slici 4.60.



Slika 4.60: Lokalna erozija oko mostovskog stuba [20]; zaštita rečnog korita oko mostovskog stuba: 1 – tepih od krupnog kamena; 2 – filter od šljnka, tucanika, ili vreća od geotekstila punjenih peskom [154].

Kameni blokovi se ugrađuju na postojeće dno ili u prethodno iskopan rov oko stuba, tako da se kruna tepiha izravna sa okolnim dnom korita (što je pogodno zbog lake inspekcije i malog uticaja na rečni tok). Nagomilavanje kamena oko stuba nije pogodno, jer remeti tok, zadržava naplav i pospešuje eroziju na rubovima tepiha. Najmanja debljina tepiha je: $\delta^K = 3 d_{50}$. Ukoliko su opšta erozija i lokalna erozija u mostovskom suženju veće od navedene debljine, vrednost δ^K se povećava.

U slučaju pojave dina, debljina tepih se dodatno povećava za polovinu visine dine ($\approx 0,2h$). Ako se kamen oko stuba ugrađuje pod vodom, debljinu tepiha treba povećati za 50%. Kamenu tepih počiva na filtarskoj podlozi, pri čemu je površina te podloge manja od površine tepiha (Slika 4.60). Najmanja debljina filtra od šljunka ili tucanika iznosi $4d_{50}$ filtarskog agregata i povećava se za 50% ako se filter ugrađuje pod vodom. Alternativno, za filtarsku podlogu se mogu koristiti vreće od geotekstila punjene peskom, što je pogodno za ugradnju pod vodom i omogućava efikasnije popunjavanje postojećih eroziona jame.

■ **Primer 4.10.** Razmatra se zaštita mostovskog stuba kvadratnog preseka 2×2 m. Sračunata dubina eroziona jame iznosi 2 m, a merodavna brzina toka, 1,8 m/s. Most se nalazi u blizini rečne matice.

Rešenje. Za $K_1 = 1,7$ i $K_2 = 1,7$, primenom obrasca (4.47) dobija se srednji prečnik kamena: $d_{50} = 0,7(1,7 \cdot 1,7 \cdot 1,8)^2 / (1,65 \cdot 2 \cdot 9,81) = 0,58$ m, usvojeno 0,6 m. Najmanja debljina kamenog tepiha je: $\delta^K = 3 \cdot 0,6 = 2,1$ m $< 1,8$ m. Mora se povećati na 2,0 m, a ako je ugradnja ispod vode, na 3 m. Najmanje odstožanje svake ivice tepiha do stuba iznosi: $2 \times 2 = 4$ m, što daje najmanju potrebnu površinu tepiha od 96 m^2 i zapreminu od 192 m^3 , odnosno 288 m^3 ako se nasipa ispod vode.

Mostovski oporci. Erozijska oko mostovskih oporaca može nastati usled: (i) prelivanja oporca i prilaznog nasipa; (ii) prirodnog širenja korita ili migracije meandara; (iii) lokalne erozije usled mostovskog suženja, (iv) lokalne erozije oko oporca. Moguća je i kombinacija navedenih uzroka.

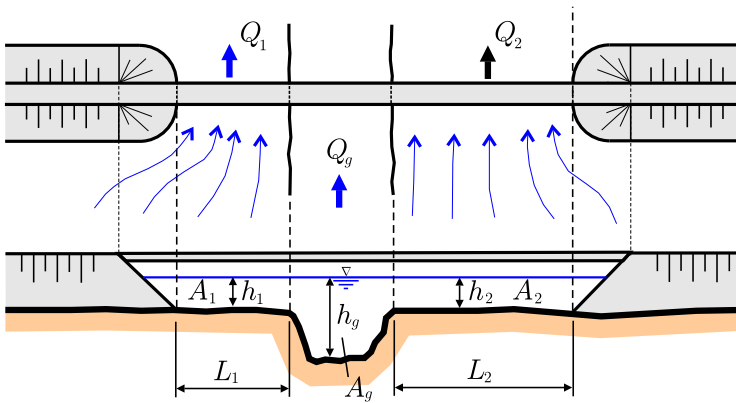
Za fundiranje oporaca je važna prognoza ukupne deformacije korita, koja obuhvata opštu i lokalnu deformaciju. Za zaštitu dna od lokalne erozije oko oporaca na raspolaganju je jedna varijanta Izbašove formule:

$$\frac{d_{50}}{h} = \begin{cases} \frac{K}{\Delta} \text{Fr} & \text{za } \text{Fr} = V^2/(gh) < 0,64 \\ \frac{K}{\Delta} \text{Fr}^{0,14} & \text{za } \text{Fr} = V^2/(gh) \geq 0,64. \end{cases} \quad (4.48)$$

Korekcionni faktor K odnosi se na lokalno ubrzanje toka i intenzitet turbulencije, u zavisnosti od oblika oporca; pri $\text{Fr} < 0,64$: $K = 1,02$ za vertikalni, a $0,89$ za kosi oporac; pri $\text{Fr} \geq 0,64$: $K = 0,69$ za vertikalni, a $0,61$ za kosi oporac [154].

Računska brzina toka V zavisi od podele protoka na glavno korito i inundacije (Slika 4.61).

Način zaštite podnožja oporaca prikazan je na Slici 4.62. Zaštitni kameni tepih polaže se na dnu oko oporca (u inundaciji ili u glavnom koritu). Najmanja širina tepiha jednaka je dvostrukoj dubini toka. Tepihom se štiti i podnožje pristupnog navoza (nasipa) na dužini od najmanje 8 m. Kosine se štite u vidu obaloutvrde od kamenog nabačaja.



Slika 4.61: Podela korita u mostovskom profilu u cilju izbora projektne brzine toka; indeksi: g – glavno korito, 1 – leva inondacija, 2 – desna inondacija; ukupni protok je: $Q = Q_1 + Q_g + Q_2$, a ukupna aktivna površina: $A = A_1 + A_g + A_2$. Moguća su četiri slučaja:

- (1) $L_1/h_1 < 5$ i $L_2/h_2 < 5$: $V = Q/A$;
- (2) $L_1/h_1 \geq 5$ i $L_2/h_2 \geq 5$: $V = \max(Q_1/A_1, Q_2/A_2)$;
- (3) $L_1/h_1 \geq 5$ i $L_2/h_2 < 5$: $V = \max[Q_1/A_1, (Q_g + Q_2)/(A_g + A_2)]$;
- (4) $L_1/h_1 < 5$ i $L_2/h_2 \geq 5$: $V = \max[(Q_g + Q_1)/(A_g + A_1), Q_2/A_2]$
(oznaka „max“ kaže da treba uzeti veću od dve vrednosti u zagradama).

Najmanja debljina tepiha je: $\delta^K = 1,5 d_{50}$ ili d_{100} . Ukoliko je ugradnja pod vodom, ovu debljinu treba povećati za 50%. Preporuka je da tepih bude ukopan, tako da se njegova površina izravna sa dnom. Podloga tepiha (i obaloutvrde) je filtar od prirodnog agregata (peska i šljunka) ili od geotekstila. Ako je oporac u glavnom koritu, preporučuje se geotekstil. Potrebno je da se obaloutvrdom zaštite i rečne obale na dužini od oko 15÷20 m uzvodno i nizvodno od mostovskog profila.

■ **Primer 4.11.** U Tabeli 4.15 dati su ulazni podaci koji definišu stanje u složenom pravougaonom mostovskom profilu pri protoku $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$. Projektovati mere zaštite nožice oporaca.

Tabela 4.15: Ulazni podaci za primer 4.11.

Veličina	Inundacija 1	Glavno korito	Inundacija 2
Širina (m)	12	5	7
Protok (m^3/s)	14,5	36,6	28,9
Dubina (m)	0,8	2,8	1,8
Površina (m^2)	9,60	14,0	12,60
Brzina (m/s)	1,51	2,61	2,29

Rešenje. Za oporac u levoj inondaciji je: $L_1/h_1 = 12/0,8 = 15 > 5$, za oporac u desnoj inondaciji, $L_2/h_2 = 7/1,8 = 3,89 < 5$ – slučaj (3) na Slici 4.61.

Merodavna brzina: $V = \max[14,5/9,6; (36,6+28,9)/(14+12,6)] = 2,46 \text{ m/s}$.

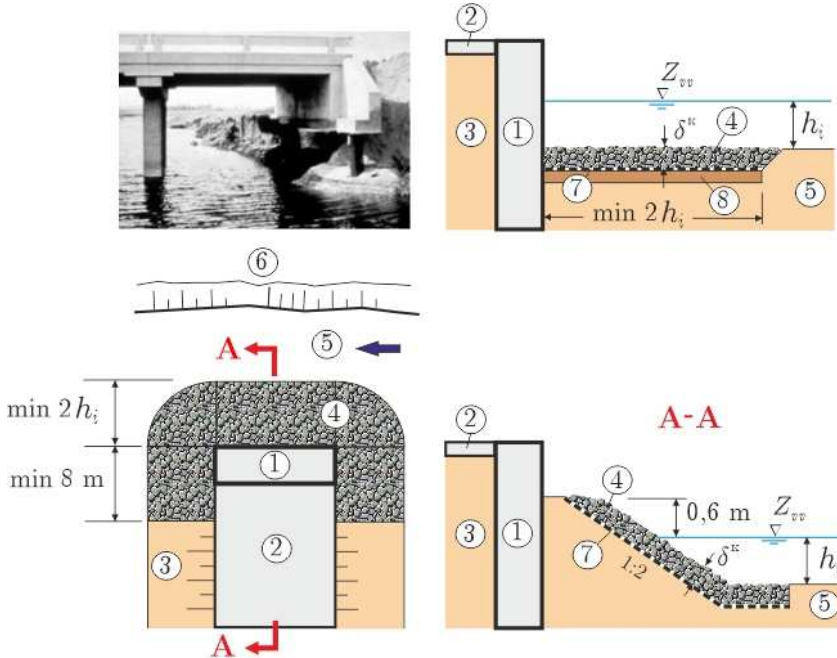
Krupnoća kamena se računa pomoću izraza (4.48).

Oporac u inundaciji 1: $Fr = 2,46^2/(9,81 \cdot 0,8) = 0,77 > 0,64$;

$d_{50} = 0,8 \cdot 0,69 \cdot 0,77^{0,14}/1,65 = 0,32 \text{ m}$.

Oporac u inundaciji 2: $Fr = 2,46^2/(9,81 \cdot 1,8) = 0,34 < 0,64$;

$d_{50} = 1,8 \cdot 1,02 \cdot 0,34/1,65 = 0,38 \text{ m}$, usvojeno 0,4 m; $\delta^K = 1,5 \cdot 0,4 = 0,6 \text{ m}$.



Slika 4.62: Lokalna erozija oko mostovskog oporca (obalnog stuba) [154]; zaštita rečnog korita oko vertikalnog i kosog oporca: 1 – oporac; 2 – prilazni put; 3 – prilazni nasip; 4 – kamena zaštita; 5 – inundacija; 6 – glavno korito; 7 – filter (pesak i šunak/geotekstil); 8 – izravnavajući sloj (po potrebi).

4.7.3 Osiguranje propusta

U sklopu uređenja vodotoka u blizini saobraćajnica potrebno je otkloniti mogućnost erozije tla nizvodno od propusta. Radi se o analizi potencijalne ugroženosti i projektovanju umirujućih bazena ako su neophodni.

Nevezana tla. Veličina potencijalne eroziona jame može se proceniti pomoću empirijskog bezdimenzionog izraza [48]:

$$\left[\frac{h_e}{R_o}, \frac{B_e}{R_o}, \frac{L_e}{R_o}, \frac{\nabla_e}{R_o^3} \right] = C_I C_H \left(\frac{\alpha}{\sigma_d^{1/3}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g} R_o^{5/2}} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta, \quad (4.49)$$

gde su: h_e , L_e , B_e , t i ∇_e – najveća dubina, dužina i širina eroziona jame, vreme njenog razvoja (usvojeno 30 min) i zapremina erodiranog materijala.

Ostale veličine su: Q – projektni protok; R_o – hidraulički radijus na izlazu propusta pri njegovom punom kapacitetu; α , β , θ – empirijski koeficijenti; C_I – korekcionni faktor koji uzima u obzir uzdužni nagib propusta I_o ; C_H – korekcionni faktor koji uzima u obzir denivelaciju izlaza propusta u odnosu na nizvodni teren, pri čemu je: $H = dz/D$ – odnos denivelacije dz i visine/prečnika propusta D (Tabela 4.16); g – gravitaciono ubrzanje.

Veličina $\sigma_d = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ predstavlja standardnu devijaciju granulometrijskog sastava tla; Tipične vrednosti parametra σ_d su: 1,87 – pesak; 2,1 – šljunak; $< 1,5$ – tlo uniformnog sastava; $\geq 1,5$ – mešavne tla.

Eksperimenti pokazuju da je položaj najveće dubine h_e na odstojanju $0,4 L_e$.

Tabela 4.16: Vrednosti empirijskih koeficijenata za nevezano tlo [48].

Veličina	α	β	θ
h_e	2,27	0,39	0,06
B_e	6,94	0,53	0,08
L_e	17,10	0,47	0,10
\forall_e	127,08	1,24	0,18

I_d [%]	C_I				$H = dz/D$ [-]	C_H			
	h_e (m)	B_e (m)	L_e (m)	\forall_e (m ³)		h_e (m)	B_e (m)	L_e (m)	\forall_e (m ³)
0	1,00	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,03	1,28	1,17	1,30	1	1,22	1,51	0,73	1,28
5	1,08	1,28	1,17	1,30	2	1,26	1,54	0,73	1,47
>7	1,12	1,28	1,17	1,30	4	1,34	1,66	0,73	1,55

■ **Primer 4.12.** Proceniti dimenzije erozije jame nizvodno od propusta kružnog poprečnog preseka, ako su dati sledeći podaci: $D = 800$ mm, $I_o = 2\%$, $dz = 0,9$ m, $Q = 1$ m³/s, $\sigma_d = 1,87$ (nevezano peskovito tlo), $t = 30$ min.

Rešenje. Hidraulički radijus na izlazu propusta: $R_o = D/4 = 0,8/4 = 0,2$ m. Vrednosti koeficijenata α , β i θ očitavaju se iz Tabele 4.16. Za zadati uzdužni nagib propusta i vrednost parametra $H = 0,9/0,8 = 1,125 \approx 1$, dobijaju se sledeće vrednosti korekcionnih faktora C_I i C_H :

I_d [%]	C_I				$H = dz/D$ [-]	C_H			
	h_e	B_e	L_e	\forall_e		h_e	B_e	L_e	\forall_e
0	1,03	1,28	1,17	1,30	1	1,26	1,54	0,73	1,47

Primenom obrasca (4.49), dobijaju se vrednosti: $h_e = 1,28 \approx 1,3$ m, $B_e = 8,47 \approx 8,5$ m, $L_e = 7,26 \approx 7,3$ m i $\forall_e = 36,79 \approx 37$ m³. Najveća dubina erozije jame biće $0,4 L_e = 2,9 \approx 3$ m nizvodno od izlaza propusta.

Vešana tla. Ova tla imaju mnogo veću otpornost na eroziju od nevezanih tla. Na primer, peskovita glina se tipično sastoji od 58 % peska, 27 % gline, 15 % prašine i 1 % organskih materija. Prečnik srednje zrna je oko 0,15 mm, a indeks plastičnosti $IP \approx 15$.

Empirijski izraz za eroziju vezanog tla nizvodno od propusta kružnog poprečnog preseka, ima ovaj oblik [48]:

$$\left[\frac{h_e}{D}, \frac{B_e}{D}, \frac{L_e}{D}, \frac{\forall_e}{D^3} \right] = C_I C_H \alpha \left(\frac{\rho V^2}{\tau_c} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta, \quad (4.50)$$

gde je, pored već korišćenih oznaka, D – prečnik cevi, ρ – gustina vode, V – srednja profilska brzina na izlazu propusta, a τ_c – kritični tangencijalni napon:

$$\tau_c = 0,001(\tau_{sat} + 8630) \operatorname{tg}(30 + 1,73 IP). \quad (4.51)$$

Imati u vidu da je: τ_{sat} – tangencijalni napon na tlo zasićeno vodom, a $IP = 5 \div 16$ – koeficijent plastičnosti po Aterbergu (Atterberg). Vrednosti empirijskih koeficijenata α , β i θ za vešana tla date su u Tabeli 4.17, a vrednosti korekcionih faktora C_I i C_H , u Tabeli 4.16.

Tabela 4.17: Vrednosti empirijskih koeficijenata za vešana tlo [48].

Veličina	α	β	θ	α_c
h_e	0,86	0,18	0,10	1,37
B_e	3,55	0,17	0,07	5,63
L_e	2,82	0,33	0,09	4,48
\forall_e	0,62	0,93	0,23	2,48

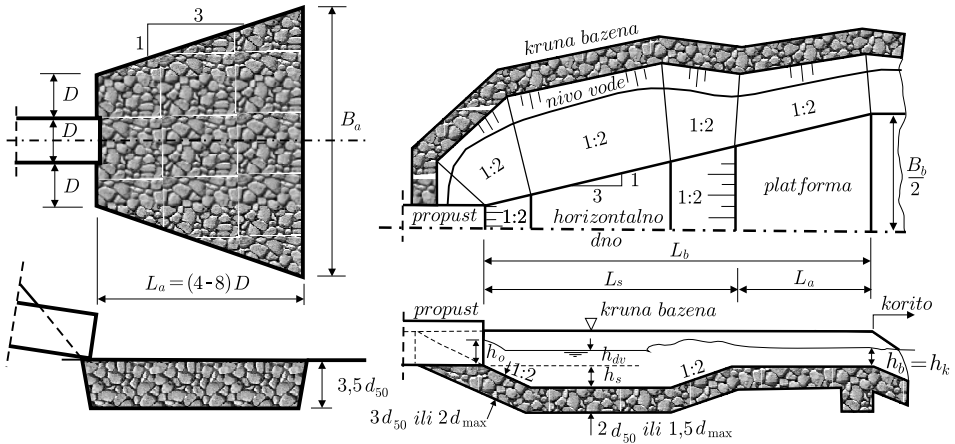
Ako poprečni presek propusta nije kružni, u izrazu (4.50) prečnik D treba zameniti ekvivalentnom dubinom: $\hat{h} = \sqrt{A/2}$, gde je A – aktivna površina datog poprečnog preseka, a koeficijent α , koeficijentom α_c (Tabela 4.17).

■ **Primer 4.13.** Proceniti dimenzije erozione jame za vešana tlo ako su dati sledeći podaci: $D = 600$ mm, $I_o = 0\%$, $dz = 0$ m, $Q = 1$ m³/s, $t = 30$ min; na osnovu uzoraka tla uzetih tokom terenskih istražnih radova, određene su vrednosti: $\tau_{sat} = 23970$ Pa i $IP = 12$.

Rešenje. Merodavne hidrauličke veličine su: $A = D^2\pi/4 = 0,28$ m² i $V = Q/A = 3,54$ m/s. Iz (4.51) sledi: $\tau_c = 0,001(23970 + 8630)\operatorname{tg}[(30 + 1,73 \cdot 12) \pi/180] = 39,9$ Pa, odnosno: $\rho V^2/\tau_c = 1000 \cdot 3,54^2/39,9 = 314$.

Vrednosti koeficijenata su date u Tabeli 4.17, dok su vrednosti korekcionih faktora: $C_I = C_H = 1$. Na osnovu (4.50) je: $h_e = 1,15 \approx 1,2$ m, $B_e = 4,8 \approx 5$ m, $L_e = 9,13 \approx 9$ m i $\forall_e = 16,36 \approx 16,4$ m³. Najveća eroziona dubina se može očekivati $0,4 L_e \approx 3,7$ m nizvodno od izlaza propusta.

Ako se pokaže da je intenzitet erozije tla nizvodno od propusta neprihvatljiv, preduzimaju se mere zaštite – popločavanje terena kamenom na izlazu propusta ili izgradnja bazena za umirenje (Slika 4.63).



Slika 4.63: Zastita tla nizvodno od propusta; levo: kamenom popločana platforma trapeznog oblika; desno: kamenom obložen bazen za umirenje (prema [48]).

Popločavanje kamenom izlaza propusta je najčešće korišćena mera zaštite od erozije, naročito kod cevastih propusta prečnika $D < 1500$ mm. Rasipanje energije toka odvija se posredstvom velike rapavosti, širenjem mlaza i njegovom disperzijom, što sprečava koncentrisani udar vode na tlo. Efekti ove konstrukcije zavise od krupnoće kamena d_{50} i dimenzija platforme – dužine L_a i širine B_a . Dužina je srazmerna prečniku propusta: ($L_a = 4D \div 8D$), a debljina, krupnoći kamena: $3,5 d_{50}$ (Slika 4.63). Ako je projektovana dužina nedovoljna, lokalna erozija biće translatorno pomerena nizvodno.

Za određivanje krupnoće kamena, u ovom slučaju se preporučuje empirijski izraz koji uzima u obzir prečnik cevi D i dubinu donje vode h_{dv} [48]:

$$d_{50} = 0,2 D \left(\frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}} \right)^{4/3} \left(\frac{D}{h_{dv}} \right) \quad (4.52)$$

Navedeni izraz važi za gustinu kamena $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ i za dubinu donje vode: $h_{dv}/D < 0,4 \div 1,0$. Ako ova dubina nije poznata, usvojiti $h_{dv} = 0,4 D$.

■ **Primer 4.14.** Dimenzionisati građevinu za zaštitu tla od erozije neposredno nizvodno od izlaza cevastog propusta, ako su dati sledeći podaci: $D = 600$ mm, $Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{dv} = 0,2$ m.

Rešenje. Kako je $h_{dv}/D = 0,2/0,6 = 0,33$, uslov za primenu obrasca (4.52) je zadovoljen, pa je rezultat: $d_{50} = 0,32$ m.

Dimenzije građevine su: $L_a = (4 \div 8)D = 1,28 \div 2,56$ m, usvojeno 2 m; $B_a = 3D + 2L_a/3 = 2,65 \div 3,51$ m, usvojeno 3 m; debljina zaštitne obloge: $3,5 d_{50} = 1,1 \approx 1$ m.

* * *

Ako proračun pokaže da se može očekivati intenzivna erozija tla nizvodno od propusta, lokalno popločavanje kamenom u vidu platforme na izlazu propusta nije dovoljno, već se mora projektovati ozbiljnija zaštita u vidu bazena za umirenje. Ova mera se obično primenjuje kada je tečenje u propustu burno, a izlaz nepotopljen (Slika 4.63). Dimenzije bazena za umirenje: dubina h_s , dužina L_b i širina B_b , zavise projektnog kapaciteta propusta Q , izlazne dubine h_o , dubine donje vode h_{dv} i prečnika kamene obloge d_{50} :

$$\frac{h_s}{h_o} = 0,86 \left(\frac{d_{50}}{h_o} \right)^{-0,55} \left(\frac{V_o}{\sqrt{g h_o}} \right) - C_o, \quad (4.53)$$

gde je: h_o – dubina na izlazu propusta. Kod dugačkih propusta pravougaonog preseka ova dubina se aproksimira normalnom dubinom, a kod propusta kružnog preseka, kritičnom dubinom (što je na strani sigurnosti). Parametar uticaja donje vode C_o definisan je na sledeći način:

$$C_o = \begin{cases} 1,4 & \text{za } h_{dv}/h_o < 0,75 \\ 4(h_{dv}/h_o) - 1,6 & \text{za } 0,75 \leq h_{dv}/h_o < 1,0 \\ 2,4 & \text{za } h_{dv}/h_o > 1,0 \end{cases} \quad (4.54)$$

Dužina dela bazena u kome se odvija rasipanje energije je: $L_s \approx 10 h_s > 3 B_o$, gde je B_o – širina/prečnik propusta. Dužina platforme na nizvodnom delu bazena je: $L_a \approx 5 h_s > B_o$, tako da je ukupna dužina bazena: $L_b = L_s + L_a \approx 15 h_s > 4 B_o$.

Najmanja debljina kamene obloge je: $2 d_{50}$ (Slika 4.63), uz uslov da dubina bazena mora biti veća od debljine obloge: $h_s > 2 d_{50}$. Takođe važi uslov u pogledu krupnoće kamena: $d_{50}/h_o > 0,1$. Najbolje efekte bazen daje pri niskoj donjoj vodi¹³: $h_{dv} < 0,75 h_o$.

Oblaganje kanala nizvodno od bazena za umirenje nije neophodno ako je brzina u kanalu manja od kritične brzine za pokretanje tla u kome je kanala formiran; u protivnom, kanal treba obložiti na odgovarajućoj dužini i tako ga zaštititi od erozije.

Algoritam proračuna je sledeći: za datu geometriju propusta i projektovani protok, sračuna se dubina na kraju propusta h_o , njoj odgovarajuća brzina V_o i $Fr = V_o/\sqrt{g h_o}$. Na osnovu lokalno raspoloživog kamena, izabratu srednji prečnik d_{50} (uz proveru: $d_{50}/h_o > 0,1$) i pomoću (4.53) i (4.54) najpre sračunati dubinu bazena h_s , a zatim i njegove ostale dimenzije (L_s , L_a , L_b i B_b).

¹³Ograničenja: prečnik kružnih propusta i visina pravougaonih propusta: $D = 152 \div 914$ mm; širina pravougaonih propusta $B_o = 305 \div 610$ mm; protok: $Q = 0,003 \div 2,8$ m³/s, prečnik kamena: $d_{50} = 6 \div 177$ mm; nagib dna: $I_o = 0 \div 3,75$ %. Svaka ekstrapolacija može biti problematična!

Zatim odrediti kritičnu dubinu na izlaznom kraju bazena $h_b = h_k$ i odgovarajuću brzinu V_b . Upoređenjem ove brzine i brzine u nizvodnom kanalu, odlučiti da li treba menjati prečnik kamena i dimenzije bazena, ili oblagati korito kanala.

■ **Primer 4.15.** Projektovati bazen za umirenje toka na izlazu iz betonskog propusta pravougaonog poprečnog preseka dimenzija $2,5 \times 1,8$ m i uzdužnog nagiba dna $I_d = 1\%$, ako je merodavan protok $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, a dubina donje vode $h_{dv} = 0,8$ m. Granična brzina u nizvodnom koritu (pri kojoj se ovo ne mora oblagati) iznosi $1,5 \text{ m/s}$.

Rešenje. Ako se pretpostavi rapavost betona $n = 0,014 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, normalna dubina u propustu iznosi $h_n = 1,17$ m, kojoj odgovara brzina $V(h_n) = 5,11 \text{ m/s}$ i $\text{Fr} = V(h_n)/\sqrt{g h_n} = 1,5$. Tečenje u propustu je burno (jer je $h_k = 1,54$ m, $V(h_k) = 3,89 \text{ m/s}$). Dubina na izlazu propusta je: $h_o \approx h_n = 1,17$ m. Uslov za dobro funkcionisanje bazena je zadovoljen: $h_{dv}/h_o = 0,68 < 0,75$. Za usvojeni srednji prečnik kamena $d_{50} = 0,4$ m, iz (4.53) se dobija dubina bazena: $h_s = 1,09$ m ($C_o = 1,4$). Ova dubina zadovoljava uslov: $h_s/d_{50} = 2,73 > 2$.

Slede ostale dimenzije bazena: $L_s = 10,86 \approx 11$ m; $L_b = 16,28 \approx 16$ m; $B_b = 13,36 \approx 13$ m. Na izlazu bazena se računa kritična dubina za protok $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ i trapezni presek širine u dnu $B_b = 13$ m, sa nagibom kosina $m = 2$. Rezultat je: $h_b = h_k = 0,5$ m i $V_b = V(h_k) = 2,14 \text{ m/s}$. Kako ova brzina prevazilazi dozvoljenu brzinu od $1,5 \text{ m/s}$, korito nizvodno od bazena se mora oblagati.

Za određivanje krupnoće kamena može se primentiti neki od ranije navedenih obrazaca za kamene obloge; na primer, obrazac (4.47) daje za $V \equiv V_b = 2,14 \text{ m/s}$ srednju krupnoću kamena: $d_{50} \approx 0,1$ m. Napomena: izborom krupnijeg kamena, mogu se smanjiti dimenzije bazena, ali ostaje pitanje oblaganja nizvodnog kanala.

4.7.4 Zadržavanje nanosa pomoću taložnika

Taložnici rečnog nanosa se koriste u razne svrhe. U kontekstu zaštite saobraćajnica, izgradnja taložnika ima za cilj sprečavanje usporavanja toka usled nagomilanog nanosa i prelivanja saobraćajnica. Taložnici vučenog i suspendovanog nanosa mogu biti raznih oblika i dimenzija, ali se u proračunima obično pretpostavlja da im je osnova pravougaonog oblika. To ne moraju biti posebni objekti, već funkciju taložnika mogu imati i proširenja rečnog korita u kojima se brzina toka smanji u dovoljnoj meri.

Osnovni parametar „efikasnosti zadržavanja” nanosa predstavlja odnos količine nanosa koji se u taložniku zadrži i količine nanosa koji u njega dospe [133]:

$$T_E = 1 - \exp\left(\frac{-W B_T L_T}{Q}\right), \quad (4.55)$$

gde je W – brzina taloženja, B_T – širina taložnika, L_T – dužina taložnika, a Q – protok. Primetno je da efikasnot taložnika bitno zavisi od površine njegove osnove.

■ **Primer 4.16.** Ako je prečnik zrna $d = 0,1$ mm ($W = 0,006$ m/s), odrediti: (a) efikasnost zadržavanja taložnika dimenzija $L_T = 200$ m i $B_T = 30$ m, u opsegu protoka od 5 do 30 m³/s; (b) dimenzije taložnika čija će efikasnost zadržavanja biti $T_E = 90\%$ za opseg protoka od 10 do 30 m³/s.

Rešenje. (a) Formula (4.55) daje vrednosti u Tabeli 4.18. Može se konstatovati da u taložniku zadatih dimenzija, efikasnost zadržavanja nanosa date krupnoće naglo opada sa protokom.

Tabela 4.18: *Efikasnost zadržavanja nanosa u taložniku u primeru 4.16*

Q [m ³ /s]	5	10	20	30
T_E [%]	100	97	83	70

(b) Zahtevana efikasnost taloženja $T_E = 90\%$ može se pri datom protoku ostvariti različitim dimenzijama taložnika. Ako se usvoji širina taložnika B_T , dužina L_T se može sračunati iz obrasca (4.55): $L_T = q [-\ln(1 - T_E)] / W$, gde je $q = Q / B_T$ – jedinični protok u taložniku. U Tabeli 4.19 dati su rezultati proračuna.

Tabela 4.19: *Dimenzije taložnika za zadatu efikasnost zadržavanja od 90%.*

Q [m ³ /s]	B_T [m]	$q = Q/B_T$ [m ² /s]	L_T [m]	$B_T L_T$ [m ²]
10	30	0,333	128	3840
	50	0,200	77	3840
	80	0,125	48	3840
20	30	0,667	256	7680
	50	0,400	154	7680
	80	0,250	96	7680
30	30	1,000	384	11520
	50	0,600	230	11520
	80	0,375	144	11520

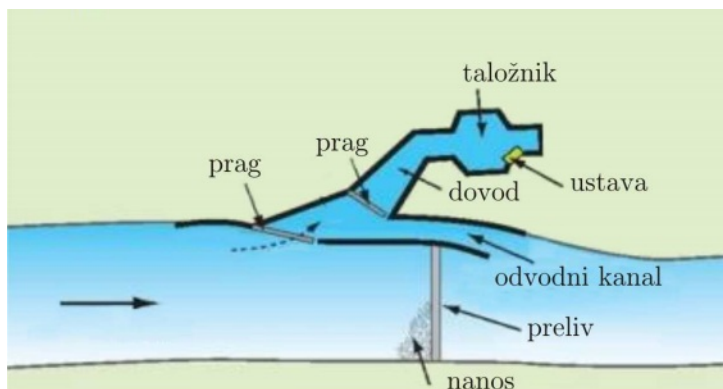
U slučaju kada se taložnik gradi za potrebe *snabdevanja vodom*, neophodni su veći interventni radovi u rečnom koritu, sa odgovarajućim građevinama. Dispoziciona rešenja vodozahvata sa kontrolom nanosa pomoću taložnika mogu biti različita, u zavisnosti od lokalnih uslova. Jedna mogućnost je prikazana na Slici 4.64.

4.8 Bagerovanje

Bagerski radovi su nezaobilazni na plovnim rekama, gde se izvode u sklopu uspostavljanja i održavanja plovnih gabarita (videti KI-14.4.2).

4.8.1 Pripremni radovi

Bagerovanju prethodi izrada plansko-projektne dokumentacije u kojoj se razmatraju kratkoročni i dugoročni ciljevi. Prvi se odnose na uspostavljanje plovnog puta



Slika 4.64: *Primer vodozahvata sa taložnikom za sprečavanje uvlačenja rečnog nanosa [40].*

ili njegovo održavanje, a drugi, na rešavanje tehnoloških, finansijskih i ekoloških problema vezanih za odlaganje izbagerovanog materijala.

Prikupljanje ulaznih podataka je presudno za uspeh čitavog projekta. U nastavku se navodi lista aktivnosti i sadržaj ulaznih podataka.

(1) Analiza lokacije, količine izbagerovanog materijala, načina njegovog transporta i mesta odlaganja. Ova analiza treba da obuhvati i dugoročne projekcije u vezi sa održavanjem plovnog puta (učestalost bagerovanja, proširenje i rehabilitacija deponija itd.).

(2) Hidrografska merenja. Pre bagerovanja je nužno da se snimi početna geometrija rečnog korita („batimetrija“) ehošonderima (KI-10.5.1), kako bi se po završetku radova, mogla obračunati količina izbagerovanog materijala.

(3) Fizičko-hemijske karakteristike sedimenta. Na osnovu ovih karakteristika projektuje se bagerska oprema. Od interesa su: gustina, vlažnost, plastičnost i granulometrijski sastav materijala.

(4) Uslovi za izbor opreme. U fazi pripremnih radova razmatraju se modaliteti nabavke i korišćenja optimalne bagerske opreme shodno podacima (1)-(3).

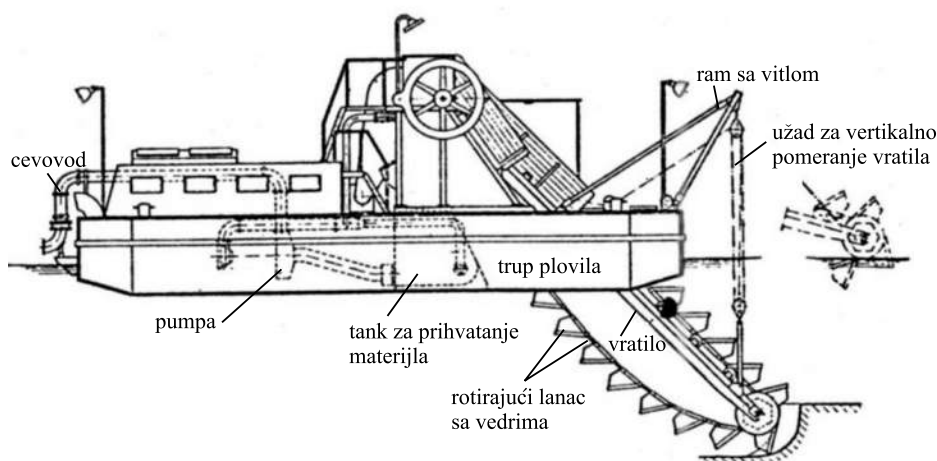
(5) Uslovi za obavljanje radova. U svakom konkretnom slučaju veoma je važno unapred znati da li postoje kakva ograničenja u pogledu korišćenja određene opreme, finansijskih resursa, ekologije, vremena itd. Posebno su bitni uslovi za odlaganje izbagerovanog materijala, naročito ako je kontaminiran teškim metalima i drugim otrovnim materijama.

4.8.2 Oprema i tehnologija rada

Vrste bagera. Postoje tri osnovna tipa bagera (Slike 4.65, 4.67): (1) mehanički bageri, (2) hidraulički bageri – refuleri i (3) kombinacija prethodna dva tipa.

Izbor bagera zavisi od vrste materijala koji se bageruje, dužine transporta, načina odlaganja, kao i od drugih lokalnih uslova, od kojih su u prvom planu oni vezani za očuvanje životne sredine.

Mehanički bageri. Većina bagera ovog tipa kopa materijal sa dna pomoću rotirajućeg sistema vedara (otuda naziv „bageri-vedričari”), a zatim se izbagerovani materijal tovari u specijalizovana plovila, ili se otprema putem plutajućeg cevovoda (Slika 4.65). Mehanički bageri zahtevaju malo vode za rad i ne menjaju bitno gustinu materijala na dnu. Za isti obim posla i brzinu bagerovanja, zahtevaju manju snagu od drugih vrsta bagera, ali brojniju posadu. Razne vrste mehaničkih bagera prikazane su na Slici 4.66.



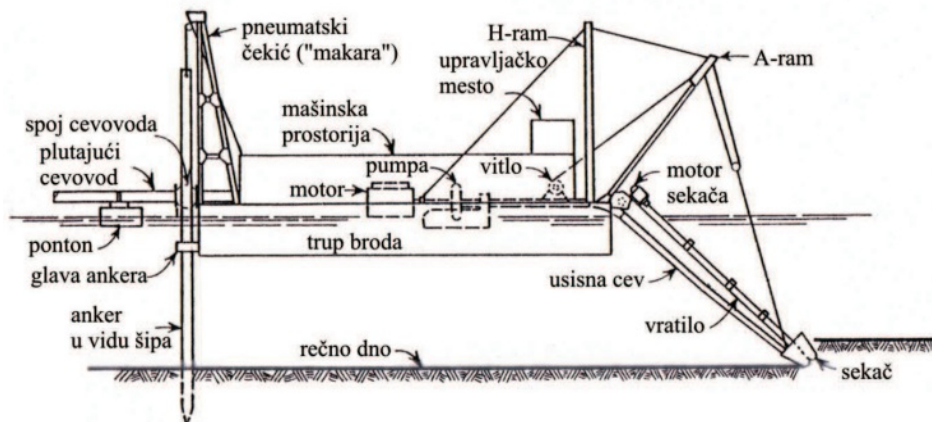
Slika 4.65: Shematski prikaz konstrukcije tipičnog bagera vedričara sa hidrauličkim otpremanjem izbageravnog materijala [190].



Slika 4.66: Primeri mehaničkih bagera; levo: bager-vedričar; desno: bager sa rotacionom zahvatnom glavom [276].

Hidraulički bageri. Ovi bageri – „refuleri”, usisavaju mešavinu vode i zrnastog materijala sa dna i otpremaju je do mesta odlaganja kroz plutajući cevovod, koji čini integralni deo bagerskog sistema (Slika 4.67). Izbagerovani nanos se hidrauličkim putem transportuje do odlagališta ili do specijalizovanih plovila za odvoz materijala.

Po pravilu, refuleri imaju na kraju usisne cevi rotacioni sekač (Slika 4.67), za kopanje i usitnjavanje kompaktnih aluvijalnih materijala i gline. Primeri bagera refulera prikazani su na Slici 4.68.



Slika 4.67: Shematski prikaz konstrukcije tipičnog hidrauličkog bagera refulera [87].



Slika 4.68: Primeri hidrauličkih bagera; levo: rotacioni sekač na vrhu usisne cevi [276]; sredina: bager refuler „Jadar” (Plovput-Beograd); desno: plutajući cevovod.

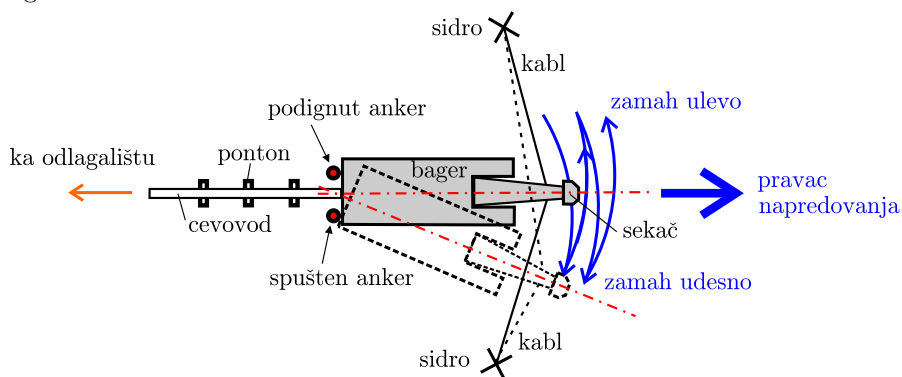
Zapreminske koncentracije mešavine, koje zavise od vrste materijala, dubine usisavanja, snage pumpe i dužine transporta, obično iznose 10 ÷ 20 % (Tabela 4.20).

Tabela 4.20: Protočni kapacitet cevovoda kod bagera refulera [m^3/s] (prema [245]).

Brzina [m/s]	Prečnik cevi			
	8" (203 mm)	18" (457 mm)	24" (610 mm)	30" (762 mm)
3,0	0,099	0,501	0,889	1,390
4,5	0,147	0,750	1,334	2,084
6,0	0,198	1,000	1,778	2,778
7,6	0,246	1,252	2,223	3,475

Kretanje i rad bagera. Bageri mogu biti samohodni ili nesamohodni. Ovi drugi zahtevaju tegljače za odvoženje do mesta rada. Radni položaj bagera na projektom utvrđenoj lokaciji se fiksira pomoću ankera i čeličnih kablova (Slika 4.69). U toku rada, bager naizmenično podiže i spušta ankerske stubove oko kojih rotira i pomera usisnu cev u vidu lučnih „zamaha” ulevo i udesno, uz zatezanje i otpuštanje kablova

na pramcu. Ponavljanjem ove procedure, bager se kreće unapred, a njegov rad se odvija neprekidno, efikasno i ekonomično. Ova svojstva bagerovanja se naročito zahtevaju kod održavanja plovnih puteva. Kod velikih reka sa dnom od finog peščanog materijala, rotacioni sekači nisu neophodni, u kom slučaju se radi o „bagerima-sisavcima”.



Slika 4.69: Shematski prikaz kretanja bagera sa rotacionim sekačem, (prema [245]).

Već je rečeno da se izbagerovani materijal može otpremiti hidrauličkim putem (kroz cevovod), ili specijalizovanim plovilima (Slika 4.70). Pri održavanju plovnih reka dužinina cevovoda nije veća od 3÷4 km. Kod radova na nasipanju obala, dužina cevovoda može dostići 20 km, ali uz korišćenje niza buster pumpi [245].



Slika 4.70: Transport i odlaganje izbagerovanog materijala; levo: nasipanje depozita na obali; desno: hidraulički transport materijala do plovila za odvoženje izbagerovanog materijala.

Hidraulički transport. Reč je o transportu „dvofaznog fluida” (mešavine peska kao čvrste faze i nosećeg fluida – vode, kao tečne faze). Teorija hidrauličkog transporta je posebna grana hidraulike. Ovde se prezentira minimum osnovnih saznanja koja mogu poslužiti u regulaciji reka.

Smatra se da se mešavine vode i čvrste materije kreću kroz cevne provodnike u režimu *homogenih* mešavina ako su: (i) čestice sitnije od 0,2 mm [85]; (ii) ako im je brzina tonjenja W u Stoksovoj (Stokes) oblasti (KI-8.2.1.4); (iii) odnos brzine W i smičuće brzine u_* : $W/u_* < 0,2$ [258].

U protivnom, transport se odvija u režimu *heterogenih* tokova. Kod homogenih tokova preovladavaju viskozne sile, a kod heterogenih, inercijalne sile (gravitacioni uticaji). Heterogene suspenzije, koje su ovde isključivo od interesa, karakterišu izraženi *gradijenti koncentracije* čvrste faze u poprečnom preseku cevi, što komplikuje analizu i izradu računskih modela transporta.

Značajno uprošćenje se postiže ako se pretpostavi da je zrnasti materijal koji se transportuje *uniformnog* granulometrijskog sastava i da je cev *horizontalna*.

Ključni parametri hidrauličkog transporta su: gustina čvrste faze ρ_s , njena zapreminska *koncentracija* C i *brzina istaložavanja* V_L . U slučaju bagerovanja rečnog nanosa, gustina standardno iznosi: $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ ($\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho = 1,65$).

Zapreminski udeo čvrste faze u ukupnoj zapremini mešavine predstavlja „zapreminsku koncentraciju” C (KI-11.1.2), dok je udeo tečne faze $(1 - C)$. Zapreminska koncentracija je veličina bez dimenzija, a može se procentualno izraziti. Gustina mešavine dobija se kao: $\rho_m = C \rho_s + (1 - C) \rho$ (KI-11.1.2-(11.1)).

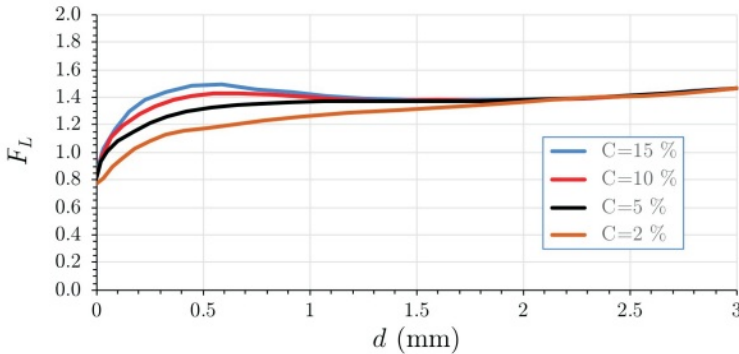
Kod heterogenih suspenzija, brzina istaloženja V_L označava, po nekim autorima, početak gomilanja čestica na dnu horizontalno položene cevi, po drugim autorima, početak formiranja nepokretnog dna, a po trećim autorima, početak kretanja zrna u režimu vučenog nanosa [258]. Ova brzina zavisi od turbulentnosti toka i u slučaju uniformne granulometrije, odgovara minimumu linijskih gubitaka energije. Od mnoštva izraza za procenu brzine istaložavanja, ovde se navodi jedan od najcitetiranih – izraz Dirana (Durand) [85, 258], koji ovu brzinu stavlja u kontekst neke vrste Frudovog broja:

$$F_L = \frac{V_L}{\sqrt{2gD\Delta}}, \quad (4.56)$$

gde je: D – prečnik cevi. Na Slici 4.71 prikazana je empirijska zavisnost broja F_L od krupnoće zrna i koncentracije.

U proračunima bagerovanja, osnovni zadatak je određivanje gubitaka energije na trenje i potrebne snage pumpe da bi se ti gubici savladali (lokalni gubici se obično zanemaruju). U slučaju transporta heterogenih mešavina, linijski gubici se računaju relativno – u odnosu na gubitke koji bi važili za „čistu vodu” i to prema empirijskim zavisnostima, kao što je Diran-Kondiolisova (Durand, Condiolis) [85]:

$$\frac{I_{em} - I_e}{C I_e} = 176 \left(\frac{\sqrt{gD}}{V_m} \right)^3 \left(\frac{W}{\sqrt{gd}} \right)^{3/2} \quad (4.57)$$



Slika 4.71: Diranov dijagram za procenu kritične brzine taloženja, prema [85, 258].

gde je: I_{em} – nagib linije energije u slučaju mešavine, I_e – nagib u slučaju „čiste vode”, D – prečnik cevi, d – prečnik zrna, a V_m – brzina tečenja mešavine. Desna strana jednačine (4.57) u literaturi se označava sa Φ_D („Duranov parametar”).

Nagib linije energije u slučaju čiste vode računa se, kao što je poznato, pomoću izraza [134]:

$$I_e = \frac{\lambda}{D} \frac{V^2}{2g}, \quad (4.58)$$

gde je: λ – koeficijent trenja, čija vrednost zavisi od materijala od koga je cev izlivena. Za proračun vrednosti λ može se koristiti poznati obrazac Kólbuk-Uajta (Colebrook, White) [134]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,71 D} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right), \quad (4.59)$$

gde je: k – apsolutna ekvivalentna rapavost.

■ **Primer 4.17.** Sračunati potrebnu snagu pumpe za hidraulički transport izbagerovanog peska ako su dati sledeći podaci: pesak je uniformne krupnoće prečnika $d = 0,5$ mm, sa brzinom tonjenja $W = 0,06$ m/s; za transport se koristi čelična cev prečnika $D = 203$ mm (8”), apsolutne rapavosti $k = 0,05$ mm. Dužina transporta do odlagališta iznosi $L = 50$ m. Predviđa se transport sa zapreminskom koncentracijom od $C = 10\%$ i kapacitetom od 400 m³/h.

Rešenje. Gustina transportovane mešavine iznosi: $\rho_m = 1,165$ t/m³. Sa dijagrama na Slici 4.71 se očitava vrednost $F_L = 1,4$. Sledi: $V_L = 3,59$ m/s. Brzina mešavine u cevovodu mora biti veća, na primer, $V_m = 4,5$ m/s. Tada je protok mešavine: $Q_m = V_m (D^2 \pi / 4) = 0,146$ m³/s = $525,6$ m³/h (> 400 m³/h).

Pretpostavljajući da je vrednost koeficijenta viskoznosti vode $\nu = 1 \times 10^{-6}$ m²/s, a brzina vode jednaka brzini mešavine, dobija se vrednost Rejnoldsovog broja: $\text{Re} = D V_m / \nu = 913500$.

Za relativnu ravnost $k/D = 0,000246$, rešavanjem jednačine (4.59) dobija se: $\lambda = 0,015$, a primenom izraza (4.58), $I_e = 0,076$. Sledi: $\Phi_D = 4,30$, $I_{em} = I_e(1 + C\Phi_D) = 0,109$.

Razlika energetskih kota: $\Delta E = I_{em}L = 5,45$ m. Pretpostavljajući vrednost koeficijenta korisnog dejstva pumpe: $\eta = 0,69$, konačno se dolazi do potrebne snage pumpe [134]: $S = (\rho_m g Q_m \Delta E)/\eta \approx 13,2$ kW.

Prikazani primer može poslužiti da se objasni pojam „*efikasnost bagerskog postrojenja*”. Ovu efikasnost određuje najmanja cena ukupnih troškova bagerovanja (po jedinici mase izbagerovanog materijala), dok *efikasnost pumpe* određuje najmanja cena uložene energije.

Kako su gubici energije proporcionalni kvadratu brzine mešavine u cevovodu, moglo bi se zaključiti da su velike brzine ekonomski nepoželjne. Međutim, pri velikim brzinama ostvaruje se veći učinak i povećava efikasnost bagerovanja. Ali samo do određene granice. Na primer, pri brzinama $3 \div 4$ m/s, gubici u cevovodu su obično mali, ali je mali i transportni kapacitet cevovoda. Ali, već pri brzinama $6 \div 7$ m/s može se desiti da trenje u cevi bude dovoljno veliko da u potpunosti poništi korist od povećanog transportnog kapaciteta.

4.8.3 Odlaganje izbagerovanog materijala

Izbor optimalne varijante odlaganja izbagerovanog materijala zasniva se na razmatranju zaštite životne sredine i troškova bagerovanja. Kako se uslovi za transport i odlaganje menjaju tokom vremena, neophodno je izraditi *dugoročni plan* bagerskih radova, koji, ne samo treba da definiše ekonomski i tehnički optimalnu opremu i tehnologiju rada, već i da zadovolji ekološke uslove i stekne podršku šire javnosti.

Postoje tri osnovne alternative odlaganja izbagerovanog materijala: (i) ispuštanje u otvoreni tok, (ii) odlaganje u zatvorenoj deponiji i (iii) formiranje staništa [245].

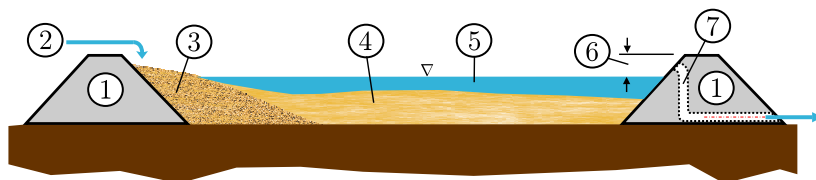
Ispuštanje u rečni tok. Pri hidrauličkom bagerovanju stvara se kašasta mešavina koja se, pod određenim uslovima, može direktno ispuštati u rečni tok. Disperzija ove mešavine se odvija tako što se krupnije frakcije (šljunak, pesak, grumeni gline) direktno talože na mestu ispuštanja, nešto finije frakcije formiraju na dnu kupasto uzvišenje kružne ili eliptične osnove, dok $1 \div 3$ % najsitnijih frakcija odlazi nizvodno u vidu tzv. „mutne struje”, ili „perjanice”. Ovaj fenomen se može numerički simulirati pomoću odgovarajućih softvera, kao što je prikazano na Slici 4.72.

Odlaganje u zatvorenoj deponiji. Čvrsta faza mešavine koja se ispušta u nasipom ograničeni prostor čini zatvorenu deponiju izbagerovanog materijala, dok se tečna faza – voda, izdvaja i ispušta van tog prostora (Slika 4.73).

Zatvorene deponije moraju da obezbede skladišni kapacitet za izbagerovani materijal i da, kao taložnik, omogućće efikasno taloženje materijala posle istakanja mešavine iz dovodnog cevovoda. Pri dugotrajnom neprekidnom bagerovanju, dotok mešavine u deponiju i oticaj vode iz nje su približno jednaki.



Slika 4.72: Bagerovanje Čukaričkog zaliva na reci Savi u Beogradu; levo: računaska mreža i mesto ispuštanja izbagerovanog materijala; desno: numerička simulacija lokalnog zasipanja korita posle 465 sati neprekidnog bagerovanja pri protoku male vode ($500 \text{ m}^3/\text{s}$) [121].



Slika 4.73: Presek kroz zatvoreno odlagalište izbagerovanog materijala: 1 – nasip; 2 – istakanje mešavine iz dovodnog cevovoda; 3 – istaložene krupne frakcije; 4 – istaložene sitne frakcije; 5 – izdvojena voda; 6 – nadvišenje; 7 – preliv i odvod, (prema [245]).

Zatvorene deponije se koriste godinama, puneći se periodično u toku svog projektovanog životnog veka. Na dugoročni kapacitet ovih deponija utiče isušivanje i konsolidacija izbagerovanog materijala, sleganje podloge i upravljanje deponijom. To uključuje i mere za ubrzanje sušenja mulja, kao što je na primer, primena dodatnih kaseti za povećanje površine isparavanja i isušivanja [245, 246].

Uticaj na životnu sredinu. Planiranje i projektovanje odlagališta izbagerovanog materijala mora uzeti u obzir i nepovoljne uticaje na životnu sredinu. U bagerovanom nanosu mogu se naći teški metali i razne toksične materije. Širenje zagađenja iz deponije javlja se kao posledica ispuštanja vode u procesu odlaganja, infiltracije u podzemne vode, spiranja površinskog sloja i posredstvom lanca ishrane, preko biljaka i životinja. Mere za sprečavanje širenja zagađenja obuhvataju: smanjenje suspendovanog sadržaja u vodi, postavljanje nepropusne obloge, pokrivanje zagađenog nanosa slojem „čistog” tla (nanosa) i sađenjem vegetacije koja može da uspori ili spreči kruženje zagađivača na prostoru oko deponije.

Procena zagađivačkog potencijala odlagališta obavlja se analizom oksidaciono-redukcionih uslova i fizičko-hemijskih parametara, kao što su pH i sadržaj gline i organskih materija. Cilj je sprečavanje oslobađanja toksičnih materija zadržanih na rečnom nanosu, u procesu fizičko-hemijskih i bakterioloških procesa na mestu odlaganja. Naročito je opasan izbagerovani nanos koji posle dugotrajnog dreniranja i oksidacije dobija karakter izrazito kisele sredine.

Metode za određivanje zagađivačkog potencijala obuhvataju:

- hemijske testove toksičnih materija rastvorenih u vodi;
- hemijske testove za poređenje nanosa u reci i nanosa na odlagalištu i
- biološke testove efekata zagađenja na određene organizme.

Detalji ovih ispitivanja mogu se naći u specijalizovanoj literaturi, npr. [245, 246].

Rehabilitacija deponija. U ovom slučaju, termin „rehabilitacija” može imati tri značenja: (i) korišćenje isušenog materijala kao resursa, sa povećanjem zapremine deponije za prijem novih količina izbagerovanog materijala; (ii) uklanjanje isušenog materijala da bi se prostor deponije vratio u svoje prvobitno prirodno stanje i (iii) konzervacija i uređenje prostora deponije kako bi se priveo nekoj drugoj nameni (poljoprivredi, industriji, rekreaciji i dr.).

Isušeni izbagerovanim materijal predstavlja resurs koji ima komercijalnu vrednost i može se koristiti za popunjavanje prirodnih depresija, nasipanje otvorenih kopova po završetku njihove eksploatacije, prihranu poljoprivrednog zemljišta, radove u građevinarstvu itd.

U svetu se mnogo radi i na korišćenju izbagerovanog materijala kao substrata za biološki aktivna biljna i životinjska staništa. Ovaj pristup ima naročito veliki značaj u urbanim područjima, gde nailazi na podršku javnosti (Slika 4.74).



(a)

(b)

(c)

Slika 4.74: *Rehabilitacija deponije izbagerovanog materijala; a – ubacivanje mešavine u deponiju; b – prva faza rehabilitacije: isušivanje mulja; c – druga faza rehabilitacije: pejzažno uređenje prostora.*

Glava 5

Naturalno uređenje vodotoka

Krajem dvadesetog veka postala je aktuelna nova doktrina u uređenju malih vodotoka, označena kao „naturalno uređenje vodotoka”. Komplementarni termin – „renaturalizacija vodotoka” odnosi se na rekonstrukciju ranije regulisanih vodotoka, na principima naturalne regulacije. Oba pojma su obuhvaćena sintagmom „*Uređenje vodotoka u skladu sa životnom sredinom*”, koja odražava suštinu ovog pristupa.

Naturalno uređenje vodotoka podrazumeva uređenje koje je u fazi projektovanja zasnovano na klasičnim postupcima hidrološke, hidrauličke i morfološke analize, ali u fazi realizacije uvodi primenu određenih ekoloških i estetskih principa u pogledu izbora trase, oblika poprečnih profila i materijala za izradu regulacionih građevina. Ukratko, naturalno uređenje podrazumeva ispunjenje svih klasičnih ciljeva regulacije vodotoka, ali na način koji je *ekološki* povoljan za rečno korito i priobalje.

Nova paradigma uređenja vodotoka se može dočarati i na sledeći način: „Klasičnu regulaciju reka čine one 'funkcionalističke' regulacione intervencije koje su vodile računa isključivo o zaštiti od velikih voda i fiksiranju obala, dok je potpuno zanearena ekološka, estetska i socijalna valorizacija reke kao biotopa i dela životne sredine. To je čest slučaj kod manjih vodotoka koji, okovani u beton, više i ne liče na reke – najdragoceniji biotop – već su postali otvoreni kolektori u kojima ni najprostiji oblici biocenoza ne mogu da obitavaju... Konceptija naturalne regulacije reka miri čovekove potrebe za funkcionalizmom i bezbednošću sa zahtevima ekološke, estetske i socijalne valorizacije i oplemenjavanja reke i čitavog dolinskog prostora koji čini nedeljivu celinu sa njom” [38].

Pomenuta „Renaturalizacija vodotoka” podrazumeva preuređenje ranije regulisanih vodotoka u stanje koji je slično njihovom prvobitnom prirodnom stanju. Umesto pravolinijskih kanala okovanih u betonu, vraćaju se regulacioni elementi (krivolinijska trasa, poprečni/podužni profili i građevine) koji će povratiti kvalitet rečnog korita i priobalja u ekološkom, rekreativnom i estetskom smislu.

5.1 Rečni ekosistemi

Rečni ekosistemi su predmet izučavanja *vodne ekologije*¹. Reč je o izučavanju vodene flore i faune, kao i njihovog odnosa sa životnim okruženjem – rečnim tokom, plavnim priobaljem (vlažnim staništima), jezerima i akviferima. Ova višedisciplinarna naučna oblast obuhvata hidrobiološka izučavanja životnih zajednica (biocenoza), kao i uticaja režima voda (hidrološkog, hidrauličkog, toplotnog, hemijskog i dr.) na ove zajednice.

Rečni ekosistemi su samoprilagodljivi i sastoje se od tri podsistema: fizičkog, biološkog i antropogenog. Fizički podsistem se bavi: uticajima na hidro i morfodinamiku vodotoka. Biološki podsistem se bavi procesima koji utiču na vodene žive organizme, a antropogeni podsistem, socioekonomskim problemima izazvanim ljudskom delatnošću. Za inženjere koji se bave regulacijom reka je nužno poznavanje (u izvesnoj meri) bioloških procesa u rečnim ekosistemima.

Lanac ishrane. Neki organizmi ekosistema proizvode organske materije iz neorganskih izvora. Drugi, koriste biomasu, dok treći redukuju organske materije na neorganske materije. Primarnu produkciju organske materije obavljaju biljke putem fotosinteze, a sekundarnu, beskičmenjaci, koji se, kao primarni „potrošači”, hrane biomasom nastalom u primarnoj produkciji. Sekundarni „potrošači” se hrane primarnim, što govori o intenzivnoj interakciji između ekoloških podsistema.

Raznovrsnost. Stabilnost ekosistema zavisi od raznovrsnosti (diverziteta) organizama. Što je raznovrsnost (koja se meri brojem vrsta i klasa organizama), veća, ekosistem je stabilniji. Povećanjem hranljivih resursa koji su zajednički za više vrsta organizama, raznovrsnost ekosistema se može unaprediti.

Poremećaji i stabilnost. Poremećaje ekosistema, koji se manifestuju kroz prekid u lancu ishrane i smanjenje raznovrsnosti, izazivaju razni prirodni ili antropogeni uticaji. Tipični primeri su: fluvialna erozija korita i obala usled skraćivanja trase, destruktivno dejstvo leda, seča priobalne vegetacije, pregrađivanje korita i dr. Stabilnost ekosistema se meri njegovom otpornošću na poremećaje. Stabilne ekosisteme karakteriše mala promenljivost veličine i vrste biološke populacije tokom vremena. Osetljivost ekosistema na promene vezana je za prostornu razmeru i vreme oporavka. Najosetljiviji na promene su mikro životna okruženja (mikrohabitat). Sa porastom prostorne razmere – od rečne deonice do cele reke i sliva – opada osetljivost vodnog ekosistema na promene, ali raste potrebno vreme obnavljanja i oporavka, koje se meri decenijama.

¹Ekologija je „nauka o životnoj sredini, odnosno naučna disciplina koja proučava raspored i rasprostranjenost živih organizama i biološke interakcije između organizama i njihovog okruženja” [284]. Nešto šira definicija: „ekologija je grana biologije koja se bavi odnosom živih bića sa njihovim okolinom – habitatom” [285], a još šira definicija upućuje na „naučno istraživanje procesa koji utiču na raspored i mnoštvo organizama, međusobnu interakciju tih organizama, kao i vezu organizama sa transformacijom fluksa energije i materije” [286].

5.1.1 Biljne i životinjske zajednice

U opisu rečne flore i faune počeo se od termina *plankton*² koji se odnosi na organizme veličine manje od oko 1 cm, koji pretežno lebde u vodi. Opstaju pri malim brzinama toka ($\ll 1$ m/s). Dele se na *fitoplankton* – biljnu komponentu koju pretežno čine alge i *zooplankton* – životinjsku komponentu, koju pretežno čine rakovi, larve crva, glista i drugih mekušaca. Produkcija planktona je najveća leti i u jesen.

Fitoplankton se najčešće sastoji od *autotrofnih*³ organizama koji organske spojeve u svom telu grade (sintetišu) isključivo od neorganskih sastojaka. Radi se o biljkama koje, posredstvom sunčane svetlosti, u procesu fotosinteze grade nove organske materije. Autotrofni organizmi se označavaju kao „proizvođači” organske materije u vodi. Nasuprot njima, *heterotrofni* organizmi (biljojedi i mesojedi) koriste organske materije za svoj opstanak i razvoj, pa se označavaju kao „potrošači” organske materije u vodi. Heterotrofni organizmi su najveći potrošači ugljenika organskog porekla.

Perifiton je složena mešavina algi, bakterija, heterotrofnih mikroba i čestica organskog nerastvorenog materijala. Predstavlja značajan izvor hrane za beskičmenjake, žabe i neke ribe. Perifiton odstranjuje ili ograničava kretanje zagađene materije u vodi, pa je stoga pouzdan indikator kvaliteta vode.

Alge. Rastu u vidu tankog sloja na površini stena i muljevitih naslaga, a ređe, na površini plitke vode, ili biljaka. Na rast algi utiču brojni faktori. Pri velikim brzinama toka (> 5 m/s) alge bivaju sprane, odolevaju samo posebne vrste koje su čvrsto vezane za podlogu. Za alge je pogodnija podloga od peščara od podloge od krečnjaka. Vrsta algi je uslovljena temperaturom i svetlošću. Za neke vrste je pogodan gornji rečni tok, sa nižim temperaturama vode (npr. *Diatoma hiemale*), dok drugim vrstama više odgovara donji tok sa višim temperaturama (npr. *Chrysonobula*). Neke alge dugo opstaju u mraku (npr. *Ulothrix*), dok druge ne mogu bez jakog svetla (npr. *Cladophora glomerata*). Na alge utiče i hemijski sastav vode, naročito pH faktor. Od značaja su i hidrološki uslovi; rast algi je vezan za periode malih voda i bistre, nezamućene vode. Neke alge odolevaju velikim vodama (npr. *Rhodophyta*), dok druge stradaju pri pokretanju i kotrljanju kamena na kome su izrasle (npr. *Achnanthes*). Alge su hrana za određene vrste beskičmenjaka i riba [148].

Mikroorganizmi. Već su opisani u kategoriji fitoplanktona kao autotrofni organizmi koji sami stvaraju organsku materiju od neorganske materije, ili kao heterotrofni organizmi koji u pogledu ishrane zavise od autotrofnih organizama. U lancu ishrane, autotrofni organizmi koriste ugljendioksid i vodu da bi proizveli kiseonik i složena organska jedinjenja, uglavnom kroz proces fotosinteze. Sadržaj kiseonika u vodi je od ključnog značaja za kvalitet rečne vode i opstanak živog sveta u njoj.

²Od grčkog naziva za „putnika” ili „lualicu”.

³Termin je grčkog porekla i znači „hrani se sam”.

Heterotrofni organizmi, koji razlažu organske materije u neorganske, obuhvataju većinu bakterija, neke alge, gljive, niže vrste biljaka bez hlorofila i sve životinje.

Više biljke. Ove biljke spadaju u *makrofitsku vegetaciju* i karakteriše ih proces fotosinteze [148]. Mogu imati koren u tlu ili pod vodom (trska), a lisnati i reproduktivni sistem, na površini vode (lokvanj) ili ispod nje (drezga). Brzina toka ima najveći uticaj na sastav i lokaciju makrofita. Neke vrste (npr. *Myriophyllum spicatum*) opstaju u bujičnim vodotocima, dok druge (npr. *Elodea canadensis*), rastu isključivo u mirnoj vodi. Velika zamućenost vode smanjuje intenzitet osvetljenja i tako nepovoljno utiče na rast ovih biljaka. Biljke koje rastu pod vodom primaju manje svetla i zbog refleksije na površini vode, kao i zbog senke koju baca drveće na obalama. Makrofiti po pravilu ne rastu u dubokoj vodi. Ova vrsta vegetacije buja u prolećnom i jesenjem periodu, a odumire zimi.

Biljke na obali mogu biti u obliku drveta, žbuna i trave (videti prethodna poglavlja). Imaju vitalnu ulogu za opstanak mikro beskičmenjaka i riba, obezbeđujući utočište, organske nutrijente (opalo lišće) i zaštitu od visokih temperatura.

Mikro beskičmenjaci. Ovi organizmi se hrane biomasom (stvorene putem fotosinteze) i pretvaraju je u ugljen dioksid [148]. Neke vrste su karakteristične za brze tokove (npr. *Ancylus fluviaritis*, *Baetis carpathica*), a neke, za spore tokove (npr. *Helicopsyche*, *Ameletus*). Neke vrste žive u hladnoj, a neke, u toploj vodi. Neki beskičmenjaci su prilagođeni kamenitom ambijentu, zaklonjeni od turbulencije toka između krupnih kamenih komada (npr. *Ancylus*), dok drugi nalaze utočište u pesku i mulju (npr. *Ephemera danica*, *Goniobasis*). Ovi organizmi se takođe dele na one koji zahtevaju više svetla i one kojima prija hladovina, kao i na one kojima je neophodan kiseonik (ovazdušeni tok – brzaci) i na one koji opstaju sa malo kiseonika (ustajala voda – tišaci).

Ribe. Mogu biti *reofilne*, prilagođene hladnim, brzim tokovima sa velikom koncentracijom rastvorenog kiseonika, i *limnofilne*, prilagođene oskudici kiseonika i relativno visokim temperaturama vode. Tipični predstavnici prve vrste su *salmonide* – losos (*Salmo salar*) i potočna pastrmka (*Salmo trutta*), a druge vrste, *ciprinide* – deverika (*Abramis brama*), linjak (*Tinca tinca*) i šaran (*Cyprinus carpio*). Za naše srednje brze tokove karakteristične vrste su: smuđ (*Sander lucioperca*), karaš (*Carassius*), grgeč (*Perca fluviatilis*), som (*Silurus glanis*), mrena (*Barbus fluviatilis*), klen (*Squalius cephalus*), skobalj (*Chondrostoma nasus*) (Slika 5.1).



Slika 5.1: Neke vrste naših riba; s leva u desno: klen, karaš, grgeč, mrena.

Salmonidama prijaju kamenita, a ciprinidama, šljunkovita i peskovita rečna korita. Obe vrste opstaju u relativno širokom dijapazonu pH vrednosti.

Konkurencija i interakcija između pojedinih vrsta utiče na njihovu zastupljenost. Veća raznovrsnost riblje populacije odražava veću toleranciju između pojedinih vrsta. Za ekosistem je od važnosti i odnos riba sa drugim živim organizmima; one mogu biti žrtve parazita (protozoa), ili hrana za ptice, reptile i sisare.

Rečne životne zajednice imaju promenljive oblike. Gornje tokove reka naseljavaju organizmi koji se prilagodili specifičnostima ovog dela rečnog toka – šljunkovitom koritu, velikoj brzini toka, niskoj temperaturi vode (leti $10 \div 15^\circ\text{C}$) i puno rastvorenog kiseonika. Makrofitska vegetacija je slabo razvijena. Dominiraju modrozelenne alge i mahovine na kamenoj podlozi. Životinjski organizmi su prilagođeni velikoj brzini toka; većina ih boravi pri rečnom dnu, a neki imaju posebne organe za pričvršćivanje za podlogu. Zbog izražene brzine toka, ribe imaju hidrodinamički oblikovano telo i snažno mišićno tkivo. Gornji tok nosi i naziv „pastrmski”, ili „salmonidni”, jer ga karakterišu riblje vrste pastrmke i grgeča.

Životne zajednice srednjeg i donjeg toka prilagođene su peščanim i muljevitim dnom, umerenom brzinom toka, višoj temperaturi vode (leti $15 \div 25^\circ\text{C}$) i značajnoj koncentraciji suspendovanog nanosa koja smanjuje prozirnost vode. Makrofitska vegetacija svih oblika je veoma razvijena, naročito u plavnoj zoni. U dubljim slojevima rečnog toka nema zelenih biljaka, jer sunčana svetlost dopire samo do dubine od 2,5 m. Svaki deo rečnog toka je karakterističan po određenoj vrsti ribe; u srednjem toku to su na primer mrena, štika, manić, a u donjem toku, deverika, som i dr.

5.1.2 Rečni biohemijski procesi

Životne uslove u rečnom ekosistemu određuje niz fizičkih, hemijskih i bioloških faktora, koji su međusobno povezani jedinstvenim procesima. Najznačajniji fizički faktori vodenog ekosistema su: temperatura, gustina, viskoznost, osvetljenost, strujanje vode i hidrostatički pritisak. Najznačajniji hemijski faktori su: rastvorene soli, rastvoreni gasovi, kiselost, alkalitet i organske materije.

Rastvorene soli. U procesu površinskog oticanja usled padavina ili filtracijom kroz tlo, voda rastvara razne mineralne materije, koje se javljaju u vidu soli. Najznačajnije soli za život biljaka su jedinjenja azota (nitrati i nitriti) i fosfora (fosfati). Ova jedinjenja biljke unose u disovanom obliku, u vidu anjona ili katjona⁴. Soli azota i fosfora se često označavaju terminom „nutrijenti” (hranjive materije), jer ih biljke koriste za svoj rast.

Azot (N) je prisutan u vodi u obliku soli: nitrata (NO_3) i nitrita (NO_2), kao i u vidu otrovnih jedinjenja: amonijaka (NH_3) i amonijum jona (NH_4^+). Visoka koncentracija nitrita (NO_2) pogoduje eutrofikaciji – prokomernom bujanju biljaka, a time i degradaciji vodnog ekosistema. Izvor azotnih soli je tlo, u kome

⁴Podsetiti se elementarne hemije da je elektroliza proces razlaganja elektrolita pod uticajem jednosmerne struje, kada dolazi do uređenog kretanja jona (atoma ili grupe atoma kao nosilaca naelektrisanja), ka negativnoj elektrodi – katodi (katjoni) i pozitivnoj elektrodi – anodi (anjoni).

se ostaci uginulih živih organizama mineralizacijom pretvaraju u nitrite, a ovi u nitrate, koji su dostupni biljkama. Amonijak (NH_3) nastaje u procesu nitrifikacije i izlučivanjem mokraće vodenih životinja. Jedan deo bakterije oksidišu u oblik koji je dostupan biljkama. U velikim koncentracijama ($> 8 \text{ mg/L}$) amonijak je otrovan.

Fosfor (P) je prisutan u vodi u obliku soli fosfata, ali u mnogo manjim količinama od nitrata. Visoka koncentracija fosfora pogoduje razvoju fitoplanktona i ubrzava eutrofikaciju vodene sredine. Fosfati nastaju mineralizacijom (truljenjem) organskih materija i važni su za razvoj živih organizama, jer se nalaze u njihovoj plazmi i skeletu. Fosfate apsorbuju planktonski organizmi, a preko njih ribe.

U vodi su prisutni i elementi natrijum (Na) i hlor (Cl) u vidu soli NaCl. Nisu značajni za biljke, ali jesu za životinje, jer se nalaze u krvi i imaju važnu ulogu u regulaciji osmotskog pritiska. Od drugih vrsta soli, treba pomenuti rastvoreni kalcijum bikarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Zbog ove soli, rečni tokovi pripadaju tzv. hidrokarbonatnom, ili bikarbonatnom tipu voda. Podzemne vode mogu imati mnogo veće koncentracije soli od površinskih voda, pa se zovu „mineralne vode”.

Treba naglasiti da se u vodi mogu naći i izvesne količine *metala*, koji su neophodni za razvoj vodenih organizama, pa se zbog toga ponegde nazivaju „mikroelementi” ili „mikronutrijenti”. Na primer, magnezijum (Mg), koji ulazi u sastav hlorofila, u vodi se javlja u obliku rastvorljivog bikarbonata. Gvožđe (Fe), koje se nalazi u malim količinama, ulazi u sastav fermenta za disanje (hemoglobina), a kao katalizator, ima važnu ulogu u sintezi hlorofila. Drugi metali, kao što su cink (Zn), bakar (Cu), molibden (Mo), nalaze se takođe u malim količinama, ali su neophodni, jer ulaze u sastav enzima i hormona organizama.

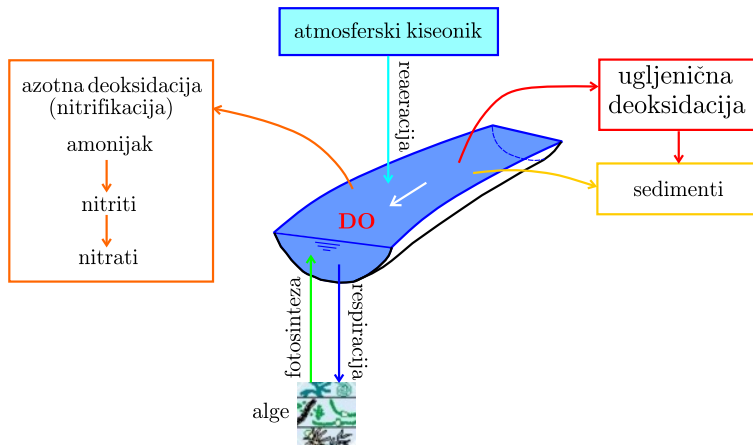
Međutim, prevelike količine metala predstavljaju opasnost za ekosistem. To se naročito odnosi na tzv. *teške metale* kao što su živa (Hg), olovo (Pb) i kadmijum (Cd). Velike, toksične koncentracije ovih metala najčešće su posledica korišćenja fungicida na plavnom poljoprivrednom zemljištu. U zagađenim vodnim ekosistemima, teški metali ne samo da narušavaju kvalitet vode, već se akumuliraju u organima životinja, što može dovesti do genetskih promena.

Rastvoreni gasovi. Za biohemijske procese ekosistema neophodni su gasovi rastvoreni u vodi, od kojih su najvažniji kiseonik (O_2) i ugljendioksid (CO_2).

Rastvoreni kiseonik (DO - eng. dissolved oxygen) je za opstanak ekosistema najvažniji. Naročito je neophodan vodenim insektima i ribama, koje zahtevaju koncentraciju DO od najmanje $3\div 4 \text{ mg/L}$. Voda apsorbuje kiseonik iz atmosfere i biljaka, putom fotosinteze. Gubitak DO nastaje usled respiracije vodenih biljaka i utroška od strane mikroorganizama i životinja. Vodeni organizmi su fiziološki prilagođeni dnevnim i sezonskim varijacijama DO, u zavisnosti od temperature, pritiska i količine soli. Neke vrste mogu opstati čak i pri kratkom deficitu DO.

Bilans DO zavisi od veličine vodene površine, turbulentnosti toka, priliva nutrijenata (ljudski faktor), bujanja i truljenja vegetacije (količine biomase). Koncentracija DO opada po dubini, tako da se u dubokim jezerima jasno uočava vertikalno raslojavanje („stratifikacija”) kiseonika.

Na proizvodnju DO u vodotoku utiče *reaeracija* (obnavljanje kiseonika) iz atmosfere i *fotosinteza* vodenih biljaka. Utrošak DO, izaziva *respiracija* biljaka i vodenih mikroorganizama. Pored pomenutih procesa, na bilans DO utiču: *ugljenična deoksigenacija* (uklanjanje) DO, *azotna deoksigenacija (nitrifikacija)* DO i utrošak DO u sedimentima (Slika 5.2).



Slika 5.2: *Procesi koji određuju bilans rastvorenog kiseonika DO* (prema [222]).

Reaeracija je osnovni izvor DO. Najveća koncentracija kiseonika koju vodotok može da primi pri određenoj temperaturi i atmosferskom pritisku zove se „koncentracija zasićenja”. Pri nižim koncentracijama od ove, kiseonik se molekularnom difuzijom prenosi iz atmosfere kroz površinu vode. Generalno, transfer kiseonika zavisi od veličine vodene površine, dubine, turbulentnije i prisustva regulacionih objekata koji intenziviraju mešanje vazduha i vode.

Vodne biljke proizvode kiseonik u procesu fotosinteze, pri čemu metaboličke funkcije održavaju prosti šećeri, azot (N), fosfor (P), sumpor (S) i još neki elementi. Životinjski organizmi opstaju na energiji koju oslobađaju biljke. U procesu koji je inverzan fotosintezi, ovi organizmi koriste biološki materijal putem oksidacije šećera, skroba i proteina za potrebe sopstvenog metabolizma i rasta. Ovaj proces, koji se sastoji od niza oksidoredukcionih reakcija, zove se „respiracija” i troši DO. Tome doprinosi i proces mineralizacije (truljenja) organskih materija.

Deficit kiseonika može nastati usled incidentnog priliva otpadnih voda, kao i u periodu ledostaja, kada led sprečava apsorpciju kiseonika. Sadržaj kiseonika je osnovni parametar kvaliteta vode.

Ugljendioksid CO_2 je neophodan kao izvor ugljenika koji biljke koriste u procesu fotosinteze. Ugljendioksid dospeva u vodu iz vazduha difuzijom ili posredstvom padavina, iz tla posredstvom podzemnih voda, kao i disanjem živih, odnosno truljenjem uginulih, organizama. Rastvoren u vodi, gradi slabu ugljenu kiselinu ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$). Ova kiselina rastvara krečnjak CaCO_3 i gradi rastvorljivi bikarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Hemijska svojstva vode, prvenstveno jonske reakcije (pH), zavise od odnosa količine ugljendioksida u vodi i u atmosferi. Kako taj odnos zavisi od pritiska i temperature, hemijska svojstva vode su posledica dinamike prirodnih procesa. Generalno, rečna voda je slabo alkalna, sa vrednostima pH nešto većim od 7.

Vodoniksulfid H_2S je prisutan u vodenim ekosistemima kao rezultat truljenja organskih materija koje su bogate belančevinama. Male količine bakterije mogu da oksidišu u sumpornu kiselinu H_2SO_4 , a odavde u soli koje koriste biljke. Međutim, u velikim koncentracijama H_2S je štetan gas, jer za oksidaciju zahteva veliku količina kiseonika, što dovodi do gušenja vodenih životinja.

Kiselost/bazičnost. Ovaj termin kolokvijalno označava koncentraciju vodonikovih jona pH. Za život i razvoj vodenih organizama neophodno je da vrednost pH bude optimalna ($7 \div 8$) i stabilna. Iz prethodnog opisa može se zaključiti da su rečne vode bikarbonatnog tipa i predstavljaju smeše slabih kiselina i njihovih soli. Veličina i stabilnost pH zavisi od odnosa ugljene kiseline H_2CO_3 , odnosno ugljendioksida CO_2 i bikarbonata $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; veća količina CO_2 smanjuje vrednost pH (povećava kiselost vode), što je nepovoljno za vodene organizme. Kisele vode su karakteristične za močvare. Treset, koji nastaje truljenjem biljaka, sadrži huminske kiseline. Samo mali broj vodenih organizama (neke mahovine i račići) mogu da podnesu kiselu vodenu sredinu. S druge strane, povećana bazičnost vodene sredine nema tako negativan uticaj na organizme ekosistema.

Alkalitet. Ovaj termin se odnosi na količinu bikarbonata $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ u vodi. Tekuće vode su neutralne ili slabo alkalne. Alkalitet sezonski varira (veći je zimi, a manji leti). Ovaj parametar se može koristiti kao indikator biološke raznovrsnosti ekosistema. Naime, samo mali broj organizama podnosi alkalne vode, jer ove (slično morskoj vodi) imaju veći hidrostatski (osmotski) pritisak.

Organske materije. Pored neorganskih soli, voda sadrži i organske materije. Najznačajniji je humus koji sadrži teško rastvorljive huminske kiseline. Otpadne vode unose razne organske materije, a prisutne su i aminokiseline izlučevina vodenih organizama. Fenoli, kao derivati nafte, štetni su jer se skupljaju u mišićnom tkivu riba. Štetni su i drugi zagađivači, kao što su pesticidi i deterdženti, jer ugrožavaju zdravlje vodenih organizama, a razliveni na površini vode, smanjuju apsorpcioni kapacitet za kiseonik iz vazduha. Organske materije razlažu mikroorganizmi (bakterije i gljive), kao i modrozelenne alge. Međutim, razlaganje organskih materija ima niz negativnih posledica po ekosistem; troši se značajna količina kiseonika, menja pH i povećava koncentracija soli. To može da podnese samo

mali broj vodenih organizama koji su nosioci samoprečišćavanja (autopurifikacije) vodotoka.

Razmena organske materije je tesno povezana sa energetske bilansom između vodnog ekosistema i spoljašnje sredine. U površinskim slojevima, alge i makrofit-ska vegetacija („proizvođači”) sintetisaju organske materije i vezuju sunčevu energiju. Ovo koriste drugi organizmi, koji, razlaganjem organske materije, doprinose kruženju materije i energije. U dubljim slojevima nema proizvodnje, već su prisutni razlaganje i mineralizacija do soli, koje, vertikalnim strujanjem vode i turbulentnim fluktuacijama, dospevaju u površinske slojeve i postaju dostupni „proizvođačima”. Na taj način se i energija transformiše iz hemijske u toplotnu energiju i u tom obliku, deo energije napušta ekosistem. Jedan deo organske materije takođe izlazi iz ciklusa; deo CO₂ se vezuje za nerastvorljivi kalcijum karbonat CaCO₃, a deo koji se u potpunosti ne mineralizuje (istruji), pretvara se u naftu.

5.1.3 Uticaj režima voda

Polazna osnova za upoznavanje ekosistema je upoznavanje sa karakteristikama sliva. Pored klasičnih „inženjerskih” podloga (topografskih, hidroloških, geomehaničkih, pedoloških i dr.), prirodno uređenje zahteva i podloge vezane za strukturu ekosistema na nivou četiri prostorne razmere: (1) globalne (sliv); (2) regionalne (podsliv); (3) rečne doline, plavnog priobalja i (4) lokalne (glavnog rečnog korita). Elementi lokalne razmere, koji su bitni kod prirodnog uređenja vodotoka, prikazani su na Slici 5.3.



Slika 5.3: Reka Karaš – elementi ekosistema u razmeri rečnog korita: 1 – tišak; 2 – brzak; 3 – koridor; 4 – naplav.

Pri malim i srednjim vodama, *tišaci* su relativno duboka mesta mirne vode, sa peščanim ili šljunkovitim dnom, pogodna za odmor i mrest riba i život beskičmenjaka. *Koridor* koji povezuje tišake, čini *brzak* (ili više njih), sa izraženom brzinom toka i zapenušanom površinom vode, koja ukazuje na povećanu koncentraciju rastvorenog kiseonika. Brzaci imaju pozitivan uticaj na kvalitet vode kako sa stanovišta prisutnih biotičkih faktora, tako i u smislu povećanja potencijala samo-

prečišćavanja samog vodotoka. Konačno tu je i vegetacija koja obezbeđuje: stabilnost obala, osenčenost korita, pogodnu temperaturu vode i *naplav* (na površini vode) kao biološki habitat i element u lancu ishrane.

Imajući navedene činjenice, potrebno je procese u rečnom koritu i priobalju razmatrati u širem kontekstu; pored hidrološko-hidrauličkih, psamoloških i geomorfoloških procesa, potrebno je uzeti u obzir biološke i biohemijske procese. Tek svi zajedno, ovi procesi određuju *dinamičku ravnotežu* vodotoka.

5.1.4 Uticaj regulacionih radova

Regulacija reke menja njenu geometriju i uzdužni nagib dna. Propusna moć regulisanog korita se povećava uklañjenjem vegetacije i krupnog kamena. Odbrana od poplava zahteva izgradnju nasipa koji sprećavaju priliv mulja i nutrijenata u inundacije. Seća šuma u priobalju pospešuje eroziju tla i remeti bilans rećnog nanosa. Sve to narušava ravnotežu rećnog i priobalnog ekosistema. Razmotrimo ovaj problem detaljnije.

Redovna posledica regulacionih radova je promena uzdužnog i poprećnog profila rećnog korita, praćena na nekim deonicama ubrzanjem toka i erozijom korita, a na drugim deonicama, usporenjem toka i zasipanjem korita. U oba slućaja, posledice po raznolikost i broj živih organizama (produkciju organske materije), mogu biti nepovoljne.

Posebno može biti ugrožena riblja populacija. Razaranjem sistema tišaka i brzaka nestaju mesta pogodna za odmor i mrest riba. Ubrzanje toka povećava pronos nanosa i zamućenost toka. S druge strane, deponije mulja uništavaju riblju ikru, a zatrpavanjem mesta koja su pogodna za mrest riba, ugrožena je reprodukcija riba.

Prevelika koncentracija suspendovanog nanosa nepovoljno utiće na lišće podvodnih biljaka, sprećavajući fotosintezu, a taloženje suspendovanog nanosa preko šljunćane podloge na dnu, zatrpava i ubija organizme koji žive na ovoj podlozi.

Uspostavljanje novog psamološko-morfološkog ravnotećnog stanja zahteva veoma dug, višedecenijski vremenski period, tako da i obnavljanje rećnog ekosistema traje decenijama, pri ćemu novi ekosistem ne mora imati iste karakteristike kao onaj pre regulacionih radova.

Uklanjanje priobalne vegetacije smanjuje otpornost obala na eroziju, smanjuje osenćanost vodenog ogleđala i povećava temperaturu vode, sa nepovoljnim uticajima na vodni ekosistem. Takođe se smanjuje kolićina biološkog otpadnog materijala (lišća i granja) koji je neophodan u lancu ishrane.

Uklanjanje vegetacije iz rećnog korita je pogubno za mikro beskićmenjake i ribe, jer se smanjuje kolićina i dostupnost hranljivih materija. Seća drveća i žbunja, kao i devastacija travnatog pokrivaća pri kretanju mehanizacije, nepovoljno deluju na ptice i mnoštvo drugih životinja u priobalju.

5.2 Projektovanje i tehnička rešenja

Treba naglasiti da se naturalno uređenje vodotoka prevashodno odnosi na relativno male i komercijalno neplovne vodotoke, kod kojih primena lokalno dostupnog biološkog materijala može da, uz povoljne finansijske i ekološko-estetske efekte, ispuni sve funkcije regulisanog vodotoka. Kod velikih reka, kao i vodotoka sa izrazito rušilačkim bujičnim karakterom, režim voda, nanosa i leda je takav da su mogućnosti primene principa naturalne regulacije u znatnoj meri ograničene. To znači da naturalno uređenje vodotoka treba primenjivati selektivno, u zavisnosti od veličine vodotoka, njegovog hidrološko-hidrauličkog režima, karakteristika priobalja (urbano/ruralno područje), ekoloških zahteva i mogućnosti realizacije (finansijska ograničenja, konfliktni interesi, podrška javnosti).

Naturalno uređenje vodotoka zasniva se na postizanju *dinamičke ravnoteže* vodotoka. U užem smislu, pojam dinamičke ravnoteže je ranije korišćen kao inženjerski pojam, koji opisuje psamološku i geomorfološku stabilnost korita. U širem smislu, taj pojam postaje i ekološka kategorija, jer opisuje *stabilnost i održivost habitata* – „prostorne jedinice životne okoline koja omogućava živim bićima da se hrane, kreću i razmnožavaju” [222]. U tom kontekstu, „dinamička ravnoteža” podrazumeva stabilnost stalno izmenljivog ekosistema, odnosno njegovu sposobnost da se prilagodi prirodno ili veštački nametnutim spoljašnjim uticajima.

5.2.1 Osnovna načela

Za naturalno uređenje malih vodotoka ključan je izbor: merodavnog protoka, trase i regulacionih građevina.

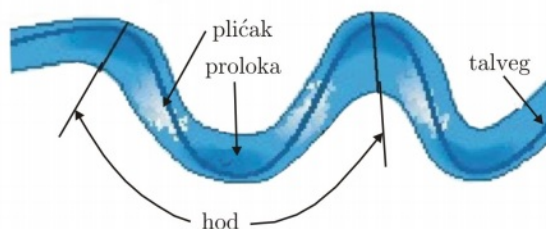
Merodavni protok. Pored uobičajenih hidroloških podataka, za naturalno uređenje vodotoka je važan podatak o najmanjem protoku koji obezbeđuje uslove za opstanak biocenoza u reci kao biotopu. Za ekološko upravljanje vodnim režimom koristi se tzv. „*Garantovani Ekološki Protok*” (GEP) koji „kvantitativno i kvalitativno obezbeđuje opstanak i razvoj akvatičnog ekosistema, posebno u kriznim periodima malih voda” [38]. Za njegovo određivanje koriste se hidrološki statistički podaci, hidraulički parametri, kriterijumi očuvanja prirodnih staništa i heurističke metode koje objedinjuju prethodne pristupe.

Od hidroloških podataka bitan je srednji višegodišnji protok, kao i protok mesečne male vode verovatnoće 95 % (uvećane za 20÷50 %). Garantovani ekološki protok (GEP) je zasnovan na prosečnom višegodišnjem protoku i sezonskim varijacijama malih voda, tako da obuhvata topli i hladni period godine, sa obezbeđenošću mesečnih malih voda od 80 %, odnosno 95 % [38].

Od hidrauličkih parametara, bitni su: brzina toka, dubina i okvašeni obim pri malim vodama. GEP se vezuje za prelomnu tačku na početku krive zavisnosti okvašenog obima od protoka $O(Q)$; ova tačka se smatra donjom granicom protoka za opstanak eko staništa. Pri tome su od posebnog interesa plitke deonice, koje su kritične za opstanak riblje populacije.

Trasiranje vodotoka. Pri trasiranju regulisanog korita teži očuvanju prirodne trase, koja se formirala u dugotrajnom periodu. Teži se očuvanju svih aktivnih meandera i starača. Isto se odnosi i na deonice razuđenih brdskih vodotoka. Ne treba sprečavati račvanja toka, jer ona doprinose biološkoj raznovrsnosti vodotoka.

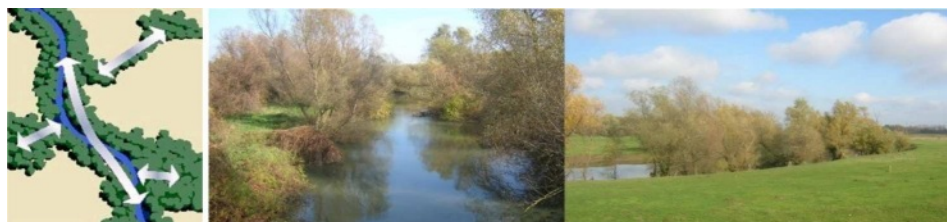
(1) U projektovanju novog korita što više koristiti geometrijske elemente postojećih krivina – poluprečnike, širine korita i uzdužne nagibe dna (KI-14.3). Važno je očuvanje broja hodova – ritma smene dubokih mesta u konkavama krivina i plitkih mesta duž konveksnih obala i u prelaznim deonicama (Slika 5.4). Biološka istraživanja su pokazala da je raspored proloka i plićaka duž vodotoka veoma važan za očuvanje biološke raznovrsnosti. Preporučena dužina hoda iznosi $5 \div 7$ širine punog korita.



Slika 5.4: Konfiguracija meandrirajućeg korita.

(2) Trasa regulisanog korita treba da obezbedi očuvanje prirodnih biotopa i opstanak specifičnih biljnih i životinjskih vrsta⁵. Pri povlačenju trase regulisanog korita voditi računa da se očuvaju stogletna stabla i zaštite istorijski značajni, posebno arheološki, lokaliteti.

(3) Regulacijom vodotoka ne sme se poremetiti prirodno *povezivanje habitata* (Slika 5.5), a tamo gde ne postoji, ili je narušeno, treba ga uspostaviti ili obnoviti. Povezani obalni pojasevi naturalno uređenog vodotoka i njegovih pritoka moraju biti pod vegetacijom, što je uslov za opstanak autohtone faune.



Slika 5.5: Povezivanje habitata [222], prisutno u slivu reke Karaš.

⁵Primer: u priobalju gornjeg Dunava kod Regenzburga, cela jedna mala močvara je (uz značajne troškove) „preseljena” nekoliko stotina metara nizvodno, da bi se sačuvala specifične biljne i životinjske vrste od izgradnje pristupne mostovske konstrukcije novog autoputa.

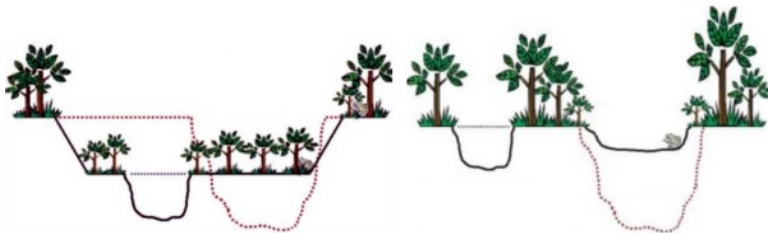
(4) Pri trasiranju regulisanog korita izbegavati prosecanje krivina, zbog mogućih nepovoljnih posledica. Povećanje brzine toka može biti iznad granice koja je tolerantna za žive organizme. Smanjenje dubina može ugroziti ekosistem i zadovoljenje rekreativnih potreba⁶. Seča vegetacije prilikom izvođenja radova ima takođe negativne ekološke posledice, koje se manifestuju kroz smanjenje: otpornosti obala na eroziju, količine biološkog otpada (lišća i granja) neophodnog u lancu ishrane i osenčenosti vodenog ogledala (što utiče na porast temperature vode).

Poprečni presek. Pri određivanju oblika i dimenzija poprečnog profila prirodno regulisanog korita, ne uzimaju se u obzir samo hidraulički zahtevi u pogledu propusne moći, već i izvesni ekološki faktori. Pri dimenzionisanju korita za malu vodu, treba imati u vidu preporuke u pogledu minimalnih dubina sa biološkog i rekreacionog stanovišta, kao i u pogledu kvaliteta vode. Pri projektovanju korita za veliku vodu, posebnu pažnju treba pokloniti inundacijama u blizini naselja, koje treba zaštititi od urbanizacije i pretvoriti u zaštićene zone sa rekreativnim sadržajima (parkovi, šetališta, sportski tereni, biciklističke staze itd.). Tipični poprečni presek korita koji zadovoljava hidrauličke i ekološke uslove prikazan je na Slici 5.6.



Slika 5.6: Ugledni poprečni presek i izgled korita reke Karaš.

U slučaju da je neophodno rekonstruisati poprečni presek korita u cilju povećanja njegove propusne moći, begerovanje ne treba vršiti po celoj širini korita, već samo u njegovom centralnom delu, ili samo na jednoj strani korita. Na taj način se formira dvogubo korito koje stvara uslove za očuvanje prirodnih staništa i razvoj priobalne vegetacije. Varijantna rešenja formiranja dvogubog korita mogu se razmotriti i kada je u pitanju stabilizacija visokih strmih obala (Slika 5.7).



Slika 5.7: Ekološki usmerena rekonstrukcija poprečnog preseka sa ujednačenim iskopom i nasipanjem; levo: stabilno dvogubo korito sa spuštenim inundacijama; desno: plitko osnovno korito i vlažno stanište (polder) u inundaciji [37].

⁶Prema nekim preporukama, najmanja dubina za plovidbu čamaca bez motora iznosi 0,6 m, a čamaca sa motorom, 0,9 m.

Za naturalnu regulaciju nemoguće je nametnuti univerzalna pravila, mogu se samo dati izvesne smernice, ostavljajući projektantu da se njima rukovodi u rešavanju svakog konkretnog slučaja. Sumirajući ono što je prethodno rečeno, mogu se formulisati sledeće preporuke za projektovanje naturalno regulisanih vodotoka.

1. Obim regulacionih radova svesti na najmanju meru.
2. Svaka regulacija u određenoj meri menja hidraulički i psamološki režim vodotoka; kod naturalne regulacije se mora obratiti dodatna pažnja na reakciju vodotoka sa stanovišta opstanka prirodnih biotopa, kvaliteta vode i očuvanja ambijentne celine.
3. Pri regulaciji osnovnog korita postoji opasnost da se brzina toka u uslovima velikih voda poveća iznad granice koja je tolerantna za biljni i životinjski svet (ribe, pre svega); zbog toga se moraju osigurati delovi korita sa malim brzinama kao „zakloni” ili „odmorišta” za ribe. Raznovrsnost hidrauličkih uslova, od plitkih deonica (plićaka) do dubokih deonica (tišaka), pogoduje boravku i razmnožavanju živih bića u rečnom ekosistemu.
4. Psamološki režim treba da karakteriše prirodna segregacija nanosa i formiranje odgovarajućih nanosnih formacija i sprudova, jer to pogoduje opstanku organizama na dnu korita kojima se hrane ribe.
5. Izbegavati prosecanje krivina. Ako to nije moguće, težiti da se napušteni delovi korita – „starače” očuvaju kao ekološki rezervati.
6. Na ušćima bujičnih vodotoka sa velikim količinama istaloženog vučenog nanosa i zadržanog naplava (granja i raznog otpada), razmotriti izgradnju taložnika za nanos i odrediti lokaciju deponije naplava.
7. Ako se regulacijom ne može izbeći bagerovanje, posebnu pažnju treba posvetiti odlaganju iskopanog materijala, jer ovaj može sadržati štetne materije po okolinu. Razmotriti veličinu i položaj deponije sa stanovišta narušavanja ambijenta i uticaja na evakuaciju velikih voda. Predvideti biološku revitalizaciju deponije i mogućnost njene korisne upotrebe (park, biciklističke staze, sankalište itd.).
8. Očuvanje vegetacije je imperativ. Biljke u koritu omogućavaju zaklon i hranu za vodene organizme. Koristi od priobalne vegetacije su mnogostruke, od stabilizacije i zaštite tla od fluvialne erozije, do regulacije temperature vode i sadržaja kiseonika u njoj. Pri izvođenju radova voditi računa da mehanizacija što manje razori vegetaciju i da se ona, po završetku radova, što pre obnovi.
9. Ekološki prihvatljivo upravljanje vodama u naseljima je posebna tema. Ovde će se samo pomenuti praksa da se zelene površine parkova koriste kao privremene retenzije kišne vode, što štiti kanalizacione sisteme od prekomernog opterećenja i obezbeđuje delimično samoprečišavanje zadržanih voda [119].

5.2.2 Regulacione građevine

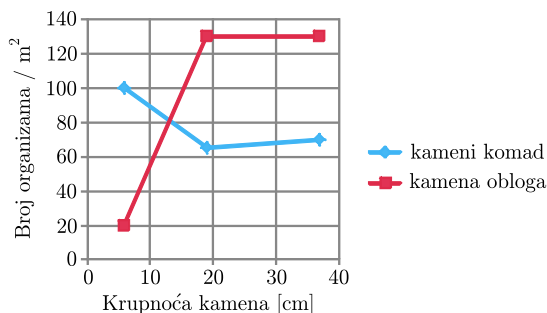
U prethodna dva poglavlja već su prikazani tipovi regulacionih građevina koji su zasnovani na korišćenju kamena i biomaterijala i kao takvi, ispunjavaju specifične zahteve naturalnog uređenja vodotoka. U nastavku se prikazuju još neki tipovi građevina koji ispunjavaju ove zahteve, uz objašnjenje na koji način takve građevine funkcionalno doprinose ostvarenju ekoloških ciljeva.

5.2.2.1 Zaštita obala od erozije

Nema nikakve sumnje da je primena ranije prikazanih biotehničkih mera zaštite obala od erozije od ključnog značaja za naturalno uređenje vodotoka. Velike su i mogućnosti kombinovanje biotehničkih mera sa korišćenjem prirodnih materijala za izradu obaloutvrda (kamen, kolje, popleti od pruća, drvene oblice, gabionski madraci sa biljnim zasadom itd.). Beton i čelik se ne uklapaju u prirodni ambijent i nisu poželjni u naturalnoj regulaciji vodotoka.

Jednostavne obaloutvrde od kamenog nabačaja imaju finansijske i ekološke prednosti. Imaju pozitivne efekte na akvatične organizme i očuvanje biološke raznovrsnosti, što se može razmatrati na mikro i makro planu.

Efekte u mikrorazmeri. Zaštićene površine oko kamenih blokova su veoma pogodne za razvoj akvatične faune – raznih vrsta beskičmenjaka. Razmena nutrijenata je u blizini kamene obloge intenzivna i neuniformna, što doprinosi biološkoj raznovrsnosti (Slika 5.8). Prisustvo finih čestica nanosa (krupnoće < 100 μ) pogoduje razvoju rečnog habitata na mikro nivou jer stvara pogodan substrat za razvoj algi. Sa stanovišta riblje populacije, pogodnije su blaže obale obložene kamenom, od prvobitnih strmijih obala, podložnih eroziji.



Slika 5.8: Uticaj krupnoće pojedinačnog kamenog komada i kamena u oblozi obaloutvrde na gustinu vodne faune [213].

Efekte u makrorazmeri. Pozitivni efekti obaloutvrda su veći kod širokih, nego kod uskih vodotoka. Prema nekim ispitivanjima, 1,30÷1,72 puta je veći broj raznih vrsta beskičmenjaka kod obala zaštićenih obaloutvrdama, nego kod obala u izvornom, prvobitnom stanju [213].

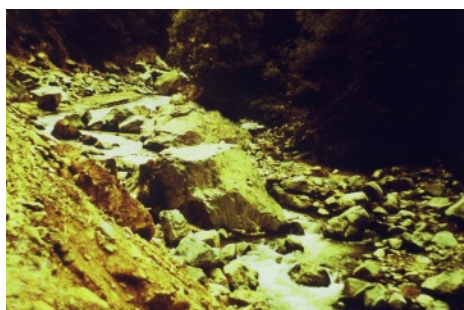
U naturalnom uređenju vodotoka, pored kamenih obaloutvrda i obaloutvrda od gabiona, zbog značajnih ekoloških i finansijskih prednosti, koriste se i obaloutvrde od drvene građe (Slika 5.9).



Slika 5.9: *Primeri korišćenja drvene građe u izradi obaloutvrda* [287, 210].

5.2.3 Kontrola uzdužnog nagiba dna korita

Usled velikih uzdužnih nagiba dna i brzina toka, korita planinskih vodotoka su izložena velikoj degradaciji. U kratkim periodima prolaska poplavnih talasa, energija toka je toliko velika da može pokrenuti stenske gromade (Slika 5.10), čupati drveće i odneti obale. Stabilizacija korita se rešava poznatim merama za smanjenje uzdužnog nagiba dna – izgradnjom pregradnih objekata (pragova, pregrada, kaskada, rampi).



Slika 5.10: *Korito reke Vlasine – posledice poplave 26-27.06.1988. god.; srušeno 120 kuća i 10 mostova, poplavljeno 150 ha i 3000 kuća, oštećeno 80 km puteva; hidrološka rekonstrukcija talasa: vršni protok 780 m³/s, povratni period 330 god.*

Pregradni objekti. Za ovu vrstu objekata (pragovi, prelivi, kaskade) najvažnije je fundiranje do dubine koja je veće od eroziona dubine. Drugi uslov je da postoji bazen za umirenje, koji omogućava ne samo disipaciju kinetičke energije toka, već i nesmetan prolaz riblje populacije. Prema podacima iz literature [210], namanja dubina bazena za umirenje treba da bude približno 1,25 denivelacije.

Za nesmetanu migraciju riba (o čemu će kasnije biti više reči), denivelacija na mestima pragova i preliva ograničena je na onu meru koje određena vrsta ribe može da podnese; tako na primer, za odrasle pastrmke i ribe iz klase salmonida, dozvoljena denivelacija iznosi 0,25÷0,30 m.

Pri izboru materijala vodi se računa o više faktora (konstruktivnoj stabilnosti, dostupnosti, ugradnji, ceni i uklapanju u okolni pejzaž). U šumovitom ambijentu treba koristiti drvo, a u kamenitom, kamen. Objekti od kamena (Slika 5.11) projektuju se po kriterijumima koji važe za kameni nabačaj. Krupnoća kamena se određuje na osnovu projektne brzine toka, nekim od empirijskih obrazaca, kao što je Izbašev obrazac (KI-9.2.3). Krupnoća kamena može se proceniti i na osnovu podataka iz Tabele 5.1, uz pravilo $d_{100}/d_{\min} \leq 3$.

Tabela 5.1: *Krupnoće kamena u zavisnosti od brzine toka* [210].

V (m/s)	$< 2,5$	$2,5 \div 3,0$	$3,0 \div 3,5$	$> 3,5$
d_{\min} (m)	0,2	0,3	0,5	0,8
d_{50} (m)	0,4	0,6	1,0	1,6
d_{100} (m)	0,6	0,9	1,5	$> 2,0$



Slika 5.11: *Kameni pragovi u sklopu naturalnog uređenja vodotoka*

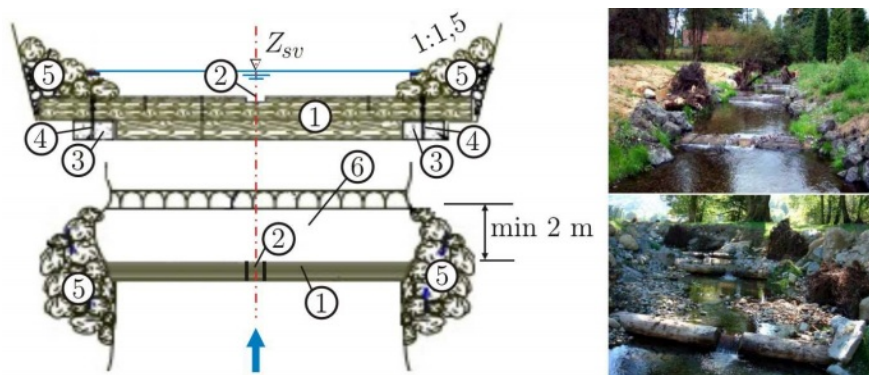
Na malim vodotocima se često primenjuju uzvodno usmereni kameni pragovi u obliku luka ili pragovi od kamenih ploča postavljenih u obliku slova „V” (Slika 5.12). Pri ugradnji vodi se računa o uklapanju i stabilnosti kamenih komada.



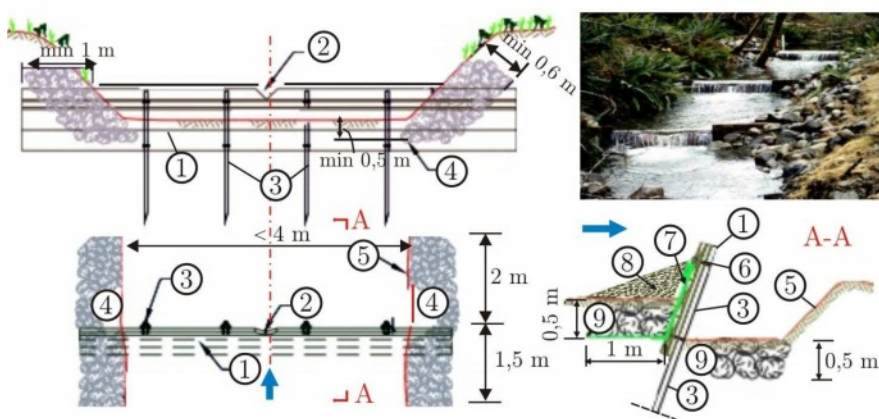
Slika 5.12: *Prelivi od kamena; levo: lučni preliv, a – podloga, b – upušten kamen kao otvor za malu vodu; u sredini: potopljen V preliv; desno: V preliv od kamenih ploča* [210, 37].

Pregradni objekti od drveta grade se od stabala i daščanih elemenata. Stabla – balvani postavljaju se po širini korita, upravno na obale ili pod nekim uglom. Potrebno je da korito ne bude previše strmo ($< 3\%$) i široko (< 10 m). Najjednostavniji pregradni objekat je upravni preliv od jednog balvana (Slika 5.13), ali

postoji mogućnost i drugih konfiguracija (više balvana, postavljenih pod uglom ili u obliku slova „V” i „K”).



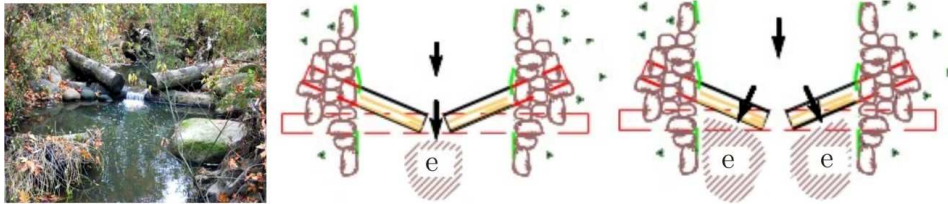
Slika 5.13: Upravni preliv od balvana; 1 – balvan na podlozi u vidu drvene grede; 2 – zasek za malu vodu; 3 – balast u vidu prefabrikovanih betonskih blokova; 4 – vezivni ankeri; 5 – obaloutvrda od kamenog nabačaja ($0,3 \div 0,6$ m); 6 – bazen za umirenje dubine $0,6 \div 1$ m [37].



Slika 5.14: Preliv od drvene građe; 1 – daske od četinarskog drveta; 2 – zasek za malu vodu; 3 – galvanizovane cevi pobijene pod uglom od 20° , najmanje 1 m ispod najniže kote dna; 4 – obaloutvrda od kamenog nabačaja; 5 – bazen za umirenje; 6 – anker sa navojima i maticama koji vezuje daske sa cevima; 7 – geotekstil; 8 – šljunčani balast; 9 – zaštita od krupnog kamena ($> 0,3$ m) [210].

Nedostaci ovakvih rešenja su potreba ankerovanja pomoću betonskih blokova i propadanje tokom vremena drveta koje nije stalno potopljeno. Kod malih vodotoka sa koritom u šljunkovito peskovitom materijalu, mogu se primeniti prelive od daščanih elemenata, kao što je prikazano primerom na Slici 5.14.

Usmerivači i skretači toka. Uloga ovih građevina je formiranje uspora – dubljih mesta u rečnom koritu koje riblja populacija može da koristi kao „odmorišta”. U hidrauličkom smislu, ove građevine deluju poput pragova i napera. Ima ih raznih oblika u planu, a grade se od drveta i kamena (Slike 5.15 i 5.16).



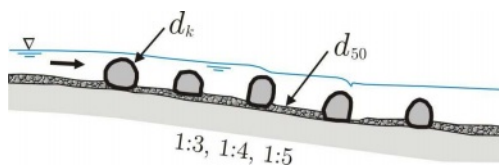
Slika 5.15: Obostrani drveni usmerivači za koncentraciju toka; pri malim vodama eroziona proloka (e) se nalazi na sredini korita, a pri velikim vodama eroziona proloka se pomeraju ka obalama [210].



Slika 5.16: Kameni skretac u obliku udice, sa ukoso položenim balvanima [37].

Kamene rampe. Koriste se kameni komadi čija je prosečna krupnoća nekoliko puta veća od srednje krupnoće materijala na dnu rečnog korita. Zadatak kamenih blokova nije samo da odole bujičnom udaru, već i da lokalno povećaju rapavost korita, sa pozitivnim hidrauličkim posledicama koje iz toga proističu (smanjenje brzine, veća turbulencija i rasipanje kinetičke energije, ovazdušenje toka).

Dimenzionisanje kamenih blokova je zasnovano na rezultatima modelskih ispitivanja [6]. Rezultati se odnose na rampe u nagibu 1:3, 1:4 i 1:5, sa nevezanim i vezanim kamenim blokovima (Slika 5.17). Obuhvaćena su dva slučaja: $d_k=3,3 d_{50}$ i $d_k=6 d_{50}$, gde je: d_k – srednji prečnik kamenih blokova, a d_{50} – srednji prečnik rečnog nanosa na dnu korita.



Slika 5.17: Rampa od (ne)vezanih kamenih blokova na podlozi od šljunka.

Analiza stabilnosti kamenih rampi zasnovana je na metodi kritičnog Šildsovog broja (KI-9.2.2-(9.16)), sa usvojenom vrednošću 0,06 (KI-9.9.2-SI:9.2).

Kako izvorni Šildsov dijagram važi za male nagibe dna, vrednost kritičnog Šildsovog broja se mora korigovati:

$$\Theta'_c = 0,06 k_1 k_3, \quad (5.1)$$

gde je: k_1 – „koeficijent nagiba dna” (KI-9.2.3-(9.34)), i k_3 – „koeficijent male potopljenosti” (KI-9.2.5-(9.57)):

$$k_1 = \cos \alpha_d - \frac{\sin \alpha_d}{\operatorname{tg} \phi'}; \quad k_3 = 1 + 0,67 \sqrt{\frac{d_{50}}{h}}.$$

Vidi se da na vrednosti navedenih koeficijenata utiču: ugao koji rampa zaklapa sa horizontalom α_d , krupnoća osnovnog materijala d_{50} , njegov ugao unutrašnjeg trenja ϕ' i dubina toka h . Dve napomene: (i) broj Θ'_c je računski parametar čija vrednost može biti daleko van opsega podataka na originalnom Šildsovom dijagramu i (ii) izraz za koeficijent k_3 je izveden za nagibe do 5 %, ali se pretpostavlja da važi i za rampe pod većim nagibom.

Stvarni bezdimenzioni tangencijalni nagib (Šildsov broj) zavisi od dubine toka na rampi h , njenog nagiba I_d i krupnoće osnovnog materijala d_{50} (KI-9.2.2-(9.16)):

$$\Theta = \frac{\tau_o}{g(\rho_s - \rho) d_{50}} = \frac{h I_d}{\Delta d_{50}}.$$

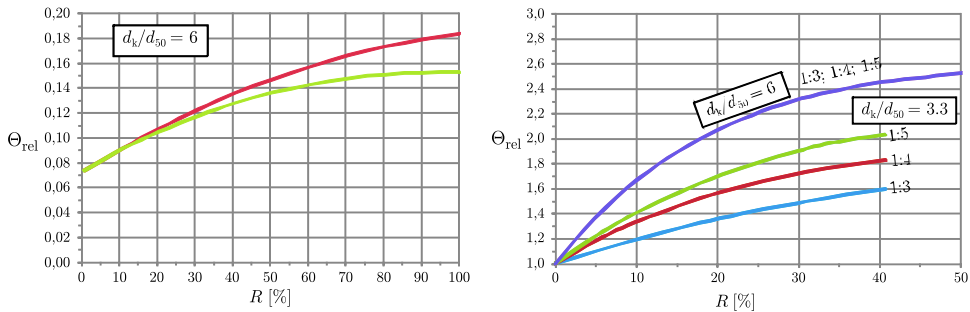
Najosetljiviji deo hidrauličke analize je procena dubine toka na rampi h . Čak i ako se pretpostavi ustaljeno i jednoliko strujanje na rampi, problem predstavlja procena apsolutne (i relativne) rapavosti, jer se radi o maloj potopljenosti kamenih komada sa značajnim uticajem ovazdušenja. U takvim uslovima definisanje rapavosti pomoću Maningovog koeficijenta nije moguće. Metoda za procenu dubine na strmoj podlozi velike rapavosti, koja je prikazana ranije u trećem poglavlju, 3.11.2.1, može se primeniti i u ovom slučaju.

Nakon proračuna kritičnog i stvarnog Šildsovog broja za osnovni materijal na rampi, potrebno je sračunati *relativni* Šildsov broj: $\Theta_{\text{rel}} = \Theta/\Theta'_c$, jer su rezultati eksperimentalnog istraživanja dati u bezdimenzionom obliku: $\Theta_{\text{rel}} = f(d_k/d_{50}, R)$, gde je R – procentualno izražena površina pod kamenim blokovima u odnosu na ukupnu površinu rampe. Empirijske zavisnosti prikazane su na Slici 5.18.

Za rampe sa nezvanim kamenim blokovima krupnoće $d_k/d_{50} = 3,3$ može se koristiti linearna zavisnost:

$$\Theta_{\text{rel}} = 1 + R/95 \quad (\Theta_{\text{rel}} \leq 2), \quad (5.2)$$

gde se stepen „pokrivenosti” kamenim komadima R zadaje u procentima.



Slika 5.18: Nomogrami za projektovanje rampi sa kamenim blokovima; levo: nezvezani kameni blokovi; desno: betonom vezani kameni blokovi, prema [6].

■ **Primer 5.1.** Projektovati rampu za stabilaciju korita jednog planinskog, bujičnog vodotoka, ako su dati sledeći podaci: širina korita $B = 10$ m, merodavni protok $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$, srednja krupnoća šljunčanog nanosa (materijala na dnu) $d_{50} = 0,2$ m ($\Delta = 1,65$).

Rešenje. Usvojiće se da je nagib rampe 1:5 ($I_d = 0,2$). Pretpostavljajući da je na rampi tečenje jednoliko sa jediničnim protokom $q = Q/B = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ i primenjujući postupak opisan u tački 3.11.2.1, određena je dubina na rampi $h = 0,23$ m ($h/d_{50} = 1,16$). Sledi: $\Theta = h I_d / (\Delta d_{50}) = 0,23 \cdot 0,2 / 1,65 / 0,2 = 0,14$. Uvodeći korekzione faktore: $k_1 = 0,73$ i $k_3 = 1,62$, vrednost kritičnog Šildsovog broja je: $\Theta'_c = 0,06 \cdot 0,73 \cdot 1,62 = 0,071$, a odgovarajuća relativna vrednost je: $\Theta_{rel} = \Theta / \Theta'_c = 0,14 / 0,071 = 1,97$. Ako se usvoji varijanta $d_k/d_{50} = 3,3$, što daje krupnoću kamenih blokova $d_k = 3,3 d_{50} = 3,3 \cdot 0,3 = 0,66 \approx 0,7$ m, dve su alternative:

(i) rampa sa nezvezanim kamenim blokovima; na osnovu izraza (5.2), za $\Theta_{rel} = 1,97$, dobija se $R = 92$ %, što znači da približno 90 % površine rampe treba „pokriti” kamenim blokovima krupnoće 0,7 m;

(ii) rampa sa (u betonu) zalivenim kamenim blokovima; sa dijagrama na Slici 5.18, za $d_k/d_{50} = 3,3$ i nagib 1:5, može se očitati $R = 37$ %, što znači da oko 40 % površine rampe treba da bude pod kamenim blokovima krupnoće 0,7 m.

5.2.4 Riblje staze

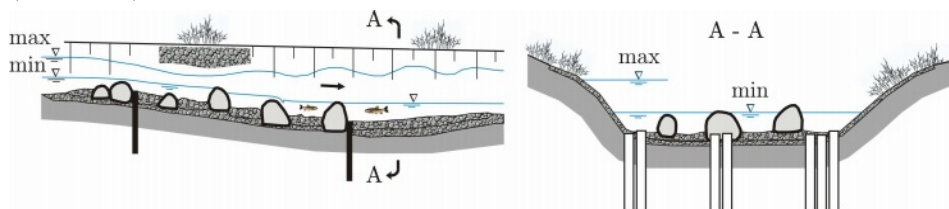
U kontekstu prirodno uređenih vodotoka, termin „riblje staze” označava regulisane deonice koje omogućavaju nesmetanu migraciju riba. Kod malih vodotoka, riblje staze, koje se projektuju tako da ispune određene hidrauličke i ihtiološke uslove, mogu da se formiraju regulacijom nepodesnih deonica i izgradnjom veštačkih ribljih prolaza na mestima pregradnih objekata, u vidu ribljih rampi ili zaobilaznih kanala. Kod velikih kanalisanih reka, riblje staze se grade u sklopu hidroenergetskih objekata i mogu imati razna konstruktivna rešenja („riblje lestve”, „riblje prevodnice” i dr. [182]). Ovakve – „tehničke” riblje staze ovde se neće razmatrati.

Uređene rečne deonice. Pri regulaciji strmih rečnih deonica, javlja se problem malih dubina, a velikih brzina toka. Tradicionalni pristup u regulaciji brdskih vodotoka, koji predviđa smanjenje uzdužnog nagiba dna pomoću kaskada, nije pogodan za riblju migraciju, pa se primenjuju razne varijante rampi od kamena (Slika 5.19).



Slika 5.19: *Primeri regulisanja uzdužnog nagiba rečnog korita pomoću rampi; levo: pogled nizvodno na rampu u koritu reke Murr (pritoke reke Neckar) u Nemačkoj [79]; desno: betonska rampa na reci Karaš.*

Tipične vrednosti uzdužnog nagiba kamenih rampi su $1:3 \div 1:10$. Na podlozi od šljunka ili geotekstila, postavlja se „tepih” od najmanje dva sloja lomljenog kamena (Slika 5.20).

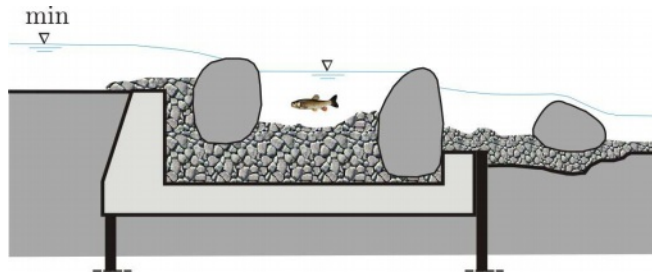


Slika 5.20: *Primer konstruktivnog rešenja kamene riblje rampe*

Donji sloj je od sitnijeg, a gornji, od krupnijeg kamena. Najmanja debljina sloja treba da bude jednaka dvostrukom prečniku najkrupnijeg kamena tog sloja. U podlogu treba ukomponovati krupne kamene blokove prečnika $0,6 \div 1,0$ m, u nepravilnom rasporedu. Kameni blokovi služe za usporavanje toka i formiranje dubljih mesta – „bazena”, pogodnih za odmor i boravak riba.

Dubina toka na kamenoj rampi treba da bude jednaka najmanje $1/3 \div 1/2$ denivelacije – razlike kota nivoa na uzvodnom i nizvodnom kraju rampe. Stablnost kamena osigurana je talpama (Slika 5.20). Nizvodno od rampe, korito je zaštićeno od erozije tepihom od kamena na dužini koja nije manja od 10 denivelacija, odnosno 5 m [34, 79]. Obale se štite od erozije oblogom od kamenog nabačaja i vegetacijom, koja doprinosi ekološkom i estetskom kvalitetu ambijenta.

Na Slici 5.21 pokazano je kako se postojeća betonska kaskada može, uz relativno male troškove, pretvoriti u kamenu rampu koja ispunjava hidrauličke i ihtiološke zahteve.



Slika 5.21: Pretvaranje postojeće betonske kaskade sa bazenom za umirenje u riblju rampu od kamena (prema [34]).

Na inženjerskom nivou, proračun ribljih rampi je veoma uprošćen. Koristi se Manningova jednačina ustaljenog jednolikog tečenja, sa empirijski definisanim otporima usled velike apsolutne rapavosti (KI-2.6,3.1,3.2). Pretpostavlja se da je poprečni presek trapeznog ili pravougaonog oblika.

Projektni uslovi se zasnivaju na izboru protoka, krupnoće, broja i rasporeda kamenih blokova, kao i najveće brzine toka koja mora biti u granicama fiziološke izdržljivosti riblje populacije.

U proračunu se uzimaju u obzir dva projektna protoka – male i velike vode. Protok male vode Q_{\min} se najčešće usvaja kao protok zastupljenosti 90÷95% na krivoj trajanja. Pri ovom protoku, dubina toka mora biti dovoljna da obezbedi nesmetano kretanje riba (najmanje 0,2 m), a najveća brzina toka mora biti ograničena (2 m/s).

Ograničenje brzine toka uslovljeno je mogućnošću ribe da savlada otpore pri kretanju. Naime, količnik pređenog puta (dužine rampe) i relativne brzine kretanja ribe (u odnosu na brzinu toka) daje potrebno vreme plivanja. Ako je to vreme veće od vremena zamora ribe, premašen je prag njene izdržljivosti i ona neće biti u stanju da prevale dato odstojanje. Postoje tri karakteristične brzine plivanja, u zavisnosti od vremena zamora i biohemijskih procesa koji snabdevaju mišićno tkivo neophodnim materijama [282, 283].

1. Na kritičnim deonicama ribe plivaju *kratkotrajnom* („eksplozivnom”) brzinom koju mogu održati samo nekoliko sekundi (najčešće 5÷6 s). Ova brzina zavisi od vrste riba.
2. *Neprekidnu* (produženu) brzinu kretanja većina rečnih riba može da ostvari od 15 s do 200 min.
3. *Trajna* (ustaljena) brzinu kretanja riba nema vremensko ograničenje.

Ribe optimizuju utrošak energije menjajući brzinu kretanja u skladu sa lokalnim uslovima [255]. Postoje podaci o karakterističnim brzinama plivanja raznih vrsta riba [280, 281, 282], kao i korelacije brzine plivanja sa vremenom zamora i dužinom ribe [63]. Tako na primer, trajna brzina plivanja pastrmki (*salmonidae*) i grgeča (*percidae*) je 0,6÷1,4 m/s, neprekidna, 2÷4 m/s, a kratkotrajna, 4÷8 m/s.

Ključni faktori koji utiču na neprekidnu brzinu su temperatura vode i koncentracija rastvorenog kiseonika. Za nesmetano kretanje riba u turbulentnom toku potrebno je da veličina vrtloga bude za red veličine manja od dužine riblje jedinke [63].

Drugi projektni protok – protok velike vode Q_{\max} , koji odgovara povratnom periodu od nekoliko godina, služi za proveru stabilnosti kamene rampe. U praksi se često usvaja velika voda povratnog perioda 10 godina. U načelu, izbor projektne velike vode predstavlja rezultat tehničko–ekonomске analize koja treba da pruži odgovor da li je isplativije graditi masivnu (skuplju) rampu, dimenzionisanu prema velikoj vodi dužeg povratnog perioda, ili manje masivnu (jeftiniju) rampu, dimenzionisanu na poplavu kraćeg povratnog perioda, ali koja zahteva veće troškove održavanja usled češćih sanacija.

Stabilnost rampe počiva na izboru krupnoće kamena koji čini podlogu rampe. Za ovo je na raspolaganju veliki broj empirijskih obrazaca [79, 81, 115, 217, 233]. Primera radi, obrasci, navedeni u Tabeli 5.2, daju karakteristične krupnoće kamena u zavisnosti od jediničnog protoka q_{\max} i nagiba rampe I_d .

Tabela 5.2: *Karakteristične krupnoće kamena za rampe* [233, 204].

Vitaker i Jegi (Whittaker, Jäggi, 2007):

$$d_{65} \approx \left(q_{\max} I_d^{7/6} \right)^{2/3}. \quad (5.3)$$

Robinson i dr. (Robinson, 1998):

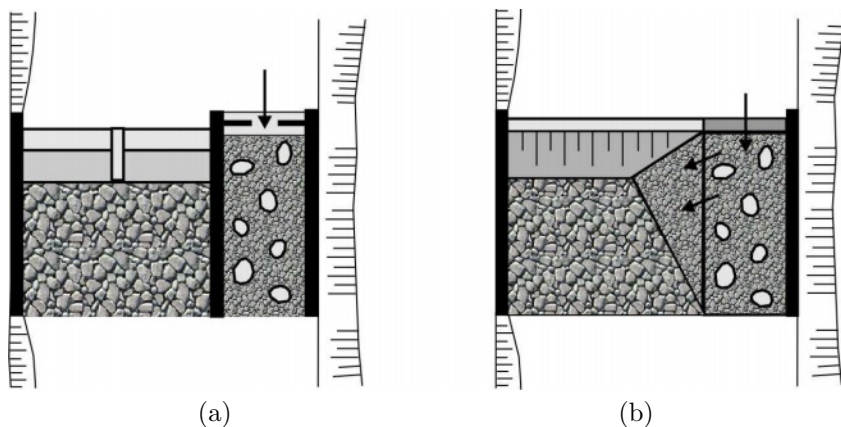
$$d_{50} = 0,5 \left(q_{\max} I_d^{0,58} \right)^{0,529}. \quad (5.4)$$

Izraz (5.3) važi za lomljeni kamen, a izraz (5.4), za zaobljeni kamen: $d_{50} < 0,3$ m; $\Delta = 2,45 \div 2,82$; $10\% \leq I_d \leq 40\%$. Dobijene vrednosti potrebno je pomnožiti faktorom sigurnosti $1,15 \div 1,20$. Najmanja debljina podloge je: $2 d_{50}$ [233].

Na mestima pregradnih građevina, riblje staze se formiraju u vidu ribljih rampi integrisanih u postojeći objekat, ili zaobilaznih kanala (Slike 5.22, 5.23).

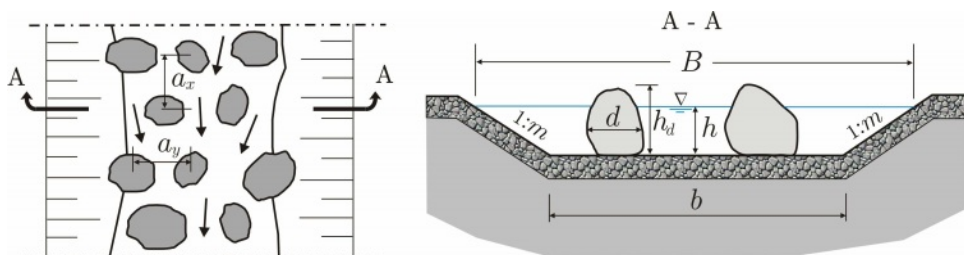


Slika 5.22: *Riblje rampe na rekama Doln (Dölln) i Fils (Fils) u Nemačkoj* [34].



Slika 5.23: Dispozicija dva tipa ribljih staza u skopu prelivnih građevina; (a) rampa sa ustavom za regulisanje protoka i (b) rampa sa slobodnim dotokom, pri čemu se prelivanje po celoj širini korita ostvaruje samo u periodu velikih voda.

Proračun riblje rampe započinje određivanjem njene dužine i veličine poprečnog preseka (Slika 5.24). Dužina rampe L_r zavisi od veličine pada koji se rampom savlađuje. Tipični uzdužni nagib rampe iznosi: $I_d = 1:10 \div 1:30$. Poprečni presek je trapeznog oblika, sa širinom u dnu koja, pri protoku Q_{\min} , obezbeđuje dovoljnu dubinu za kretanje riba $h = 0,3 \div 0,4$ m.



Slika 5.24: Osnova i poprečni presek riblje rampe sa oznakama veličina koje se koriste u proračunu.

Krupnoća kamena u podlozi rampe određuje se na osnovu empirijskih izraza (5.3) ili (5.4). Kameni blokovi, širine $d = 0,5 \div 0,6$ m i visine koja je bar jednaka dubini toka ($h_d \geq h$), postavljaju se naizmenično, na razmaku $a_x = a_y \approx (1,5 \div 3,0) d$.

Proračun je iterativan. Usvajaju se dimenzije trapeznog poprečnog preseka i dubina toka. Površina A , širina vodenog ogledala B , okvašeni obim O i hidraulički radijus R računaju se u funkciji date dubine h . Varira se broj i raspored kamenih blokova, sve dok računski protok ne bude približno jednak projektnom protoku Q_{\min} . Pri tome, brzina toka mora biti manja od dozvoljene brzine $V_{\text{doz}} = 2$ m/s.

Da bi se sračunao potreban broj kamenih blokova, potrebno je najpre usvojiti visinu potopljenosti kamenih blokova h_{pot} , koja može biti jednaka dubini toka h , ili visini kamenog bloka h_d . Zatim se računaju sledeće geometrijske veličine: površina projekcije kamenog bloka: $A_d = d h_{pot}$; površina osnove kamenog bloka: $A_o = d^2 \pi/4$; zapremina kamenog bloka: $\forall_k = A_o h_{pot}$; površina kruga prečnika $d + a_x/2$: $A_x = (d + a_x/2)^2 \pi/4$; površina dna rampe: $A_r = b L_r$ i broj kamenih blokova: $n_k = A_r/A_x$. Zaokruženjem sračunate vrednosti n_k , dobija se usvojeni broj kamenih blokova $n_{k,usv}$.

Kao što je poznato, hidraulički otpori se sastoje od otpora trenja i otpora oblika. Pretpostavljajući turbulentno strujanje po hidraulički rapavom dnu, otpor trenja se može računati pomoću empirijskog izraza Darsi-Vajsbaha za koeficijent trenja (KI-3.1-(3.3)):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{14,84 R} \right), \quad (5.5)$$

gde je k_s , ekvivalentna peščana rapavost, definisana u funkciji prosečne veličine kamena d ili najkрупnijeg zrna mešavine u podlozi d_{90} (KI-2.6, 3.2), kao i hidrauličkog radijusa R . Ograničenje za primenu obrasca (5.5) je: $k_s < 0,45 R$.

Otpor oblika se takođe definiše empirijskim izrazom [34]:

$$\lambda_k = 4 C_d S_{Ad}/\Omega_r, \quad (5.6)$$

gde je $S_{Ad} = n_{k,usv} A_d$ – površina projekcije svih kamenih blokova na ravan upravnu na strujnice, $\Omega_r = O L_r$ – okvašena površina rampe, a $C_d = 1,5$ – koeficijent otpora kamenih blokova.

Koeficijent ukupnog otpora dobija se ponderisanjem prethodnih koeficijenata shodno njihovom relativnom uticaju [34]:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_k + \lambda(1 - \epsilon_o)}{(1 - \epsilon_v)}, \quad (5.7)$$

gde su faktori ponderacije:

$$\epsilon_o = \frac{S_{Ad}}{\Omega_r}; \quad \epsilon_v = \frac{n_{k,usv} \forall_k}{A L_r}. \quad (5.8)$$

Jednačina ustaljenog jednolikog tečenja daje brzinu toka:

$$V = \sqrt{8 g R I_d / \bar{\lambda}}, \quad (5.9)$$

a ako je računski protok: $Q = VA$ približno jednak projektom protoku Q_{min} , rešenje riblje rampe je prihvatljivo. U protivnom, projektne elementi se koriguju, sve dok navedeni uslov ne bude zadovoljen. Dodatni uslov je da je tečenje mirno: $Fr = V^2 B/(g A) < 1$.

Posebnu proveru zahteva brzina u suženim delovima korita, gde je proticajni profil smanjen usled prisustva kamenih blokova. Ako se uzme da su u profilu prisutna tri kamena bloka, tako da je širina vodenog ogleдалa: $B_s = B - 3d$ i aktivna površina toka: $A_s = A - 3A_d$, na osnovu jednačine kontinuiteta proizilazi da je brzina toka u suženju: $V_s = V(A/A_s)$. Ova brzina treba da bude manja od dozvoljene brzine V_{doz} , koja približno odgovara prolongiranoj brzini plivanja ribe. Proverava se i uslov: $Fr = V_s^2 B_s / (g A_s) < 1,7$.

■ **Primer 5.2.** Projektovati riblju rampu dužine $L_r = 15$ m, u nagibu $I_d = 5\%$ (1:20), pod uslovom da pri dubini koja omogućava migraciju riba $h = 0,5$ m, brzina toka ne premaši $V_{doz} = 2$ m/s pri protoku $Q_{min} = 1,5$ m³/s. Najveći protok iznosi $Q_{max} = 6$ m³/s.

Rešenje. Proračun se obavlja po sledećem redosledu.

(1) *Elementi poprečnog profila.* Pretpostavlja se da je poprečni presek riblje rampe trapezni, širine u dnu $b = 3$ m i nagiba kosine $1:m = 1:1$. Radi lakšeg proračuna, smatra se da je tečenje na rampi jednoliko, pa se pri zahtevanoj dubini $h = 0,5$ m, u „slobodnom” poprečnom preseku (bez kamenih blokova), dobijaju sledeće vrednosti: površina $A = h(b + mh) = 1,75$ m², okvašeni obim $O = b + 2h\sqrt{1+m^2} = 4,41$ m, hidraulički radijus $R = A/O = 0,40$ m i širina vodenog ogleдалa $B = b + 2mh = 4,0$ m.

(2) *Krupnoća kamena.* Primenjujući izraz (5.4), za $q_{max} = 1,5$ m²/s, dobija se potrebna krupnoća kamena za podlogu rampe $d_{50} = 0,2$ m. Usvojena najmanja debljina podloge od ovog kamena iznosi 0,5 m. Dimenzije kamenih blokova se takođe usvajaju: širina $d = 0,6$ m, visina $h_d = 0,6$ m, kao i razmak blokova u pravcu toka i upravno na njega: $a_x = a_y = 1$ m (Slika 5.24). Ako je dubina potapanja kamena $h_{pot} = h = 0,5$ m, mogu se sračunati sledeće vrednosti: $A_d = 0,30$ m²; $A_o = 0,28$ m²; $\forall_k = 0,14$ m³; $A_x = 0,95$ m²; $A_r = 45,0$ m²; $n_k = 47,38$; $n_{k,usv} = 48$ kamenih blokova.

(3) Provera propusne moći. Procenjena vrednost ekvivalentne peščane rapavosti u datim uslovima je: $k_s = 0,15$ m ($< 0,45R = 0,18$ m), pa je na osnovu (5.5): $\lambda = 0,10$. Za procenu vrednosti λ_k pomoću izraza (5.6), neophodno je prethodno sračunati površinu projekcije svih kamenih komada na ravan upravnu na tok: $S_{Ad} = 14,4$ m² i površinu okvašenog korita rampe $\Omega_r = 66,21$ m². Sledi: $\lambda_k = 1,30$ ($C_d = 1,5$). Na osnovu (5.8), vrednosti faktora ponderacije su: $\epsilon_o = 0,205$ i $\epsilon_v = 0,258$, a na osnovu (5.7): $\bar{\lambda} = 1,87$.

Upoređujući vrednosti λ i λ_k može se primetiti da dominiraju otpori oblika usled kamenih blokova, dok je trenje po dnu od manjeg značaja.

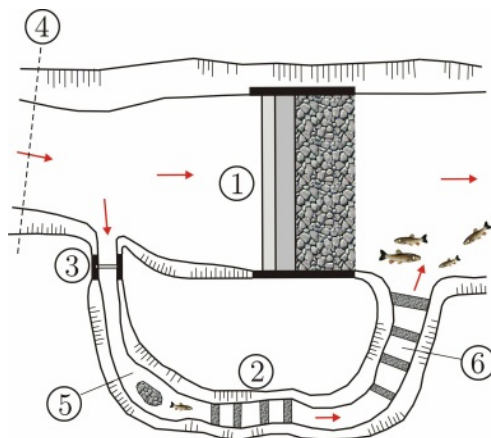
Primenom jednačine (5.9) dobija se srednja profilska brzina $V = 0,91$ m/s. Računski protok $Q = V \cdot A = 1,60$ m³/s odgovara projektnom protoku $Q_{min} = 1,5$ m³/s, a vrednost Frudovog broja: $Fr = 0,19$ potvrđuje da je tečenje u mirnom režimu.

(4) *Provera brzine u suženjima.* Proračun tečenja u suženjima – poprečim profilima čiji proticajni presek smanjuju tri kamena bloka, daje sledeće vrednosti: $B_s = 2,2$ m, $A_s = 0,85$ m², $V_s = 1,88$ m/s. Kako je $V_s < V_{doz} = 2,0$ m/s i $Fr = 0,93$, zadovoljena su oba, zadatkom postavljena, ograničenja.

Konačna potvrda funkcionalnosti riblje staze je zasnovana na vremenu zamora ribe. Ako se, primera radi, uzme da je kratkotrajna brzina plivanja ribljih vrsta u slivu Velike Morave – klena (*Leuciscus cephalus*), skobalja (*Chondrostoma nasus*) i rečne mreke (*Barbus fluviatilis*) oko 4 m/s, onda je relativna brzina uzvodnog kretanja ribe na rampi: $4,0 - 1,6 = 2,4$ m/s, pa je za savlađivanje rampe dužine 15 m ribi potrebno $15/2,4 \approx 6$ s, što je u granicama njene izdržljivosti.

* * *

U slučaju kada nije moguće formirati riblju rampu u sklopu pregradnog objekta, rešenje je riblja staza u vidu zaobilaznog kanala (Slike 5.25 i 5.26). Ovo rešenje je naročito primenljivo za postojeće pregradne objekte koji nisu projektovani i građeni u skladu sa savremenim ekološkim zahtevima, pa ih treba rekonstruisati.



Slika 5.25: Riblja staza u vidu zaobilaznog kanala: 1 – pregradni objekat; 2 – zaobilazni kanal; 3 – ustava za kontrolu protoka u kanalu; 4 – granica uspora; 5 – deonica kanala sa blagim nagibom dna koja služi kao odmorište za ribe; 6 – strma deonica sa kamenim pragovima; na nizvodnom kraju kanala je izražena trubulencija i ovazdušenje toka koje privlači ribu ka zaobilaznom kanalu.

Kapacitet zaobilaznih kanala može biti različit, jer zavisi od eksploatacionih uslova postojećeg pregradnog objekta. Uzimaju se u obzir dva projektna protoka; najmanji protok je vezan za „ekološki minimum”, a najveći, za određen procenat srednje vode. U slučaju kada pregradni objekat služi isključivo za zadržavanje poplavnih talasa, zaobilazni kanal se dimenzioniše na protok srednje vode. Najveći uzdužni nagib kanala je 1:100÷1:120, ali se taj nagib najčešće ne može ostvariti bez pragova ili kaskada. Širina u dnu mora biti veća od 1 m, a dubina, od 0,2 m.



Slika 5.26: Primeri zaobilaznih kanala na rekama Varel Beke (Varrel Bäke) i Šteber (Stöbber) u Nemačkoj [34].

Pragovi kod zaobilaznih kanala (a takođe i u slučaju regulisanih deonica) treba da: (i) obezbede projektovani uzdužni nagib dna; (ii) budu izrađeni isključivo od kamena, sa biotehničkom zaštitom obala i (iii) omoguće formiranje „bazena” (između pragova) u kojima će ribe imati povoljne uslove za predah i boravak u malovodnim periodima.

Ulazni podaci za proračun pragova sastoje se od hidrološko-hidrauličkih podataka: projektnih protoka (Q_{\max} , Q_{\min}) i ograničenja – najmanje dubine u „bezenima” između pragova (0,2÷0,3 m) i najveće brzine toka koju ribe mogu da podnesu (2 m/s).

Na Slici 5.27 prikazane su karakteristične geometrijske veličine čije se vrednosti usvajaju. To su: razmak pragova L_p , najveća denivelacija na prelivu $\Delta h = 0,1 \div 0,2$ m, veličina kamenih blokova: prečnik $d = 0,5 \div 0,8$ m i visina iznad dna h_d , kao i visina preлива p koji se formiranog delimičnim ukopavanjem krupnog pločastog kamena u šljunkovitu podlogu. Takođe se usvajaju: najmanja visina prelivnog mlaza H i vrednost koeficijenta preliivanja preko širokog praga $C_Q = 0,5 \div 0,6$ za oštroični kamen, a $0,6 \div 0,8$ za zaobljen kamen.

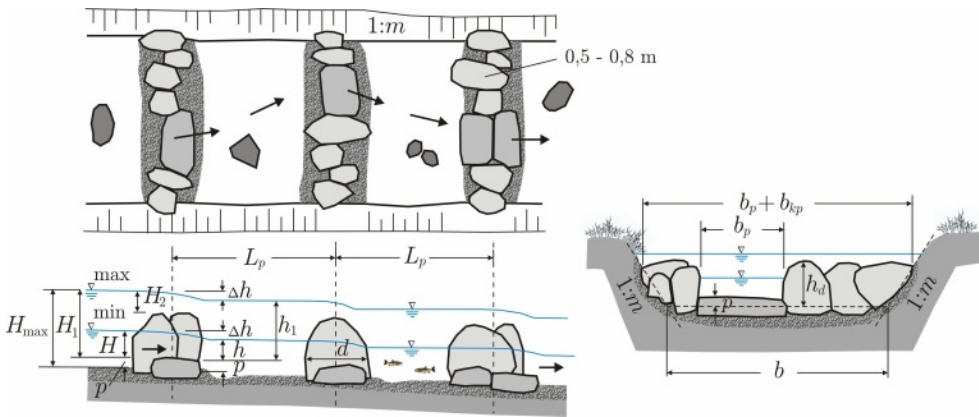
Hidraulički proračun je uprošćen. Koristi se jednačina (ne)potopljenog preliivanja preko širokog praga u kojoj se zanemaruje brzinska visina dolaznog toka:

$$Q = 2/3 C_Q \sigma b_p \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (5.10)$$

gde je H – visina prelivnog mlaza (Slika 5.27). Koeficijent potopljenosti σ u izazu (5.10) može se, na osnovu empirijskih dijagrama iz literature [34, 217], analitički definisati u obliku:

$$\sigma \approx 1 - (h/H)^{15}. \quad (5.11)$$

Za vrednosti $h/H < 0,8$: $\sigma \approx 1,0$ (nepotopljeno preliivanje).



Slika 5.27: Kameni pragovi sa oznakama koje se koriste u proračunu.

Pri malom protoku Q_{\min} , prelivanje je ograničeno samo na deo praga širine b_p (Slika 5.27). U tom slučaju se jednačina (5.10) rešava po b_p za zadatu vrednost Q_{\min} i usvojenu (projektovanu) visinu prelivnog mlaza H .

Pri protoku Q_{\max} prelivanje se odvija i preko velikih kamenih blokova, po celoj širini praga $b_p + b_{kp}$ (Slika 5.27), pa se koriste dve jednačine tipa (5.10) – jedna za prelivanje pločastog kamena sa prelivnom širinom b_p , a druga, za prelivanje kamenih blokova, sa prelivnom širinom b_{kp} ⁷. Visine prelivnog mlaza H_1 i H_2 nisu poznate, već se određuju iterativno – variranjem dubine H_{\max} (Slika 5.27), sve dok ukupni protok (na oba preliva) ne bude približno jednak zadatom Q_{\max} .

Najveća brzina vode na pragu, koja zavisi od denivelacije Δh : $V_p = \sqrt{2g\Delta h}$ mora biti manja od najveće dozvoljene brzine 2,0 m/s.

Korito zaobilaznog kanala ima trapezni poprečni presek (Slika 5.27), sa širinom u dnu koja se usvaja na osnovu iskustvene preporuke: $b = 2,5 b_p$, dok nagib obala m zavisi od sastava tla i tipa projektovane obaloutvrde. U cilju očuvanja estetskog kvaliteta ambijenta, za obale se koriste isključivo biotehničke mere zaštite.

Jedan od bitnih aspekata funkcionisanja riblje staze je provera da li je energija koju ribe troše pri kretanju duž te staze u fiziološki prihvatljivim granicama⁸. Kako naprezanje riba zavisi od brzine toka i njegove kinetičke energije, u analizi ribljih staza koriste se indikatori kao što su „snaga toka po jedinici dužine” (KI-14.2.1-(14.18)):

$$\rho g Q I_e \quad [\text{W/m}] \quad (5.12)$$

⁷ Aditivnost protoka na ovakvom prelivu nije hidraulički sasvim ispravna, ali je za inženjerske proračune prihvatljiva.

⁸ Pored ranije pomenutih korelacija između brzine kretanja, utroška energije i vremena zamora, razvijeni su i matematički modeli promenljive brzine kretanja riba pri optimalnom utrošku energije [63, 255].

i „snaga toka po jedinici zapremine” (brzina disipacije energije toka po jedinici zapremine) [34]:

$$\Delta E = \frac{\rho g Q I_{\pi}}{A_{sr}} = \frac{\rho g Q \Delta h}{A_{sr} L_e} \quad [\text{W/m}^3], \quad (5.13)$$

gde je A_{sr} – osrednjena površina poprečnog preseka bazena između pragova, a $L_e = L_p - d$ – efektivna dužina bazena. Gornja granica iznosi: $\Delta E = 150 \div 200 \text{ W/m}^3$ [34].

■ **Primer 5.3.** Projektovati kamene pragove za smanjenje uzdužnog nagiba regulisanog vodotoka ili zaobilaznog kanala, ako su vrednosti merodavnih protoka: $Q_{\min} = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{\max} = 2,20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dubina u „bazenu” nizvodno od praga ne sme biti manja od 0,5 m, a brzina toka na prelivu, ne sme biti veća od 2 m/s.

Rešenje. Polazi se od usvojenih vrednosti nekih projektnih veličina i računskih parametara, kao ulaznih podataka:

- razmak pragova: $L_p = 10 \text{ m}$;
- najveća denivelacija na prelivu: $\Delta h = 0,2 \text{ m}$ ($I_{\Pi} = 0,2/10 = 0,02$, ili 2%);
- prečnik kamenog bloka: $d = 0,6 \text{ m}$, visina kamenog bloka iznad dna: $h_d = 0,4 \text{ m}$;
- visina pločastog kamena za preliv: $0,4 \text{ m}$, visina preлива: $p = 0,4/2 = 0,2 \text{ m}$;
- najmanja visina prelivnog mlaza: $H = 0,4 \text{ m}$;
- koeficijent prelivanja: $C_Q = 0,5$.

Najpre se razmatraju hidraulički uslovi prelivanja pri protoku $Q_{\min} = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}$. Ako se usvoji denivelacija $\Delta h = 0,2 \text{ m}$, najveća brzina na prelivu:

$$V_p = \sqrt{2g \Delta h} = 1,98 \text{ m/s},$$

je manja od dozvoljene brzine 2,0 m/s. Dubina „donje vode” iznosi $h = 0,3 \text{ m}$, tako da dužina: $h + p = 0,3 + 0,2 = 0,5 \text{ m}$ odgovara najmanjoj zahtevanoj dubini u bazenu. Za vrednost $h/H = 0,3/0,4 = 0,75$, izraz (5.11) daje vrednost redukcionog koeficijenta $\sigma \approx 1$, pa se na osnovu izraza (5.10) dobija potrebna sirina preлива (pločastog kamena):

$$b_p = \frac{Q_{\min}}{2/3 C_Q \sigma \sqrt{2g} H^{3/2}} = \frac{0,20}{2/3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 4,429 \cdot 0,4^{3/2}} = 0,53 \approx 0,6 \text{ m}.$$

Sada se može pristupiti dimenzionisanju poprečnog preseka korita. Na osnovu preporuka je: $b = 2,5 b_p = 2,5 \cdot 0,6 = 1,5 \text{ m}$. Ako se usvoji nagib kosina $m = 2$, širina korita po kruni kamenih blokova iznosi (Slika 5.27):

$$b_p + b_{kp} = b + 2 m h_d = 1,5 + 2 \cdot 2 \cdot 0,4 = 3,10 \text{ m}, \text{ usvojeno } 3 \text{ m}.$$

Visina prelivnog mlaza i dubina pri $Q_{\max} = 2,20 \text{ m}^3/\text{s}$ se određuju iterativno (probanjem), pri čemu se uzima se u obzir istovremeno prelivanje preko pločastog kamena i preko kamenih blokova. Proračun se ponavlja za više pretpostavljenih vrednosti dubine uzvodno od praga H_{\max} (Slika 5.27), sve dok zbir protoka na oba

preliva ne bude približno jednak protoku Q_{\max} . Ovde se daju rezultati konačnog rešenja.

Za $H_{\max} = 1,0$ m, visina prelivnog mlaza iznad pločastog kamenog praga iznosi: $H_1 = H_{\max} - p = 1,0 - 0,2 = 0,8$ m. Za $\Delta h = 0,2$ m, dubina „donje vode” u bazenu je: $h_1 = H_1 - \Delta h = 0,6$ m. Tada je: $h_1/H_1 = 0,6/0,8 = 0,75$ i $\sigma = 1$, a na osnovu (5.10): $Q_1 = 0,63$ m³/s.

Visina prelivnog mlaza iznad kamenih blokova: $H_2 = H_{\max} - h_d = 1,0 - 0,4 = 0,6$ m. Odgovarajuća dubina „donje vode” u bazenu je: $h_2 = H_2 - \Delta h = 0,6 - 0,2 = 0,4$ m. Sledi: $h_2/H_2 = 0,67$ i $\sigma = 1$, pa je na osnovu (5.10): $Q_2 = 1,64$ m³/s.

Ukupni protok prelivanja na pragu $Q_1 + Q_2 = 0,63 + 1,64 = 2,27$ m³/s približno odgovara zadatom protoku. Provera brzine toka u bazenu daje sledeće rezultate:

(a) pri Q_{\min} , srednja dubina u bazenu je: $[(h + p) + (H + p)]/2 = (h + H)/2 + p = (0,3 + 0,4)/2 + 0,2 = 0,55$ m. Srednja površina poprečnog preseka je: $1,5 \cdot 0,55 + 2 \cdot 0,55^2 = 1,43$ m², a srednja profilska brzina: $0,2/1,43 = 0,14$ m/s;

(b) pri Q_{\max} , srednja dubina u bazenu je: $[(h_1 + p) + H_{\max}]/2 = (0,8 + 1,0)/2 = 0,9$ m. Srednja površina poprečnog preseka je: $1,5 \cdot 0,9 + 2 \cdot 0,9^2 = 2,97$ m², a srednja profilska brzina: $2,20/2,97 = 0,74$ m/s.

Može se konstatovati da su u oba slučaja brzine ispod dozvoljene granice. Provera brzine disipacije energije po jedinici zapremine prema izrazu (5.13) daje: $\Delta E = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,20 \cdot 0,2/(1,9 \cdot 2,97) = 127$ W/m³ $<$ $(150 \div 200)$ W/m³.

* * *

Treba još jednom naglasiti da je hidraulički proračun ribljih staza u praksi veoma uprošćen. Prisutne su mnoge neizvesnosti ulaznih podataka i vrednosti računskih parametara (veličine kamenih blokova, vrednosti koeficijenata rapavosti, prelivanja itd). Zbog toga, rezultati prikazanog načina proračuna mogu da posluže samo u početnoj fazi projektovanja. Za konačno rešenje uputno je preduzeti složenije hidraulički proračune ili ispitivanje na fizičkom modelu. Po završetku radova, preporučuje se *probni rad* riblje staze, tokom koga će se pratiti njeno funkcionisanje u raznim hidrološko-hidrauličkim uslovima i preduzeti mere za korekciju projektog rešenja ako se pokaže da je to neophodno.

5.3 Ekološki značaj inundacija

Inundaciona područja su dinamički, proizvodni, biološki raznovrsni ekosistemi. Morfološke promene osnovnog korita i periodično plavljenje inundacija predstavljaju osnovne elemente te dinamike. Praksa da se urbanizacijom i promenom namene površina⁹, ograniči i izmeni inundacioni prostor, predstavlja veliki problem kako za efikasnu zaštitu od poplava, tako i za održivost ekosistema. Zato u široj javnosti

⁹Procenjuje se da je danas svega 2% inundacija u Evropi u svom prvobitnom stanju.

sve više jača svest o potrebi da se prirodna uloga inundacija ne sme ugroziti i da se devastirane inundacije moraju obnoviti.

5.3.1 Upravljanje vodnim režimom

Inundacije imaju ključnu ulogu u upravljanju režimom velikih voda. To se realizuje kroz privremeno zadržavanje (retenziranje) viška vode iz osnovnog rečnog korita, kao i vode prispele sa okolnog slivnog područja površinskim ili podpovršinskim dotokom. Zadržavanjem vode u inundacijama smanjuje se vrh poplavanog talasa i odlaže njegova pojava na nizvodnom području. Optimalni efekti se postižu dimenzionisanjem retenzionog kapaciteta. Povećanje ovog kapaciteta može se postići povećanjem: (a) inundacione površine, (b) inundacione dubine i (c) hidrauličke ravnosti. Navedene veličine su međusobno povezane i uslovljene vegetacijom, koja je s druge strane, ključni faktor u opstanku rečnog i priobalnog ekosistema.

Promena namene površina i intenzivna urbanizacija doprinosi povećanju ugroženosti od poplava¹⁰. Naročito je promena namene površina štetna za inundacije. Seča šuma, isključenje inundacija i njihovo pretvaranje u poljoprivredno ili gradsko građevinsko zemljište, mogu imati pogubne posledice po zaštitu od poplava i očuvanje životne sredine.

5.3.2 Očuvanje ekosistema

U prirodno očuvanim inundacijama odvija se niz procesa koji utiču na kvalitet vode i tla. Ovi procesi obuhvataju prijem, transformaciju, zadržavanje i ispuštanje hemijskih materija i čvrstih čestica. Fizički procesi koji regulišu sedimente u inundacijama obuhvataju eroziju, transport (vodom i vetrom) i taloženje. Biohemijski procesi transformacije hemijskih materija imaju značajan ulogu u regulaciji hranljivih materija – nutrijenata, teških metala i drugih zagađivača. Ovi procesi, koji utiču na opstanak tzv. *vlažnih staništa*, obuhvataju: zadržavanje i ispuštanje nutrijenata, zadržavanje ugljenika i regulaciju rastvorenog organskog ugljenika, što utiče na očuvanje kvaliteta voda.

U povratnoj sprezi, dobar kvalitet vode je preduslov održivosti i biološke raznovrsnosti ekosistema. Većina biljaka i životinja povezano je (u većoj ili manjoj meri) sa rečnim priobaljem. Tradicionalne metode regulacije reka doprinele su smanjenju (a u nekim slučajevima) i nestanku mnogih biljnih i životinjskih vrsta, a zadatak prirodne regulacije je upravo da se takve pojave spreče.

5.3.3 Ekonomsko-socijalni aspekti

Tradicionalno se plavljenje inundacija kao vitalni uslov održivosti rečnog ekosistema prenebregava, pa se priobalje intenzivno pretvara u poljoprivredno ili građevinsko zemljište, koje se po svaku cenu mora braniti od poplava. Ispravan pristup je da upravljanje poplavama treba prilagoditi lokalnim uslovima.

¹⁰Na primer, u Japanu je od poplave povratnog perioda 100 godina ugroženo 50 % stanovništva, a u Bangladešu je preko 70 % teritorije ugroženo poplavama sličnog povratnog perioda [260].

U inundacijama koje nisu zaposednute, manje su štete, pa je u ekološkom pogledu povremeno plavljenje čak i poželjno, dok to nije slučaj u gusto naseljenim unudacijama, gde ekonomsko-socijalne posledice plavljenja mogu biti veoma ozbiljne. Kao što će se videti u narednom poglavlju, projekti zaštite od poplava su zasnovani na analizi dobiti i cene („benefit-cost”), koja dokazuje ekonomsku opravdanost radova i daje valorizaciju direktnih i indirektnih koristi, uključujući one u sferi ekologije i socijalnih odnosa.

Obnova inundacionih područja koja su, usled promene namene površina i/ili urbanizacije, izgubila svoja prirodna obeležja, nesumnjivo je od velikog značaja. Međutim, tom poduhvatu treba pristupiti pažljivo i znalački, jer je zadatak višedisciplinarnan. Treba biti svestan i potencijalno nepovoljnih posledica. Tako zabarenje većih površina u priobalju može biti štetno po ljudsko zdravlje (npr. malarija koju prenose komarci). Dalje, rešavanje jednog problema može otvoriti druge probleme. Na primer, uklanjanje azotnog đubriva radi poboljšanja kvaliteta vode, može dovesti do stvaranja azot-oksida – jednog od gasova staklene bašte. Tu spada i metan, čijem stvaranju pogoduju vlažna zemljišta.

Za projekat obnove rečnog priobalja veoma je bitna percepcija javnosti. Tu je najčešće presudan estetski faktor, jer spoznaja stvarnih ekoloških koristi široj javnosti uglavnom nedostaje. Podrška u pejzažnom, ambijentalnom obnavljanju priobalja je od velikog značaja, pogotovo ako se u taj ambijent uklapaju vredni istorijski i kulturni sadržaji.

5.3.4 Obnova inundacija

U regulaciji reka se tradicionalno primenjuje „tehnicistički” pristup (često iniciranim „investitorskim” urbanizmom) po kome se, izgradnjom nasipa, plavljenje inundacija potpuno isključuje da bi se uvećao fond građevinskog zemljišta. Savremeni pristup uzima u obzir i ekološku ulogu inundacija koja zahteva *cikličnost plavljenja*, pa se zato sprovodi renaturalizacija, koja podrazumeva ekološko obnavljanje inundacija.

5.3.4.1 Fizički i geobiohemijski procesi

Inundacije su složeni ekosistemi. Kao vlažna („hidrična”) tla, imaju specifičan raspored aerobnih i anaerobnih zona. Taj raspored utiče na transformaciju hranjivih materija – *nutrijenata* i teških metala. Kombinacija fizičkih, bioloških i hemijskih procesa u inundacijama može da stvori, pokrene, transformiše i neutrališe veliki broj štetnih hemijskih elemenata i jedinjenja.

Hemijski procesi u vodi i tlu su *oksidacija* i *redukcija* („oksidoredukциони” procesi). Svaka inundacija ima svoj *oksidoredukциони kapacitet*.

Ključni nutrijenti za rast biljaka u inundacijama su: azot N, fosfor P i ugljenik C. (U tragovima su prisutni i teški metali: olovo Pb, kadmijum Cd i živa Hg).

Ugljenik, koji je hemijska osnova celog živog sveta (18 % u ljudskom telu), u inundacijama je sadržan u organskom materijalu (živim i uginulim organizmima).

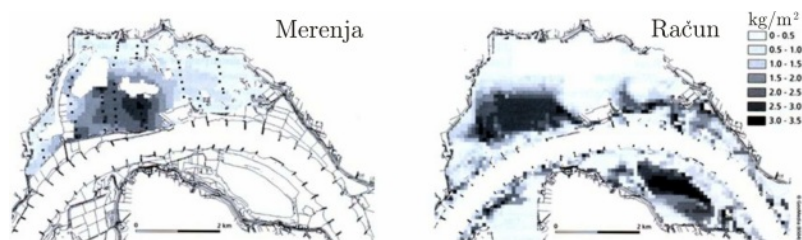
Organiski materijal je podložan raspadanju – truljenju. Materijal koji je istrulio do stepena neprepoznatljivosti zove se „zemljišni organiski materijal” ili *organsko tlo*. U konačnoj fazi postaje *humus*. Zadržava vodu i nutrijente (dajući biljkama uslove za rast) i omogućava bakterijama da ubrzaju razgradnju nutrijenata u tlu.

U inundacijama se odvijaju dve vrste procesa: sedimentološki i geobiohemijski. Upoznavanje i analiza ovih procesa imaju za cilj da se spreči zagađenje vode i degradacija ekosistema usled preterane koncentracije nutrijenata i teških metala, imajući u vidu da su inundacije *efikasan prirodni regulator kvaliteta voda i tla*.

Sedimentološki procesi. Reč je o fizičkim procesima erozije, prenosa i taloženja sedimenata (rečnog nanosa i drugih čvrstih materija). U inundacijama se zadržavaju ogromne količine nanosa dospеле sa sliva, spiranjem tla u toku kišnih epizoda, ili iz reke, izlivanjem vode iz osnovnog korita u periodu poplava¹¹.

Taloženje čvrstih materija nastaje usled male brzine tečenja u inundacijama. To povoljno utiče na kvalitet vode, jer se zadržavaju nutrijenti i teški metali vezani za čestice nanosa. Naročito je značajno vezivanje fosfora u vidu fosfornih soli – fosfata, koje su opasan zagađivač životne sredine. Međutim, ako je taloženje zagađivača preterano, može doći do njihovog naknadnog oslobađanja i ugrožavanja kvaliteta vode. Zbog toga se u nekim slučajevima može pokazati svrsishodno preventivno uklanjanje naslaga nanosa – „ciklično podmlađivanje inundacija”.

Interesantno je da su inostranštva u oblasti transporta i taloženja suspendovanog nanosa sve više usmerena ka inundacijama. Jedan primer je prikazan na Slici 5.28.



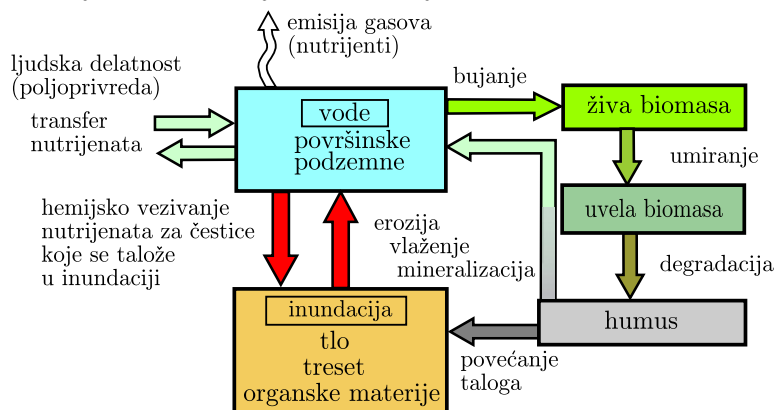
Slika 5.28: Taloženje suspendovanog nanosa u inundaciji reke Vaal u Holandiji, posle prolaska poplavnog talasa ($6500 \text{ m}^3/\text{s}$) 2003. godine; levo: položaj mernih tačaka; desno: rezultati numeričke simulacije pomoću metode „praćenja čestica” („particle tracking method”) [229].

Geobiohemijski (GBH) procesi. Reč je o procesima transformacije hemijskih materija iz jednog oblika u drugi. Imaju ključnu ulogu u regulisanju količine nutri-

¹¹ Velike količine suspendovanog nanosa u rekama završe u inundacijama: Amazon $46 \div 64\%$, Misisipi $22 \div 36\%$, Rajna 19% itd.

jenata i teških metala. GBH transformacije zavise od vrste tla i hidroloških uslova. Dobro drenirana tla su *aerobična* (sadrže puno kiseonika) i kroz njih voda brzo prolazi, što daje malo prostora i vremena za GBH transformacije. S druge strane, loše drenirana, *anaerobična* tla sadrže malo kiseonika, tako da veliki organski sadržaj, uz dugotrajno zadržavanje vode, intenzivira GBH procese.

Dinamika GBH procesa zavisi i od hidroloških uslova. Sa početkom plavljenja inundacije, difuzija kiseonika kroz tlo postaje otežana, a mikroorganizmi, trošeći kiseonik, pospešuju odvijanje GBH procesa. Sa povlačenjem vode iz inundacija, GBH transformacije gube na intenzitetu. Shema prikazana na Slici 5.29, pokazuje razmenu nutrijenata na relaciji tlo inundacije–vode–biomasa.



Slika 5.29: Shematski prikaz GBH procesa (prema [222]).

GBH procesi azota. Obuhvataju: mineralizaciju, adsorpciju, potrošnju (rast biljaka), nitrifikaciju, denitrifikaciju, vezivanja i emisiju gasova (Slici 5.30). Posredstvom bakterija, formira se toksično azotno jedinjenje – amonijak¹² NH_3 , iz koga nastaju amonijum joni¹³ NH_4^+ , a iz njih, putem nitrifikacije, azotne soli: nitrati NO_3^- i nitriti NO_2^- . Ove soli delimično asimiluju biljke, a delimično se, uz pomoć bakterija i denitrifikacije, vraćaju u atmosferski azot.

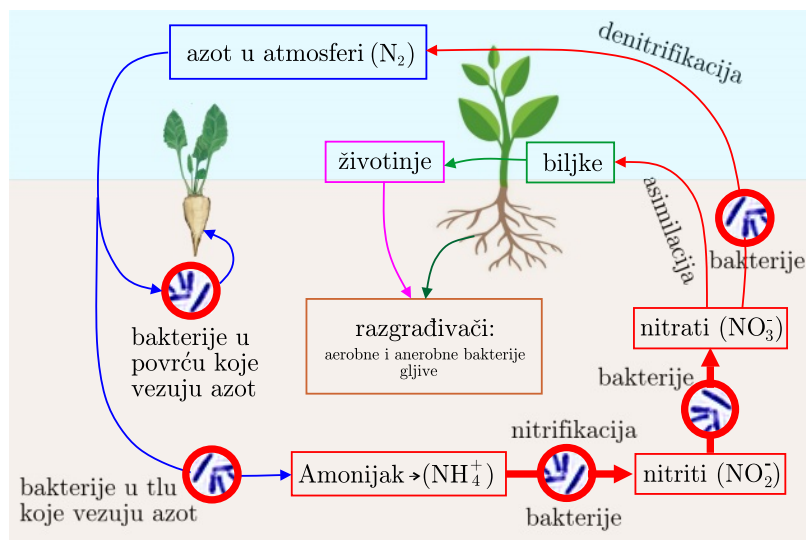
GBH procesi fosfora. Fosfor P se vezuje za organski materijal i neorganske sedimente kroz adsorpciju, potrošnju (rast biljaka) i taloženje u aerobnim uslovima. Vezani, istaloženi fosfor može se ponovo osloboditi u anaerobnim uslovima (kada nedostaje kiseonik). U ovim procesima nema emisije gasova, a prisutne su fosforne soli – fosfati.

GBH procesi ugljenika. Ugljenik C je neophodan za rast bakterija, bez kojih nije moguća transformacija jednih elemenata u druge. Procesu u kojima ugljenik

¹² Amonijak, jedinjenje azota N i vodonika H, je bezbojan gas karakterističnog mirisa. Prisutan je tamo gde ima vodenih organizama. Doprinosi stvaranju nutrijenata i đubriva.

¹³ Za stvaranje amonijuma potrebne su biljke, životinje (proizvod metabolizma, koji se kod vodenih životinja direktno izlučuje u vodu, a kod kopnenih, izbacuje kroz mokraću) i ragrađivači u obliku (an)aerobnih bakterija i gljiva.

igra važnu ulogu čine: biodegradacija u anaerobnim uslovima, fermentacija (vrenje), produkcija metana i stvaranje „organskog tla” (treseta).



Slika 5.30: Shematski prikaz azotnih GBH procesa – „azotni ciklus” (prema [222]).

GBH procesi elemenata u travovima. Od mnoštva elemenata u travovima, koji su, kao „mikro nutrijenti” neophodni za opstanak flore i faune, po okolinu su najštetniji teški metali: olovo Pb, kadmijum Cd i živa Hg. Potiču najviše iz veštačkih đubriva. Akumulisanjem, mogu dostići toksične koncentracije. Procesu su: adsorpcija, taloženje, potrošnja (rast biljaka). Neki elementi emituju gasove (živa, selenijum).

Zadržavanje/oslobađanje azota i fosfora. Zadržavanje se obavlja adsorpcijom čestica koje se talože u inundaciji i nije trajno. Nutrijenti vezani u drveću mogu opstati desetinama i stotinama godina, dok se ponovo ne oslobode i vrate u ekosistem (nutrijenti u tresetu). Oslobađanje azota N i fosfora P se realizuje emisijom gasova (azot), sećom vegetacije i erozijom. Oslobađanje N i P je trajno¹⁴.

Zadržavanje ugljenika. Bilans ugljenika zavisi od hidroloških uslova. Akumulira se u organskom (naročito razgrađenom) materijalu. Zadržavanje pospešuje niska temperatura, velika kiselost, niski sadržaj nutrijenata, a najviše prodor vode (spora difuzija kiseonika kroz vodom zasićeno tlo usporava razgradnju organskog materijala). Ugljenik C je važan energetski izvor vodnog ekosistema, ali utiče na kvaliteta vode: turbiditet (zamućenost) površinskih voda, kiselost pH (a time i na biološku raznovrsnost), agens je transporta mnogih hemikalija (naročito teških metala) i velikom koncentracijom, otežava tretman vode za piće.

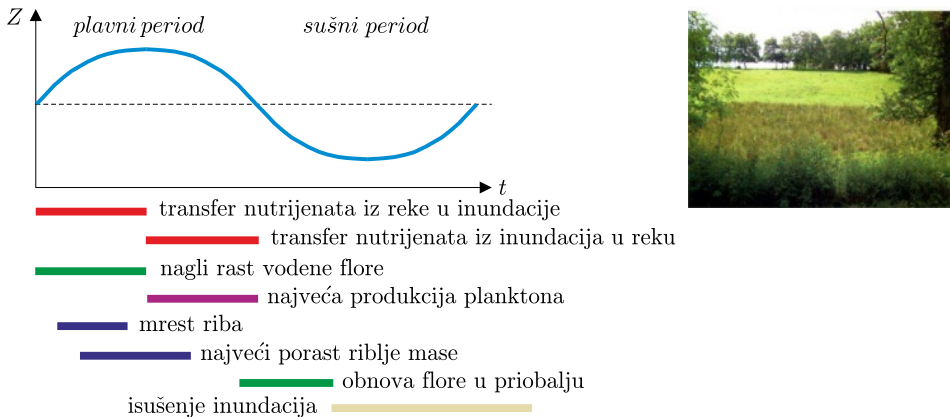
¹⁴Pažnja: denitrifikacija – uklanjanje nitrata iz površinskih voda pretvarajući ga u bezopasan gas azot, lokalno rešava jedan problem zagađenja, ali globalno, može doprineti drugom problemu zagađenja – produkciji nitratoksida, gasa staklene bašte.

Zadržavanje/oslobađanje teških metala. Realizuje se vezivanjem za čestice suspendovanog nanosa koje se talože u inundaciji. Rezultat ovog procesa je otrovni talog. „Oslobađanje” inundacija od teških metala se dešava sećom biljaka, erozijom zagađenog tla (fluvijalnom i eolskom) i kroz GBH procese¹⁵.

Tradicionalno, primarni razlog restauracije inundacija je hidraulički motivisan – povećanjem propusne moći za evakuaciju velikih voda (koncept „obežbediti prostor za vode”). Sada vidimo da postoje i ozbiljni ekološki razlozi za obnovu plavljenja inundacija, vezani za održanje GBH procesa (kvalitet vode, regulacija nutrijenata) i bitnih ekoloških funkcija (zadržavanje/odnošenje ugljenika i rastvorenog organskog ugljenika, kao i otrovnih materija). Ekološka restauracija plavnih inundacija počiva na konceptu *rečnog kontinuuma* koji podrazumeva integralno posmatranje rečnog ekosistema sa njegovim fizičkim svojstvima i biotičkim prilagođavanjima. Ovaj koncept obuhvata [222]:

- *plavno pulsiranje* – interakciju rečnog toka i inuundacija kroz sezonsku varijaciju vlažnih i sušnih perioda i razmenu energije i materija neophodnih za opstanak ekosistema (Slika 5.31);
- *pulsiranja nivoa* – sezonsko oscilovanje nivoa podzemnih voda u skladu sa dinamikom nivoa u reci;
- *ciklično kretanje nutrijenata* (kraći ciklusi su produktivniji za priobalje).

Poplave i suše su prirodni mehanizam koji regulišu ciklično kretanje nutrijenata. Pri restauraciji inundacija treba razvijati *ekotone* – prelazne zaštitne pojaseve između susednih ekoloških podsistema (Slika 5.31).



Slika 5.31: *Levo: ekološka cikličnost; desno: primjer ekotona pašnjak - reka* [222].

¹⁵Posledica promene oksido-redukcionog potencijala može dostići takve razmere da se inundacije od „ponora” mogu pretvoriti u „izvore” teških metala.

5.3.4.2 Neki primeri obnovljenih inundacija

Primeri uspešne obnove inundacija prikazani su na Slikama 5.32-5.36.



Slika 5.32: *Restoracija inundacije gornje Drave u Austriji, u južnom Tirolu 1999-2003); levo: klasična regulacija s početka 20. veka imala je za posledicu degradaciju staništa, smanjenje aluvijanog šumskog fonda, povećanje brzine toka, eroziju korita (oko 2 cm/god) i sniženje nivoa podzemnih voda; desno: povećanjem ekspanzionog prostora za velike vode na 19000 ha, poboljšana je odbrana od poplava, ponovo je uspostavljena prirodna morfočinamika i obnovljen sistem rečnog habitata i priobalne vegetacije.*



Slika 5.33: *Lonjsko polje u srednjem toku Save je poznati hrvatski zaštićeni prirodni rezervat (380 km²) na kome se pruža kompleks priobalnih šuma sa rezervatom ptica Krapje Dol; projekat zaštite od poplava započet je 1964. sa ciljem upravljanja poplavama i zaštite Zagreba i Siska, zadržavanja nutrijenata sa uzvodnih područja i očuvanja prirodne geomorfologije, ambijenta i staništa; mere su obuhvatile: izgradnju (1980) četiri prirodne retenzije (Lonjsko polje, Mokro polje, Zelenik i Kupčina), izgradnju obodnih nasipa za povećanje kapaciteta retenzija, preliva za kontrolu njihovog punjenja i pražnjenja i kanala za njihovo povezivanje; pored toga, izrađen je plan integralnog upravljanja parka prirode Plonje (2003).*



Slika 5.34: *Restoracija inundacija reke Brede na jugozapadu Danske (sliv 473 km², dužina oko 1000 km); regulacijom 1950. ispravljeno je i produbljeno korito i isključene su inundacije; posledice su: sniženje nivoa podzemne vode, degradacija tla, smanjenje prinosa, zagađenje vode u reci zbog razgradnje tresetnih naslaga i oksidacije piritita; projektom restoracije (1991-1998) obnovljeno je prirodno povezivanje korita sa inundacijama i rehabilitovana su biljna i životinjska staništa.*



Slika 5.35: *Na reci Elbi (sliv 150000 km², dužina 1165 km), od 12. veka je nasipima isključno od plavljenja oko 76 % inundacija (6170 ha); projektom zaštite šuma Löderitzer (2001-2010), kao dela UNESCO-ovog zaštićenog rezervata, eksproprijacijom je povezano oko 1000 ha i rekonstuisani su odvodni kanali.*



Slika 5.36: *Projekat uređenja inundacija reke Lacha u Poljskoj (1999-2002) imao je za cilj povećanje retenzionog kapaciteta za velike vode za oko (150000 m³) i obnovu prirodnih habitata; mere su obuhvatile eksproprijaciju zemljišta, izgradnju niza malih retenzionih bazena, uklanjanje tla zasićenog đubrivom, oblikovanje terena, košenje trave na livadama i izgradnju toplane na energiju biomase.*

Glava 6

Zaštita od poplava

6.1 Uvodne napomene

U najširem smislu, *zaštita od poplava* obuhvata primenu kompleksa mera za smanjenje štetnih posledica na planu fizičke ugroženosti ljudi i materijalnih dobara, kao i u pogledu zaštite životne sredine i socijalne sigurnosti. Nešto uži pojam – *odbrana od poplava*, odnosi se na operativne mere zaštite u toku plavnog perioda. *Upravljanje poplavama* obuhvata sve preventivne i operativne mere za smanjenje rizika od poplava.

Od 14500 kataklizmičkih događaja širom sveta u periodu 1980 - 2004, skoro jedna trećina, 26 %, otpada na poplave, od čega, 8 % na nagle, bujične poplave, sa 160000 ljudskih žrtava [260]. Štete od poplava mere se milijardama dolara (Tabela 6.1).

Tabela 6.1: *Poplave sa najvećim štetama u svetu u periodu 1991-2001* [152].

R.br.	Godina	Zemlja/reka (najugroženije oblasti)	Materijalne štete milijarde \$US
1	1998	Kina (Jangce, Songhua)	31
2	1996	Kina (Jangce)	24
3	1993	SAD (Misisipi)	21
4	1995	Severna Koreja	15
5	1993	Kina (Jangce, Huai)	11
6	1994	Italija (sever)	9,3
7	1993	Bangladeš, India, Nepal	8,5
8	2000	Italija (sever), Švajcarska (jug)	8,5
9	1999	Kina (Jangce)	8
10	1994	Kina (jugoztok)	7,8
11	1995	Kina (Jangce)	6,7
12	2001	SAD (Teksas)	6
13	1997	Češka, Poljska, Nemačka (Odra)	5,9

Samo u Srbiji je tokom katastrofalne poplave 2014. godine, šteta iznosila preko 1,5 milijarde €, od kojih se 885 miliona € (58 %) odnosi na uništena materijalna dobra, a 640 miliona (43 %), na gubitke u proizvodnji i uslugama [301].

Sa klimatskim promenama, rastom stanovništva i sve intenzivnijom urbanizacijom (Slika 6.1) može se očekivati da zaštita od poplava bude sve neizvesnija, složenija i skuplja.



Slika 6.1: *Primeri intenzivne urbanizacije; gore: Dubai 1990 i 2003; dole: izgradnjom zaposednuta dolina Kumodraškog potoka u Beogradu (2005).*

Kao komponenta integralnog uređenja vodotoka, zaštita od poplava je svakako jedna od ključnih oblasti hidrotehnike. Mere zaštite od velikih voda se mogu svrstati u dve kategorije: (A) *investicione* (konstruktivne) i (B) *neinvesticione* (nekonstruktivne, preventivne).

A. Investicione mere mogu biti: (i) *pasivne* i (ii) *aktivne* (ili *proaktivne*). Pasivne mere se sastoje od izgradnje dugačkih linijskih zaštitnih sistema (nasipa i drugih regulacionih građevina) kojima se priobalje štiti od plavljenja. Aktivnim merama se utiče na ublaženje poplavnih talasa pomoću akumulacija, retenzija i rasteretnih kanala.

B. Neinvesticione (preventivne) mere imaju za cilj smanjenje potencijalnih šteta na ugroženom području. Obuhvataju niz mera, od kojih su najvažnije: (i) izrada plansko-tehničke dokumentacije, (ii) projektovanje i izgradnja sistema za ranu najavu poplava i (iii) osiguranje od šteta izazavnih poplavama.

Plansko-tehnička dokumentacija obuhvata: (i) karte ugroženosti, šteta i rizika; (ii) prostorne planova urbanih i ruralnih područja zasnovanih na kartama rizika; (iii) tehničke propise za uslove građenja i zaštitu objekata u plavnim zonama.

U tehničku dokumentaciju se mogu uvrstiti i planovi upravljanja velikim vodama u kriznom periodu, kao i strateški planovi finansijske podrške za sanaciju šteta. Posebno su važni planovi u sferi obaveznog osiguranja koje treba, sa jedne strane da visinom premija destimuliše gradnju u zonama visokog rizika, a sa druge strane da nadoknadi štete od poplava.

U praksi se investicione i neinvesticione mere kombinuju kako bi se što više smanjilo nepovoljno dejstvo poplava. Međutim, potpuno eliminisanje rizika i šteta nije moguće zbog slučajne prirode plavnih događaja. Čak i ako bi apsolutna zaštita od poplava bila tehnički moguća, ona ekonomski sigurno ne bi bila opravdana. Zato se projekti zaštite od poplava bave utvrđivanjem *stepena do koga se štete od plavljenja mogu smanjiti, a da to bude ekonomski isplativo i društveno opravdano.*

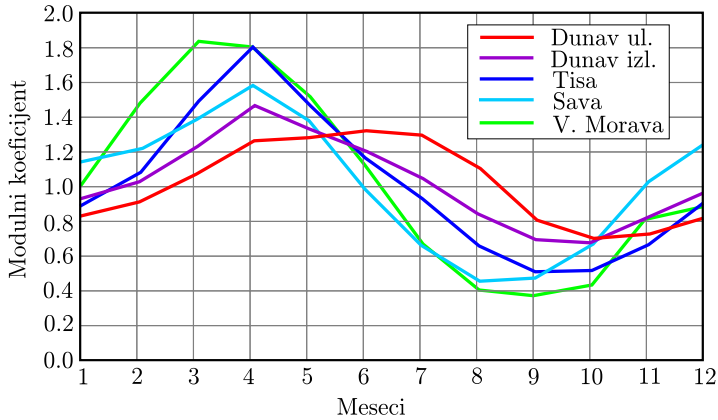
Treba imati u vidu da je zaštita od poplava *dinamički proces* prilagođavanja prirodnim i društvenim promenama [193]. Ona se tokom vremena menja u skladu sa finansijskim mogućnostima, tehnološkim napredkom i socijalnom percepcijom ugroženosti. Na primer, performanse odbrambenog sistema mogu vremenom postati nezadovoljavajuće usled uvećanih zahteva ili nepredviđenih okolnosti (hidroloških promena, urbanizacije, uslova zaštite životne sredine itd.). Razvoj tehnologije se ogleda u savršenijim metodama projektovanja, građenja i komunikacija. U projektovanju se uvode novi metodološki postupci, a u izgradnji, novi materijali i savršenija mehanizacija. Proces zaštite od poplava se *nikada* ne završava, a pred svaku generaciju se postavlja zahtev sagledavanja novih mogućnosti u skladu sa trenutnim prioritetima.

Na savremenu zaštitu od poplava sve veći upliv imaju faktori *netehničke* prirode. Na donošenje odluka sada utiče evolucija sistemskih vrednosti u društvu u pogledu zaštite životne sredine i održivog razvoja. Aktuelne su i promene u socijalnoj sferi; na primer, kako povećati stepen solidarnosti između onih koji nisu ugroženi poplavama i onih koji to jesu? Kako pomiriti tehničku meru isključenja inundacija nasipima sa zahtevom ekološke održivosti vlažnih staništa u inundacijama? Pri tome, treba imati u vidu da se zaštita od poplava ne ograničava samo na zadovoljenje sadašnjih potreba, već da će buduće generacije možda imati sasvim druge potrebe, ili da će raspolagati drugačijim znanjima i tehnologijama. Zato je bitno da sadašnja projektna rešenja ne dovedu do velike degradacije zamljišta, niti da budu trajno „zakovana” u vidu masivnih betonskih konstrukcija [193].

6.2 Hidrološka neizvesnost velikih voda

Velike vode. Sprovođenjem sistematskih dugoročnih merenja u sistemu hidroloških stanica, definiše se režim velikih voda (Slika 6.2). Kao što je poznato, za statističku analizu određene verovatnoće prevazilaženja velikih voda i odgovarajućih povratnih perioda, koriste se nizovi osmotrenih *godišnjih maksimuma protoka*. Alternativno se može koristiti i „metoda prekoračenja praga” (ili „metoda pikova”), koja razmatra nizove sa više maksimuma iz neke godine, izostavljajući sušne godine bez izraženih velikih protoka [194].

Statistička analiza najvećih godišnjih protoka sastoji od formiranja empirijske raspodele registrovanih podataka i iznalaženja teorijske raspodele koja nabolje odgovara empirijskoj raspodeli. U ovoj knjizi se ne razmatra ova standardna hidrološka procedura, već je fokus na *povratnom periodu*, kao statističkom parametru koji se u regulaciji reka rutinski koristi pri usvajanju projektne velike vode.



Slika 6.2: Varijacija protoka na našim velikim rekama; modulni koeficijent je odnos srednje mesečnog i srednjeg godišnjeg protoka u višegodišnjem periodu [256].

Po definiciji, najveći godišnji protok ima povratni period od T godina ako je izjednačen ili premašen, u proseku *bar jednom* svakih T godina. Time je učestalost nekog protoka izražena u godinama. Recipročna vrednost $p = 1/T$ je verovatnoća da će taj protok biti izjednačen ili premašen *u bilo kojoj godini*. Na primer, velika voda povratnog perioda $T = 50$ godina ima verovatnoću $p = 1/50 = 0,02$ (2%) prevazilaženja u bilo kojoj godini.

Treba uočiti da povratni period ništa ne govori o vremenskom rasporedu događanja; 50-godišnja velika voda se ne događa redovno svake pedesete godine! Može se samo govoriti da se, na primer, u periodu od 100 godina, 50-god. velika voda *u proseku* može očekivati dva puta. Može se opet desiti da se dve ovakve velike vode jave uzastopno, sa verovatnoćom: $0,02 \times 0,02 = 0,0004$. Ovo važi pod pretpostavkom da su događaji *nezavisni*, tj. da maksimalni protok jedne godine ne zavisi od maksimalnog protoka bilo koje druge godine.

Statistički rizik. Ako se T -godišnja velika voda razmatra kao događaj koji može imati pozitivan ili negativan ishod, postavlja se pitanje kolika je verovatnoća da se taj događaj ostvari x puta u seriji od N godina. Odgovor na to pitanje daje teorijska *Binomna raspodela* diskretnih (prekidnih) slučajnih promenljivih [14]. Prema ovoj raspodeli, verovatnoća x pozitivnih ishoda (praćena sa $N - x$ negativnih ishoda), jednaka je proizvodu verovatnoća: $p^x (1 - p)^{N-x}$, gde je p – verovatnoća pozitivnog ishoda. Ovo je samo jedna moguća realizacija x pozitivnih i $(N - x)$ negativnih ishoda. Moraju se uzeti u obzir sve moguće realizacije, uključujući i one gde se pozitivni ishodi ne dešavaju uzastopno (jedan za drugim). Broj načina (kombinacija) da se x mogućih događaja izabere u nizu od N događaja definisan je binomnim koeficijentom [194]:

$$\binom{N}{x} = \frac{N!}{x!(N-x)!}. \quad (6.1)$$

Oдавде sledi da je željena verovatnoća jednaka proizvodu bilo kog ishoda i broja načina na koji se taj ishod može ostvariti:

$$f(x) = \binom{N}{x} p^x (1-p)^{N-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (6.2)$$

Binomna raspodela, označena sa $B(N, p)$, ima dva parametra: N i p . Matematičko očekivanje je: $E(x) = Np$, a varijansa: $Var(x) = \sigma_x^2 = Np(1-p)$. Ako je $p = 0,5$ raspodela je simetrična [14]. Sumarna funkcija raspodele je:

$$F(x) = \sum_{i=0}^x \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i} \quad i = 0, 1, 2, \dots, x. \quad (6.3)$$

Pitanje od praktičnog značaja je: koja je verovatnoća da se T -godišnja velika voda desi bar jednom u seriji od N godina? Verovatnoća da se to desi u *bilo kojoj godini* je $p = 1/T$, a broj takvih dešavanja je $B(N, p)$.

Sada se dolazi do pojmova rizika R i pouzdanosti $1-R$, koji su već korišćeni u tački 4.5 ove knjige (videti i Primer 4.3). Rizik je zbir verovatnoća 1, 2, ..., N poplava koje se mogu javiti u periodu od N godina, ili alternativno, to je verovatnoća *odsustva* poplava $P(0)$ u periodu od N godina:

$$R = 1 - P(0) = 1 - (1-p)^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N.$$

Riziku komplementarna veličina je pouzdanost:

$$Po = 1 - R = (1-p)^N = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N.$$

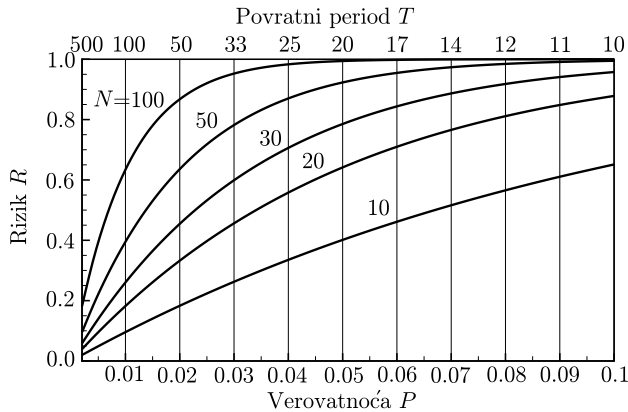
Koncept rizika i pouzdanosti je vrlo važan u hidrotehničkoj praksi, jer se izrazi (6.2) ili (6.2) koriste za usvajanje *projektne velike vode kojoj odgovara prihvatljiv stepen rizika od plavljenja*.

Rizik od poplava može se prema izrazu (6.2) izraziti preko kote nivoa:

$$R = 1 - [1 - P(Z \geq Z_0)]^N = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N, \quad (6.4)$$

gde je: $P(Z \geq Z_0)$ – verovatnoća da u bilo kojoj godini maksimalna kota nivoa Z premaši kotu koja određuje stepen zaštite Z_0 , T – povratni period kote nivoa Z , a N – broj godina izabranog vremenskog perioda. Taj period se najčešće vezuje za vek trajanja sistema za zaštitu od poplava, odnosno period njegove efektivne eksploatacije. (Može se usvojiti i neki drugi period relevantan za realizaciju odbrambenog sistema, npr. period otplate kredita.)

Uticaj broja N prikazan je na Slici 6.3.



Slika 6.3: Zavisnost rizika R od dužine razmatranog vremenskog perioda N (radnog veka objekta); vidi se da rizik raste sa dužinom perioda N , a za izabrani vremenski period, rizik raste sa skraćenjem povratnog perioda T .

■ **Primer 6.1.** Ako se velika voda povratnog perioda $T = 50$ godina dogodila 2000. godine, kolike su šanse da se ista velika voda bar jednom ponovi u periodu do 2035. godine?

Rešenje. $N = 35$ godina. $R = 1 - (1 - 0,02)^{35} = 0,51$.

■ **Primer 6.2.** Uporediti stepene pouzdanosti nasipa ako se ovaj dimenzioniše na 50-god. i na 100-god. veliku vodu, a njegov eksploatacioni vek iznosi 30 godina.

Rešenje. U slučaju 50-god. velike vode, na osnovu (6.2) sledi: $R = 1 - (1 - 0,02)^{30} = 0,455$. To je verovatnoća da će se 50-god. velika voda bar jednom desiti u toku eksploatacije nasipa. Manji je rizik ako se nasip dimenzioniše na 100-god. veliku vodu: $R = 1 - (1 - 0,01)^{30} = 1 - 0,99^{30} = 0,260$. Postoji 26 % šanse da se 100-god. velika voda desi u periodu od 30 godina.

Mogućnost pojave 100-god. velike vode u odnosu na 50-god. veliku vodu je 1,75 puta manja. Pouzdanost nasipa ako se dimenzioniše na 50-god. veliku vodu iznosi: $Po = 1 - 0,455 = 0,545$, a na 100-god. veliku vodu: $Po = 0,740$. Međutim, izbor stepena zaštite (visine nasipa), zavisice od tehničko-ekonomskog balansa između stepena rizika i finansijskog ulaganja.

■ **Primer 6.3.** Kolika je verovatnoća da se 100-god. velika voda *ne dogodi* u periodu od 10 godina, a kolika, u periodu od 100 godina?

Rešenje. Za $p = 1/100 = 0,01$ i $N = 10$: $P(x = 0) = (1 - p)^{10} = 0,99^{10} = 0,90$, a za $N = 100$: $P(x = 0) = 0,99^{100} = 0,37$. Dakle, 37 % je šanse da se u periodu od 100 godina neće javiti 100-god. velika voda (to je pouzdanost). U opštem slučaju, verovatnoća da se neće javiti velika voda veća od T -godišnje velike vode u periodu od T godina iznosi: $P(x = 0) = (1 - 1/T)^T$. Sa porastom vrednosti T , funkcija teži: $P(x = 0) \rightarrow 1/e = 0,368$. Znači: $Po = 0,368$; $R = 1 - Po = 0,632$.

■ **Primer 6.4.** Razmotriti uticaj dužine eksploatacionog veka nasipa sa stanovišta rizika od pojave 50-god. velike vode.

Rešenje. Očitavanjem sa dijagrama na Slici 6.3 (duž vertikale koja odgovara povratnom periodu $T = 50$ godina), za eksploatacioni vek nasipa od $N = 20, 30$ i 50 godina, dolazi se do vrednosti rizika da on bude bar jednom ugrožen prelivanjem $R = 0,33, 0,45$ i $0,64$.

Mogu se izvući ovi zaključci i preporuke:

- Porast rizika sa vremenom eksploatacije nasipa znači da vremenom raste i potreba njegovog preventivnog održavanja.
- Rizično je dimenzionisati objekat na velike vode čiji je povratni period isti, ili blizak, planiranom eksploatacionom veku objekta.
- Ako se usvoji da je eksploatacioni vek nasipa $N = 50$ godina, a prihvatljiv stepen rizika od njegovog prelivanja $R = 0,1$ (10%), onda nasip treba dimenzionisati na velike vode povratnog perioda $T = 475 \approx 500$ godina.

* * *

Statistička veličina R , kao indikator *dugoročnog* rizika, može korisno poslužiti u komunikaciji sa javnošću i donosiocima odluka, što je danas presudno za realizaciju svakog građevinskog projekta. Neupućenima treba pomoći da shvate šta znači slučajnost hidroloških događaja. Na primer, može im se predočiti da je rizik pojave 100-god. velike vode ($Q_{1\%}$) u jednom veku oko 60% ($R = 0,63$), a da je šansa od oko 40% ($1 - 0,63 = 0,37$) da se ova velika voda u tom veku uopšte *neće* pojaviti. Time bi se razbila u javnosti uvrežena zabluda da će, ako se na nekoj reci javila 100-god. velika voda, proteći narednih 100 godina dok se ona ne ponovi. Takođe, javnost treba ubediti da to što se u oblasti koja je zaštićena sistemom nasipa ozbiljna poplava nije dogodila u nekoliko generacija, nikako ne znači da je izgrađeni odbrambeni sistem finansijski promašaj.

Procena rizika od poplava ima i druge društvene reperkusije, u sferi urbanog planiranja, politike kreditiranja i osiguranja, kao i drugih delatnosti. Na primer, rizik da će nasip biti prelišen 100-god. velikom vodom i uništena imovina stečena putem kredita na 30 godina, iznosi: $R = 1 - (1 - 0,01)^{30} = 0,26$. Taj stepen rizika se može uporediti sa drugim vrstama dugoročnog rizika od hazardnih događaja (zemljotresa, požara i dr.), čime se stiču elementi za donošenje odluke o izboru lokacije objekta, visini zaduženja, periodu otplate kredita, polisi osiguranja itd.

Izbor merodavnog povratnog perioda. Prethodni primeri ukazuju na to da je u projektovanju sistema za odbranu od poplava osnovno pitanje izbor povratnog perioda projektnog protoka. Načelno, optimalni stepen zaštite poljoprivrednih površina dobija se upoređenjem troškova izgradnje odbrambenog sistema i dobiti jednako šteta koje bi nastale u odsustvu tog sistema. Ovo će kasnije biti ilustrovano primerom dimenzionisanja nasipa, kao osnovnog objekta tzv. pasivne zaštite od poplava.

U naseljenim područjima, ugroženost stanovništva zahteva da stepen zaštite bude veći od onog koji bi zadovoljio kriterijum materijalnih šteta. Iako svaki slučaj iziskuje posebnu analizu, a uz svest o tome da je povratni period vremenski promenljiva kategorija, u praksi se u ranim fazama projektovanja mogu koristiti izvesne preporuke opšteg karaktera (Tabele 6.2 i 6.3).

Tabela 6.2: *Preporučeni povratni periodi projektnih velikih voda* [143].

Rang	Štićeno područje	Povr. period T (god)
1	Poljoprivredno zemljište sa ekstenzivnom proizvodnjom	6÷7
2	Poljoprivredno zemljište sa intenzivnom proizvodnjom	15÷20
3	Malo i srednje naseljena područja	100÷200
4	Gusto naseljena područja i industrijske zone	200÷1000
5	Značajni urbani centri	> 1000

Tabela 6.3: *Preporučeni povratni periodi projektnih velikih voda* [256].

Prioritet	Broj stanovnika/Materijalna dobra	Povratni period T (god)
1	> 50000	200
	20000÷50000	100
	Vrlo značajna industrija	100
2	5000÷20000	50
	Industrija srednjeg značaja	50
	Objekti vodosnabdevanja	25
3	< 5000	25
	Mala industrija	25
	Poljoprivredne površine	20

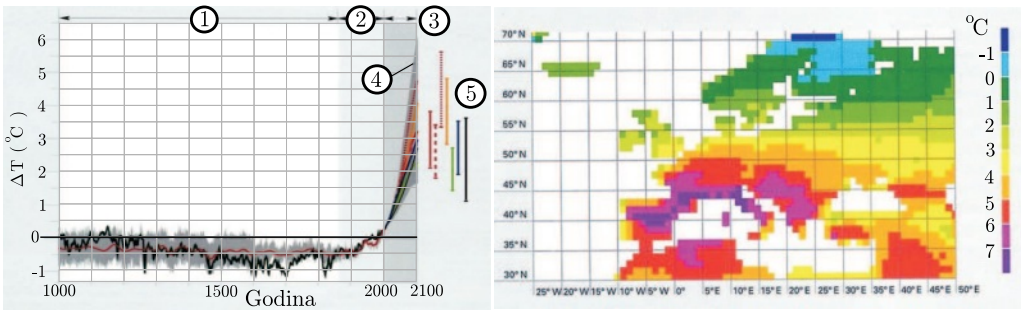
Klimatske promene. Klima se na Zemlji oduvek menjala, ali se termin „klimatske promene” koristi za promene od početka dvadesetog veka kada se sistematska hidrološka merenja sprovode na globalnom nivou.

Prema Evropskoj agenciji za životnu sredinu (EEA), obim i brzina klimatskih promena će u relativno bliskoj budućnosti prevazići klimatske varijacije koje su zabeležene u prethodnom milenijumu [260, 317].

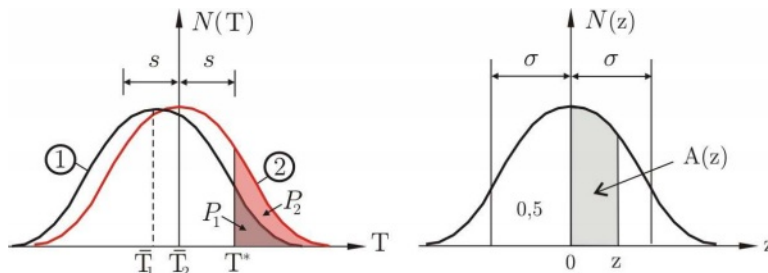
Od posebnog značaja za zaštitu od poplava je pitanje u kojoj meri klimatske promene mogu uticati na režim velikih voda. Smatra se da klimatskim promenama doprinose ljudske aktivnosti kroz sagorevanje fosilnih goriva i emisiju gasova sa efektom „staklene bašte”.

Zbog tendencije globalnog povećanja srednje godišnje temperature (Slika 6.4), uveden je termin „globalno zagrevanje” (engl. *global warming*). O tome govori i sledeći hipotetički primer.

■ **Primer 6.5.** Proceniti stepen temperaturnih promena koje bi nastale povećanjem srednje godišnje temperature za 1°C , sa sadašnje vrednosti $\bar{T}_1=15^{\circ}\text{C}$ na $\bar{T}_2=16^{\circ}\text{C}$. Pretpostavlja se normalna raspodela temperature [260] i da je vrednost standardne devijacije u oba slučaja ista: $\sigma = s = 2^{\circ}\text{C}$ (Slika 6.5).



Slika 6.4: Predviđanje porasta srednje godišnje temperature ΔT ($^{\circ}\text{C}$) (u odnosu na prosek u periodu 1961-1999) do 2100. godine; 1 – rekonstruisani podaci za severnu hemisferu; 2 – podaci merenja na globalnom nivou; 3 – projekcije; 4 – anvelopa svih prognostičkih modela; 5 – opsezi projekcija prema raznim modelima [150, 260].



Slika 6.5: Normalna raspodela temperature u sadašnjim (1) i promenjenim klimatskim uslovima (2) i standardna normalna raspodela.

Rešenje. Razmotriće se verovatnoća prevazilaženja neke temperature, na primer $T^* = 18^{\circ}\text{C}$, koristeći standardnu normalnu raspodelu sa promenljivom $z = (T^* - \bar{T})/s$ (KI-9.3, Slika 6.5) i tablične vrednosti verovatnoće $A(z)$ (KI-D:D). Na osnovu rezultata iz Tabele 6.4 može se zaključiti da faktor potencijalnog porasta date temperature usled globalnog zagrevanja iznosi: $P_2/P_1 = 16/7 \approx 2,3$.

Tabela 6.4: Rezultati proračuna u primeru 6.5.

Stanje	\bar{T} ($^{\circ}\text{C}$)	z	$A(z)$	$P\{T \leq T^*\}$	$P\{T > T^*\}$
(1)	15	1,5	0,43	$0,5+0,43=0,93$	$1-0,93=0,07$ (7%)
(2)	16	1,0	0,34	$0,5+0,34=0,84$	$1-0,84=0,16$ (16%)

Mogu se očekivati razne nepovoljne posledice globalnog zagrevanja. Promena prostornog rasporeda padavina dovešće do toga da se srednje godišnje padavine u severnoj i centralnoj Evropi povećaju, a u jugoistočnoj Evropi smanje (Slika 6.4). Učestalost intenzivnih padavina će rasti. Zimske padavine će biti pretežno u obliku kiše (a ne snega), sa povećanjem površinskog oticaja i rizika od poplava. Razlika između zimskih i letnjih protoka će se povećavati.

Klimatske promene su predmet posebnih, veoma složenih izučavanja. Ovde se samo pominju u sklopu evidentiranja raznih uzroka hidroloških neizvesnosti.

6.3 Tipologija poplava

Karakteristike poplavnih talasa zavise od veličine slivnog područja i vodotoka, kao i od hidrološko-meteoroloških uslova. Poplavni talasi na velikim aluvijalnim rekama se značajno razlikuju od onih na bujičnim vodotocima. Specifičan vid poplava su „ledene poplave” koje nastaju u zimskim uslovima.

Poplave na velikim rekama. Poplavne talase na velikim rekama karakterišu veliki vršni protoci (često mereni u hiljadama m^3/s) i relativna dugotrajnost (više dana i nedelja). Ovi talasi imaju velike zapremine i relativno sporo prostiranje. Zbog velikog slivnog područja i mnoštva pritoka, često imaju više vrhova.

Procena je da je odnos velikih i malih voda na velikim rekama: $Q_{vv}/Q_{mv} \approx 10$. Da bi se stekao osećaj o redu veličine, u Tabeli 6.5 su navedene vrednosti najvećeg protoka povratnog perioda 20 godina na našim velikim rekama.

Tabela 6.5: *Zaokružene vrednosti maks. protoka povr. perioda 20 godina (RHMZ).*

Reka	Hidrološka stanica	Q_{max} (m^3/s)	Reka	Hidrološka stanica	Q_{max} (m^3/s)
Dunav	Bogojevo	6500	Tisa	Senta	3400
Dunav	Smederevo	13100	Tamiš	Jaša Tomić	800
Sava	Sremska Mitrovica	5500	Velika Morava	Ljubičevski most	2100
Drina	Bajina Bašta	3700	Zapadna Morava	Trstenik	1200

Za velike reke je karakteristično veliko plavljenje inundacionih površina i velike štete na urbanim područjima. Izuzetno velike poplave zabeležene su na Dunavu 1965. (sa prolomima nasipa), 1981, 2006. godine, na Tisi 1970, Tamišu 1999. i 2000. godine itd. (Slika 6.6). Ona iz 2014. godine je do sada neprevaziđena po broju izlivenih vodotoka, zahvaćenoj površini i materijalno šteti. Širi pregled ugroženosti od poplava u Srbiji dat je u poslednjem, sedmom poglavlju.

Poplave na našim najvećim rekama imaju prekogranični karakter. Odbrana od takvih poplava zahteva koordinaciju i saradnju susednih država. U tom cilju uspostavljen je sistem satelitskog osmatranja poplava, na globalnom nivou (Slika 6.8).

Bujične poplave. Uglavnom nastaju na malim, brdskim slivovima površine $100 \div 1000 \text{ km}^2$ (kakvih je u Srbiji 116). Odnos velikih i malih voda na bujičnim vodotocima iznosi: $Q_{vv}/Q_{mv} \approx 1000$. Ovako velika neravnomernost ukazuje na izrazitu neustaljenost režima bujičnih tokova. Karakteriše ih nagli nailazak (strmo čelo talasa), kratkotrajnost (minuti, sati) i veliki razorni potencijal (Slika 6.9).

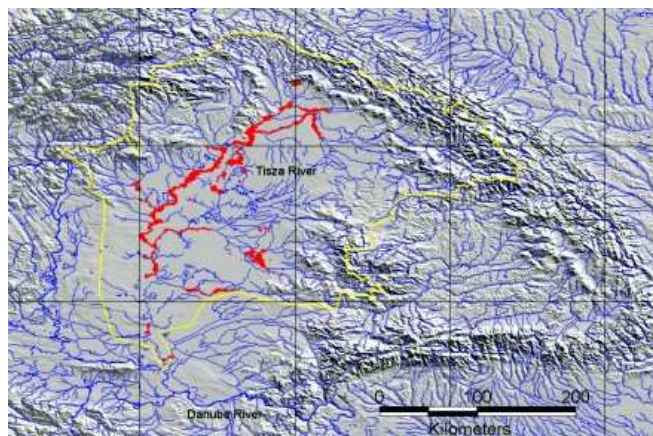
Usled velike brzine toka, bujični talasi pokreću značajne količine krupnog nanosa; moguće je da se čak $10 \div 30\%$ godišnjeg transporta vučenog nanosa obavi samo u jednoj plavnoj epizodi. Bujični tokovi imaju karakter *gustih mešavina*.



Slika 6.6: *Poplave na Dunavu (2006), Južnoj Moravi (2010) i Tamišu (1999).*



Slika 6.7: *Poplava na Drini u Zvorniku (2010) [50].*



Slika 6.8: *Satelitski snimak poplavljenih područja (obežanih crvenom bojom) u slivu Tise 2000. god; ovaj sliv od 109600 km² zahvata teritoriju Ukrajine, Slovačke, Mađarske, Rumunije i Srbije [302].*



Slika 6.9: *Bujične poplave na rekama Ub, Tamnava, Kolubara (2014) [64].*

Čitav niz faktora utiče na pojavu i veličinu bujičnih poplava. Najvažniji uticaj je kombinacija velikog intenziteta kiše i površinskog oticaja, koji zavisi od vlažnosti i sastava (propusnosti) tla. Značajan uticaj ima i veličina, oblik, nagib i obraslost slivnog područja. Prisutni su i razni antropogeni uticaji, kao što su: promena namene površina (urbanizacija povećava koeficijent oticaja). Nagle poplave pospešuju i prirodne katastrofe poput požara i klizišta.

Ledene poplave. Led na rekama, koji se formira pod uticajem niskih temperatura vode i vazduha (ispod 0°C), može imati razne oblike i prema položaju u rečnom koritu deli se na: *površinski led* i *led na dnu*, a prema strukturi i konzistenciji, na: *liskasti led*, *zrnasti led* i *želatinasti led* [60, 174].

Zaustavljanjem i nagomilavanjem leda dolazi do formiranja *ledenih barijera* koje ometaju i usporavaju rečni tok (Slika 6.10). Njihov položaj je određen mestima gde je lokalni transportni kapacitet vodotoka za led manji od priliva leda sa uzvodne deonice (oštre krivine, krajevi strmih deonica, ušća, nagla suženja korita, mostovski stubovi, brane itd.).



Slika 6.10: *Ledene barijere i ledene poplave* [303].

Ledene barijere povećavaju hidrauličke otpore tečenju ([15, 243, 251], koje reka savladava povećanjem potencijalne energije – izdizanjem nivoa i formiranjem uspora, što može dovesti do izlivanja vode iz glavnog korita, odnosno *ledenih poplava*. Ledene barijere od površinskog ili usitnjenog leda imaju lučni front, a ispod konsolidovane ledene kore na površini, protok vode je neporemećen. Mnogo opasnije su barijere formirane od ledenih santi, koje se, sa otopljanjem, pokreću i nagomilavaju dok u potpunosti ne blokiraju rečno korito (Slika 6.10).

Ne postoji univerzalni postupak za predviđanje ledenih barijera, niti ledenih poplava. Uglavnom se primenjuju statističke analize ledostaja i ledohoda, ili se koriste podaci o ledenim poplavama iz prošlosti [243].

6.4 Investicione mere zaštite od poplava

Investicione (ili konstruktivne) mere zaštite od poplava podrazumevaju projektovanje i izvođenje velikih radova, uz ogromna investiciona ulaganja. Kao što je ranije rečeno, investicione mere mogu biti pasivne i aktivne.

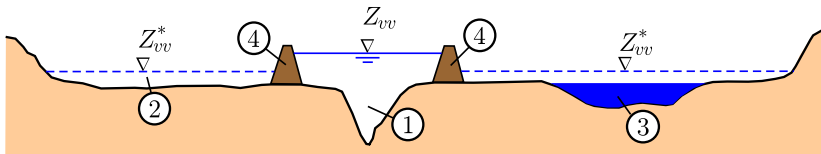
Pasivna zaštita od poplava podrazumeva izgradnju nasipa, kojima se delimično ili u potpunosti sprečava izlivanje vode u inundacije. Ovaj vid zaštite ne smanjuje vršne protoke poplavnih talasa, već samo lokalizuje plavno područje.

Aktivna (ili proaktivna) zaštita od poplava omogućava regulisanje protoka velikih voda pomoću objekata posebne namene – akumulacija, retenzija i rasteretnih kanala. Akumulacije (po mogućstvu locirane u gornjem delu slivnog područja), kao i prirodne ili veštačke, namenske retenzije (locirane duž vodotoka), omogućavaju da se smanji vršni protok poplavnog talasa i da se uspori njegovo napredovanje. Stoga, aktivna odbrana predstavlja sredstvo *upravljanja režimom velikih voda*. U nastavku se detaljno razmatraju oba vida investicionih mera zaštite od poplava.

6.4.1 Pasivna zaštita od poplava

Ovaj vid zaštite od poplava se zasniva na izgradnji nasipa koji, potpuno ili delimično, sprečavaju izlivanje vode van glavnog korita i plavljenje inundacija. Kao što je već rečeno, pasivna zaštita ne utiče na smanjenje vrha poplavnog talasa, već samo na obim plavljenja priobalja, u zavisnosti od stepena isključenja inundacija.

Po svojoj funkciji, inundacije mogu biti (Slika 6.11): (i) protočne („aktivne”), kao sastavni delovi korita za velike vode; (ii) neprotočne („mrtve”), koje imaju ulogu retenzija i (iii) kombinacije (i) i (ii), što je u prirodi najčešći slučaj.



Slika 6.11: Pasivna zaštite pomoću nasipa; 1 – glavno rečno korito; 2 – protočna („aktivna”) inundacija; 3 – neprotočna („mrtva”) inundacija; 4 – nasip; Z_{vv}^* – kota nivoa velike vode pre izgradnje nasipa; Z_{vv} – kota nivoa posle izgradnje nasipa.

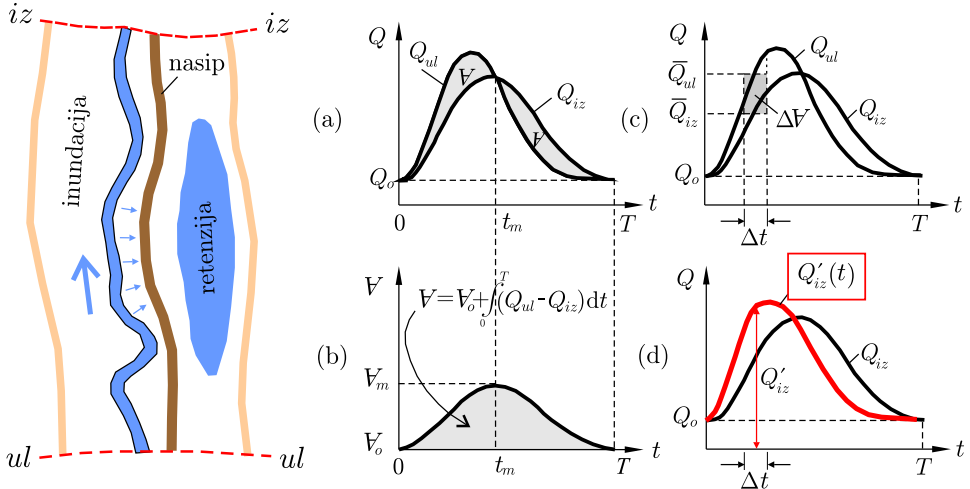
6.4.1.1 Hidrauličko-morfološki efekti izgradnje nasipa

Posledice izgradnje nasipa i isključenja inundacionih područja zavise od tipa inundacije, njene veličine i položaja. Te posledice se moraju sagledati u procesu projektovanja regulacionih mera, da bi projektno rešenje u potpunosti ostvarilo željene ciljeve, a ni u čemu pogoršalo prirodne uslove evakuacije velikih voda. Isključenje inundacija i suženje korita za velike vode (Slika 6.11) ima za posledicu formiranje uspora *uzvodno* od deonice na kojoj je izvršeno suženje, što podrazumeva povećanje kota nivoa, smanjenje uzdužnog nagiba linije nivoa i brzine toka.

Ova mera ne utiče na vršni protok poplavnog talasa. Smanjenje širine proticajnog profila za velike vode dovodi do relativnog ubrzanja poplavnog talasa (u odnosu na prvobitno stanje), što se lako može zaključiti iz izraza za brzinu talasnog prostiranja (KI-5.1-(5.3)): $c = \sqrt{g(A/B)} = \sqrt{gH}$, gde je B – širina aktivnog poprečnog preseka (A), a H – srednja dubina.

Kod velikih reka, u relativno kratkom periodu prolaska poplavnog talasa, ne dolazi do značajne morfološke promene korita. To nije slučaj kod bujičnih vodotoka, gde u veoma kratkom periodu ove promenu mogu biti veoma izražene.

Od posebnog značaja je analiza isključenja neprotočnog („mrtvog”) dela inundacije (Slika 6.12).



Slika 6.12: Hidruličke posledice isključenja inundacija; (a) retenziona zapremina korita za veliku vodu (∇) pre izgradnje nasipa; (b) promena retenzione zapremine u toku prolaska poplavnog talasa; (c) inkrementalni postupak određivanja retenzione zapremine korita za veliku vodu pre izgradnje nasipa; (d) promena izlaznog hidrograma posle isključenja inundacije sa retenzijom.

Taj deo predstavlja prirodnu *retenziju*, koja ima ključnu ulogu u prihvatanju zapremine poplavnog talasa (ili dela te zapremine). Izgradnjom nasipa smanjuje se ekspanzioni prostor za rasplinjavanje talasa i podiže nivo velikih voda u glavnom koritu. Ako je koncentracija protoka u glavnom koritu prevelika, može čak doći do erozije korita i kosina nasipa.

Hidraulička interpretacija isključenja inundacija prikazana je na Slici 6.12. Pre izgradnje nasipa, zapremina poplavnog talasa zadržana na deonici sa retenzijom jednaka je površini između ulaznog i izlaznog hidrograma na Slici 6.12-a. Promena ove zapremine tokom prolaska poplavnog talasa prikazana je na Slici 6.12-b. Postupak određivanja retenzione zapremine korita za veliku vodu na predmetnoj deonici ∇ , sproveden po intervalima Δt prikazan je na Slici 6.12-c. Ovaj postupak zasnovan je na pretpostavci da je retenziona zapremina deonice *isključivo funkcija izlaznog protoka*: $\nabla = \nabla(Q_{iz})$ (KI-5.5.4.1-Sl:5.22).

Posle izgradnje nasipa, retenzioni kapacitet korita za veliku vodu (sa neprotočnom inundacijom) biva značajno smanjen. Pri nailasku poplavnog talasa, dolazi do povećanja protoka na nizvodnom kraju deonice (u odnosu na stanje bez nasipa), a sa odlaskom talasa, do smanjenja protoka (Slika 6.12-d). Ovo je praćeno promenama vodostaja i uzdužnog nagiba linije nivoa, što se, rutinskom primenom savremenog softvera [251] može vrlo lako pokazati.

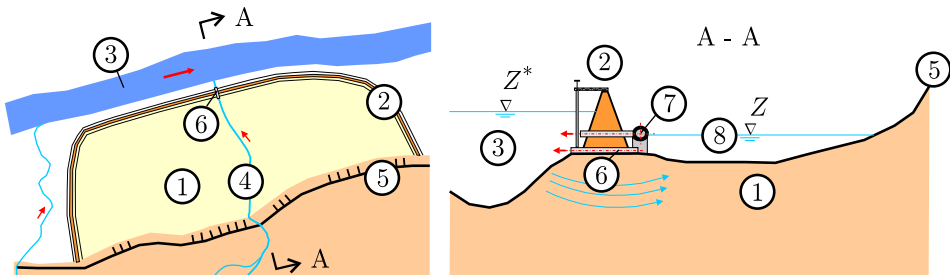
Sa poznavanjem retenzionog kapaciteta pre izgradnje nasipa, povećanje protoka na nizvodnoj deonici može se grubo proceniti i samo pomoću jednačine kontinuiteta:

$$Q'_{iz} = Q_{iz} + \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (6.5)$$

gde su Q_{iz} i Q'_{iz} – protoci pre i posle izgradnje nasipa u bilo kom trenutku na sredini izabranog intervala Δt , a ΔV – odgovarajući priraštaj zapremine (Slika 6.12-d).

6.4.1.2 Zaštita od unutrašnjih voda

Na Slici 6.13 prikazana je dispozicija tzv. „unutrašnjeg branjenog područja”, zaštićenog nasipom od velikih voda glavne reke – „spoljašnjih voda”, ali ugroženog pritokama – „unutrašnjim vodama”.



Slika 6.13: Zaštita od unutrašnjih voda; 1 – unutrašnje branjeno područje; 2 – glavni nasip (odbrambena linija); 3 – reka (spoljašnje vode); 4 – pritoka (unutrašnje vode); 5 – visoki teren; 6 – gravitacioni ispust; 7 – pumpna stanica; 8 – retenzija.

U periodu niskih nivoa u glavnoj reci, unutrašnje vode se gravitaciono ispuštaju u reku kroz ispust (ili više ispusta duž odbrambene linije). U periodu visokih nivoa u glavnoj reci, unutrašnje vode se pumpanjem ispuštaju u reku.

Hidrologija unutrašnjih voda. Mogućnost istovremene pojave velikih voda glavne reke i njenih pritoka usložnjava hidrološke proračune. Ako postoji konzistentna veza između spoljašnjih i unutrašnjih voda (u toj meri da se jedna može predvideti na osnovu one druge), za vode se kaže da su *korelisane*. Ako su i meteorološki i fizički procesi međusobno povezani, spoljašnje i unutrašnje vode su međusobno *zavisne*. Podudaranje nivoa i protoka spoljašnjih i unutrašnjih voda naziva se *koincidencija*, bez obzira da li su ove vode korelisane ili zavisne.

Ako nema ko incidencije, ne postoji mogućnost istovremene pojave spoljašnjih i unutrašnjih velikih i malih voda, a problemi plavljenja unutrašnjeg branjenog područja se mogu rešavati bez spoljašnjih graničnih uslova, što značajno olakšava proračune. Nažalost, to je retko kad slučaj. U drugoj krajnosti – potpune ko incidencije - velike unutrašnje vode uvek nailaze na visok nivo spoljašnje vode; gravitacioni ispusti nisu u funkciji, pa se analiza plavljenja unutrašnjeg područja opet može pojednostaviti. Realno stanje je između nepostojeće i potpune ko incidencije.

Na raspolaganju su dve kategorije hidroloških metoda: (i) metode analize registrovanih hidroloških serija i (ii) metoda analize učestalosti koincidencije [244]. Za primenu ovih metoda neophodno je prikupiti podloge, koje čine:

- topografski podaci (sliv, teren, korita vodotoka, retrenzije);
- podaci o kišama (prosečne i ekstremne vrednosti u slivu);
- parametri površinskog oticaja (vršni protok, zapremina talasa);
- nivogrami u glavnoj reci (mesta gravitacionih ispusta i pumpnih stanica);
- podaci o ispuštima i pumpama (raspored, kapacitet, upravljanje);
- ostali podaci (kanalizacioni sistem, saobraćajnice itd.).

Analiza hidroloških serija je zasnovana na podacima o poplavama u prošlosti i sastoji se od sekvencijalne simulacije dotoka na unutrašnje branjeno područje, oticaja sa njega i promene zapremine retenziranih (zadržanih) voda, sa ciljem da se dođe do plavnih nivoa u zavisnosti od zadatih nivoa u glavnoj reci. Pri tome se mogu računati stanja sistema u zavisnosti od uslova u prošlosti (u periodu osmatranja), sadašnjosti i u budućnosti (shodno planiranom razvoju unutrašnje oblasti).

Moguće su tri varijante hidrološke analize [244], korišćenjem :

- (1) *registrovanih* neprekidnih hidroloških serija u nekom periodu;
- (2) niza *diskretnih događaja*;
- (3) *stohastički generisanih* neprekidnih hidroloških serija.

(1) *Metoda neprekidnih hidroloških serija* je računski veoma zahtevna. Unutrašnja oblast se deli na podslivove prema položaju mernih stanica, nameni površina i prostornih celina za analizu šteta od plavljenja. Koristeći podatke o kišama registrovanim u prošlosti i usvojene podatke o prethodnoj vlažnosti i infiltraciji, računaju se hidrogrami površinskog oticaja za svaki podsliv. Ovi hidrogrami se sumiraju i računa se transformacija talasa unutrašnjih voda kroz sistem, sve do linije odbrane, pri čemu se uzima u obzir i uticaj retenzionih prostora. Dinamiku ispuštanja unutrašnjih voda kroz liniju odbrane (glavni nasip) diktiraju trenutne denivelacije (u odnosu na nivo u glavnoj reci) i karakteristike gravitacionih ispusta i crpnih stanica.

Kalibracija računskog modela obuhvata slaganje računskih i registrovanih hidrograma i nivograma, učestalost preliivanja saobraćajne infrastrukture, veličine šteta i drugih pokazatelja. Korekcija rezultata se postiže promenom vrednosti parametara površinskog oticaja, prethodne vlažnosti i filtracije, rapavosti i pretpostavljenog režima rada evakuacionih objekata u sastavu odbrambene linije.

Rezultati proračuna se prikazuju u vidu krivih trajanja/učestalosti kota nivoa i nivograma na lokacijama od interesa, što je osnova za procenu šteta od plavljenja od unutrašnjih voda. Osnovni nedostaci ovog pristupa mogu biti nereprezentativnost hidrološke serije (usled isuviše kratkog perioda merenja vodostaja), neizvesnosti velikog broja podataka koje zahteva proračun i komplikovanost kalibracije.

(2) *Metoda diskretnih događaja* ima za cilj izradu krivih učestalosti unutrašnjih voda za područja pod uticajem koincidencije velikih spoljašnjih i unutrašnjih voda. Razmatraju se dva slučaja. Prvi se odnosi na analizu uticaja izabranog registrovanog događaja ekstremno velike spoljašnje vode kada se *istovremeno* javi kiša velikog intenziteta na unutrašnjem području. Drugi slučaj se odnosi na analizu povezanosti niskog nivoa spoljašnje vode sa plavljenjem unutrašnje oblasti koje je izazvano registrovanim ili hipotetičkim kišnim događajem. Registrovane kišne epizode se koriste za poljoprivredna, a hipotetički kišni događaji, za urbana područja. Rezultat dva razmatrana slučaja su funkcije učestalosti nivoa, koje se zatim kombinuju primenom formule za zajedničku verovatnoću diskretnih promenljivih [244].

Metode (1) i (2) su slične po proračunu kiše-površinski oticaj i njihova primena zavisi od reprezentativnosti registrovanih događaja. Razlika je u tome što metoda (2) zahteva manji broj događaja, koristi manji broj računskih parametara, uvodi zajedničku verovatnoću diskretnih promenljivih i pogodnija je za kompleksne hidrološke sisteme. Nedostatak metode (2) je u mogućnosti pogrešnog izbora događaja, tj. izostavljanja događaja koji mogu imati značajan uticaj na konačne rezultate.

(3) *Metoda stohastički generisanih serija* daje statistički očekivane hidrološke događaje, uključujući i kombinacije spoljašnjih i unutrašnjih događaja koji su ređi od registrovanih. To omogućava da projektovanje objekata i upravljanje poplavama bude sigurnije nego u slučaju da se bazira na subjektivno izabranom događaju iz prošlosti. Generisane serije se mogu nadovezati na postojeće registrovane serije.

Međutim, kada je u pitanju zaštita unutrašnjih područja, metoda (3) nije do sada ušla u širu primenu. Razlog je u tome što je generisanje sintetičkih serija vezano za srednje mesečne, sezonske i godišnje protoke, a za efikasno upravljanje poplavama na unutrašnjem području neophodne su serije dnevnih i časovnih protoka.

Za zaštitu unutrašnjih područja veoma je bitna *verovatnoća koincidencije* velikih spoljašnjih i unutrašnjih voda. Potrebno je definisati verovatnoću istovremene pojave kota nivoa spoljašnjih velikih voda Z^* i visokih kota nivoa unutrašnjih voda Z (Slika 6.13). Prvo se (na osnovu merenih vodostaja), definiše kriva zastupljenosti (empirijske raspodele), ili verovatnoće prevazilaženja kota nivoa u glavnoj reci: $P(Z^*)$. Diskretizacija ove krive se obavlja očitavanjem na jednakim odstojanjima niza vrednosti $P(Z_i^*)$, $i = 1, 2, \dots, N$. Podrazumeva se: $\sum_{i=1}^N P(Z_i^*) = 1$. Za datu vrednost Z_i^* (granični uslov), razmatra se niz hipotetičkih kota nivoa unutrašnjih voda Z (koje su rezultat analize računске kiše – površinski oticaj), pa se definiše *uslovna verovatnoća*: $P(Z/Z_i^*)$, a zatim i *potpuna verovatnoća* prevazilaženja [194]:

$$P(Z) = \sum_{i=1}^N [P(Z/Z_i^*) \times P(Z_i^*)]. \quad (6.6)$$

Račun se ponavlja, dok se ne obuhvate svih N kota spoljašnjih voda Z^* . Opisana metoda je jednostavnija od metoda hidroloških serija i manje zahtevna u pogledu

kalibracije. Međutim, može se dovesti u pitanje njena validnost ako je narušena pretpostavka o nezavisnosti hidroloških događaja.

Mere za kontrolu unutrašnjih voda. Ne razlikuju se bitno od mera koje se primenjuju kod zaštite od spoljašnjih velikih voda. Sastoje se od izgradnje objekata u sklopu odbrambene linije: glavnog nasipa, gravitacionih ispusta, pumpnih stanica i retenzionih bazena. Tu spadaju i objekti na unutrašnjem branjenom području koji nisu u neposrednoj blizini odbrambene linije.

Glavni nasipi. Pri trasiranju nasipa vodi se računa o nekoliko faktora: (i) da sliv unutrašnjih voda bude što manji, sa pogodnim položajem drenažnih objekata; (ii) da, ukoliko dođe do prelivanja nasipa, višak vode bude usmeren i prihvaćen na povoljnoj lokaciji; (iii) da se očuva kapacitet vodotoka na unutrašnjem području i rezervišu potencijalne retencione površine.

Gravitacioni ispusti. Radi se o cevastim provodnicama u telu nasipa sa zatvaračima, pomoću kojih se akumulisane unutrašnje vode iz branjenog područja ispuštaju u reku (Slika 6.13). Položaj i dimenzije ispusta zavise od veličine protoka, retencione zapremine, ekonomskih, ekoloških i drugih uslova. Za dimenzionisanje ispusta koriste se hidraulički proračuni sa raznim početnim i graničnim uslovima. Za svaki gravitacioni ispust definiše se kriva protoka u zavisnosti od kote nivoa u glavnoj reci. Jedan veći ispust je povoljnije rešenje od nekoliko manjih, iako može zahtevati sistem sabirnih kanala.

Retenzioni bazeni. Imaju svrhu da smanje kapacitet i cenu gravitacionih ispusta i pumpnih postrojenja. Povećavaju pouzdanost sistema zaštite omogućavajući dodatno operativno vreme pre pojave kritičnih nivoa. Formiraju se u prirodnim depresijama, ili iskopom na pogodnim lokacijama. Najbolje je ako su u blizini odbrambene linije, gravitacionih ispusta i pumpnih stanica. Ako su udaljeni, povezuju se kanalima odgovarajuće propusne moći. Funkcija retenzionih bazena ne sme biti ugrožena urbanim razvojem, promenom namene površina ili nedostatkom održavanja, što se reguliše odgovarajućim propisima.

Pumpna postrojenja. Služe za evakuaciju unutrašnjih voda kroz nasip, kada gravitacioni ispusti nisu u funkciji zbog visokog nivoa u reci. Visinski položaj treba tako projektovati da se pumpe mogu pokrenuti bar jednom ili dva puta u toku godine zbog održavanja. Koriste se ne samo za evakuaciju padavina, već i podzemnih i sanitarnih voda. Zbog visokih troškova pumpe se stavljaju u funkciju tek pošto su iscrpena druga sredstva zadržavanja vode (retenzioni bazeni) i odvodnjavanja (ispusti). Ako je koincidencija spoljašnjih i unutrašnjih voda malo verovatna, pumpna postrojenja nisu neophodna; u protivnom, ona su neizbežna. Njihova opravdanost se utvrđuje hidrološkim, hidrauličkim i ekonomskim analizama.

Najpovoljniji položaj pumpnih stanica je neposredno uz glavni nasip, u direktnoj vezi sa retenzionim bazenom ili dovodnim kanalom i na dovoljnom odstojanju od gravitacionih ispusta. Povoljnije je jedno veće pumpno postrojenje od više

manjih. Pri projektovanju navedenih objekata mora se voditi računa o povezivanju postojeće kanalizacione mreže sa evakuacionim objektima na odbrambenoj liniji. Posebnim „interceptor” provodnicima može se minimizirati broj pumpnih stanica i gravitacionih ispusta.

6.4.1.3 Analiza šteta

Termin „hazard” označava pojavu poplavnog događaja sa određenom verovatnoćom realizacije, a termin „rizik”, potencijalnu direktnu štetu usled takvog događaja, izraženu kroz novčani gubitak. Kako je šteta od poplava slučajna veličina, zadatak definisanja rizika od poplava je ustvari utvrđivanje *očekivane godišnje štete* od mogućih poplavnih događaja. Ova veličina predstavlja osnovu za projektovanje i ekonomsko vrednovanje sistema za zaštitu od poplava.

Shodno ranijim definicama rizika, dugoročni rizik od poplava je matematički definisan verovatnoćom da će nivo u reci Z premaštiti određenu kritičnu vrednost Z^* u bilo kojoj godini zadanog perioda (najčešće „životnog veka” nasipa):

$$R = 1 - [1 - P(Z \geq Z^*)]^m, \quad (6.7)$$

gde je R – rizik, P – verovatnoća, a m broj godina razmatranog perioda.

Kako pojam rizika, pored verovatnoće plavnog događaja (hazarda), obuhvata i posledicu – direktnu materijalnu štetu, rizik od poplava je proizvod:

$$R = P S, \quad (6.8)$$

gde je S – direktna šteta od plavljenja [din, €].

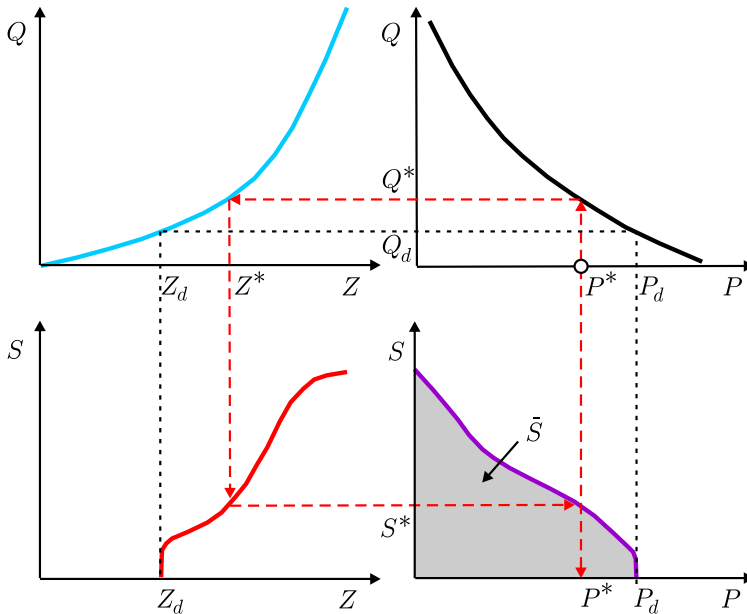
Očekivana godišnja šteta¹ određuje se integralom funkcije šteta:

$$\bar{S} = \int_0^1 S(P) dP \quad [\text{din/god, €}/\text{god}] \quad (6.9)$$

Izraz (6.9) pokazuje da očekivana godišnja šteta obuhvata *sumarno dejstvo poplava raznih verovatanoća pojave, u toku višegodišnjeg perioda.*

Deterministički pristup. Tradicionalni deterministički postupak određivanja štete podrazumeva jednoznačne zavisnosti ulaznih hidrološko-hidrauličkih i ekonomskih veličina, pa će shodno tome, i šteta biti *jednoznačna* veličina. Na Slici 6.14 prikazan je skup međusobno povezanih dijagrama koji služe za određivanje očekivane godišnje štete. Za veličinu koja određuje „opterećenje” ili „intenzitet hazarda”, izabrana je kota nivoa Z , dok je „otpornost odbrambenog sistema” definisana pragom štete Z_d – najnižom kotom nivoa vode pri kome se javlja šteta (npr. kota krune nasipa). Kriva štete $S(Z)$ je kriva „ranjivosti odbrambenog sistema”, a kriva verovatnoće štete $S(P)$, „kriva rizika” [206, 118].

¹Po definiciji, matematičko očekivanje je: $E(S) = \int_{-\infty}^{\infty} S f(S) dS$; kako je funkcija gustine raspodele $f(S) = dP(S)/dS$, sledi: $E(S) = \int_0^1 S(P) dP \equiv \bar{S}$.



Slika 6.14: Determinističko određivanje očekivane godišnje štete; kriva $Q(Z)$ je osrednjena kriva protoka, dobijena na osnovu registrovanih vodostaja; kriva $Q(P)$, određena statističkom obradom najvećih godišnjih protoka u višegodišnjem periodu, opisuje verovatnoću prevazilaženja određenog protoka; $S(Z)$ je zavisnost štete od kote nivoa, procenjena na osnovu podataka iz prošlosti, ili pomoću tzv. sintetičkih krivih šteta [186]; rezultujući dijagram $S(P)$ predstavlja krivu rizika, a zatamnjena površina predstavlja očekivanu godišnju štetu; isprekidana crvena linija pokazuje kako se određuju tačke na krivoj šteta $S(P)$ [206, 118].

Deterministički postupak određivanja štete na Slici 6.14 obuhvata samo prirodnu varijabilnost velikih voda (hidrološku neizvesnost), a zanemaruje ostale oblike neizvesnosti. Kao što je već rečeno, ulazni podaci i rezultat proračuna su jedinstvene vrednosti.

Korak u pravcu obuhvatanja drugih neizvesnosti u okviru determinističkog pristupa je primena analize oseljivosti, koja ima za cilj da se ustanovi uticaj promene ulaznih podataka (ili pretpostavki, scenarija) na rezultate proračuna. Na taj način se razmatra opseg vrednosti očekivane godišnje štete, pa se iz skupa mogućih vrednosti usvaja ona za koju se smatra da je u datom slučaju merodavna. Proračun očekivane godišnje štete je preduslov planiranja izgradnje objekata za odbranu od poplava, kao i njihovog održavanja, kao što pokazuje primer u nastavku.

■ **Primer 6.6.** Propust na autoputu dimenzionisan je na protok $Q_p = 0,85 \text{ m}^3/\text{s}$, koji odgovara vršnom protoku 10-godišnje velike vode. Procena je da bi pri pojavi 100-godišnje velike vode propust pretrpeo totalnu štetu, odnosno da bi propust, kao i pripadajući deo puta, bili u potpunosti razoreni. Pri poplavama povratnih

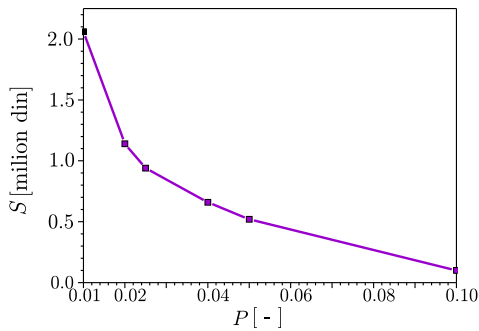
perioda između 10 i 100 godina, moguća su izvesna oštećenja, izazvana erozijom trupa puta i korita nizvodno od propusta. U Tabeli 6.6 date su vrednosti vršnih protoka karakterističnih poplavnih talasa i njihovih verovatnoća izjednačavanja i prevazilaženja.

Tabela 6.6: Verovatnoća pojave velikih voda

Protok Q [m^3/s]	0,84	1,26	1,40	1,68	1,88	2,80	4,20
Verovatnoća P [%]	10	5	4	2,5	2	1	0

Neka se štete mogu računati pomoću izraza: $S = 10^5 + 10^6 (Q - Q_p)$, gde je: S – šteta (din), Q – vršni protok poplave, a Q_p – projektni protok za propust. Sračunati visinu očekivane (verovatne) godišnje štete, na osnovu koje će se planirati sredstva za održavanje propusta i pripadajućeg dela puta.

Rešenje. Kriva verovatnoće štete data je na Slici 6.15. Postupak proračuna prikazan je u Tabeli 6.7. Može se konstatovati da za održavanje autoputa na mestu propusta treba godišnje izdvojiti oko 55000 dinara.



Slika 6.15: Verovatnoća štete u primeru 6.6.

Tabela 6.7: Proračun verovatne godišnje štete na mestu propusta.

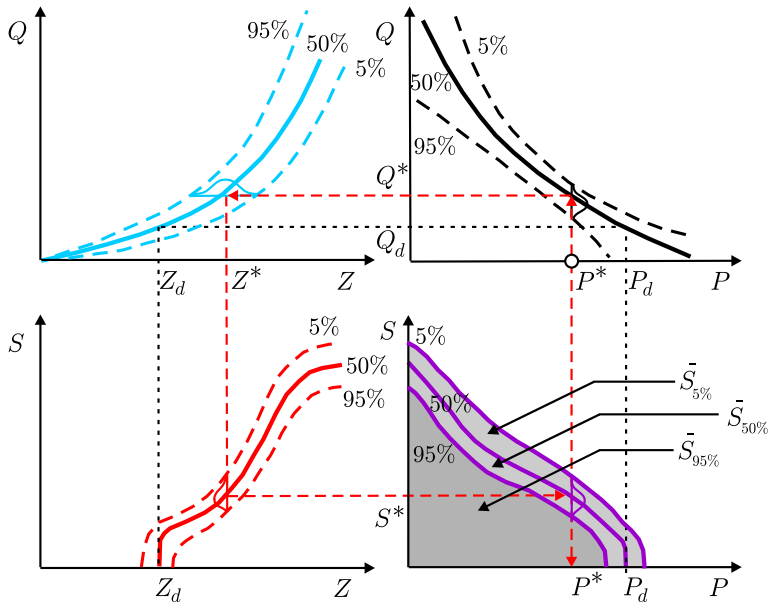
Q [m^3/s]	P [%]	P [-]	$T = 1/P$ [god]	S [din]	ΔP [-]	S_{sr} [din]	$\Delta P S_{sr}$ [din]	Kumulativno [din]
0,84	10	0,100	10	100000				0
1,26	5	0,050	20	520000	0,050	310000	15500	15500
1,40	4	0,040	25	660000	0,010	590000	5900	21400
1,68	2,5	0,025	40	940000	0,015	800000	12000	33400
1,88	2	0,020	50	1140000	0,005	1040000	5200	38600
2,80	1	0,010	100	2060000	0,010	1600000	16000	54600

Stohastička nadgradnja. U proceni šteta prisutne su brojne neizvesnosti [241]:

- varijabilnost padavina i oticaja (hidrološka, stohastička neizvesnost);
- nedovoljno poznavanje prirodnog sistema (epistemološka neizvesnost);
- nesavršenost i ograničenja računskih modela koji opisuju prirodne pojave;
- nesigurne podloge (batimetrija/topografija, hidraulički otpori itd.);
- ekonomski i socijalni faktori (vrednost objekata, namena površina itd.);

Navedene neizvesnosti se tradicionalno nisu eksplicitno razmatrale pri projektovanju sistema za zaštitu od poplava, već su implicitno uzimane u obzir kroz subjektivno usvojene vrednosti koeficijenta sigurnosti, odnosno rezerve u dimenzionisanju objekata, kao što je na primer rezerva u nadvišenju nasipa.

Ako se, umesto jedinstvenih zavisnosti na Slici 6.14, ulazne veličine tretiraju kao slučajne sa odgovarajućim raspodelama, zavisnosti postaju višeznačne, kao što je prikazano na Slici 6.16. Umesto jedne vrednosti očekivane godišnje štete, dobija se *funkcija gustine raspodele* očekivane godišnje štete. Statistike te raspodele se mogu naknadno odrediti, a srednja vrednost se obično koristi kao merodavna za određivanje potrebnog stepena zaštite od poplava.



Slika 6.16: Stohastičko određivanje šteta od poplava; isprekidane linije obeležene vrednostima 95% i 5% označavaju intervale poverenja, a puna linija obeležena 50%, povezuje medijane datih funkcija gustine raspodele [206, 118].

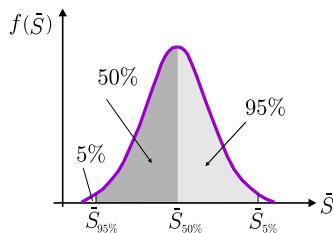
Za procenu potencijalne godišnje štete može se koristiti nekoliko stohastičkih modela. Jedan pristup je zasnovan na simulacionoj metodi Monte Karlo [118, 242]. Ova metoda zahteva veliki broj podataka, generisanih pomoću slučajnih brojeva po unapred zadatim raspodelama. Moguće su dve varijante.

(1) *Generisanje odstupanja.* U ovoj varijanti, očekivana godišnja šteta (\bar{S}) se računa prema postupku prikazanom na Slici 6.14, s tim da se u svakom simulacionom koraku, vrednostima Q^* , Z^* i S^* dodaje slučajna komponenta – „odstupanje” ε , sa određenom funkcijom gustine raspodele.

Najčešće je to dvoparametarska standardizovana normalna raspodela, kod koje je srednja vrednost jednaka nuli, dok se vrednosti standardne devijacije σ_z zadaju. U slučaju da je funkcija $Q(P)$ definisana teorijskom raspodelom log Pearson III, odstupanje se opisuje t-raspodelom [242]. Generatorom slučajnih brojeva po usvojenim raspodelama, dodeljuju se odstupanja veličinama Q^* , Z^* i S^* , čime i zavisnosti $Q(P)$, $Q(Z)$, $S(Z)$ i $S(P)$ dobijaju slučajan karakter (Slika 6.16). Pretpostavlja se da su odstupanja pri poplavama nekorelisana.

(2) *Generisanje funkcija.* Ova varijanta se zasniva na generisanju slučajnih brojeva za parametre ranije utvrđenog tipa teorijske raspodele najvećih godišnjih protoka. Najčešće se radi o raspodelama tipa Pearson III ili log Pearson III. Na taj način se u toku jednog simulacionog ciklusa generiše slučajna funkcija $Q(P)$ iz skupa mogućih funkcija. Slučajne funkcije $Q(Z)$ i $S(Z)$ generišu se kao u prethodnoj varijanti.

U svakom simulacionom koraku (po obe varijante), dobija se vrednost \bar{S} . Nakon velikog broja simulacionih koraka, dobija se serija vrednosti \bar{S} . Statističkom obradom dolazi se do odgovarajuće funkcije gustine raspodele veličine \bar{S} (Slika 6.17).



Slika 6.17: Shematski prikaz gustine raspodele očekivane godišnje štete.

Da bi simulacija dala pouzdane rezultate, broj simulacionih koraka mora biti dovoljno velik. Kriterijum završetka proračuna je kada vrednosti standardne devijacije ili koeficijenta varijacije dostignu svoj minimum i više se ne menjaju u narednim simulacionim koracima.

6.4.1.4 Ekonomska opravdanost izgradnje sistema zaštite

Za ocenu ekonomske opravdanosti projekata u hidrotehnici koristi se analiza troškova i dobiti („cost-benefit”), pa je to slučaj i u oblasti zaštite od poplava. Ekonomsko vrednovanje sistema zaštite od poplava svodi se na poređenje *godišnjih* troškova C i dobiti B .

U proračunu troškova (C), polazi se od potrebnih investicija, na osnovu kojih se, uzimajući u obzir vremensku varijabilnost kapitala, dolazi do godišnjih troškova eksploatacije sistema.

Visina godišnjih dobiti (B) je iskazana kroz odsustvo štete koja se javljala pre izgradnje sistema. U proračunu se uzima u obzir samo direktna novčana dobit,

bilo da je neposredno vezana za projektovani zaštitni sistem, ili proizilazi iz nje-gove eksploatacije tokom vremena. Dobiti (koristi) koje se ostvaruju u ekološkoj i socijalnoj sferi se teško kvantifikuju, pa se uglavnom samo deklarativno obrazlažu.

Ekonomsko vrednovanje može se sprovesti na nivou pojedinih objekata sistema za zaštitu od poplava, ili sistema u celini. Primenjuju se kriterijumi odnosa dobiti i troškova B/C i neto dobiti $B-C$. Projekat sistema zaštite od poplava je ekonomski opravdan ako je dobit veća od troškova: $B/C > 1$ i $B - C > 0$.

Međutim, kada su u pitanju poplave, treba imati u vidu da, osim monetarnih odnosa, postoje i drugi faktori koje treba imati u vidu. To je pre svega, potencijalni gubitak ljudskih života. Iako je primarni cilj sistema odbrane od poplava zaštita ljudskih života, javnost mora biti svesna da svaki takav sistem neizbežno sadrži izvestan stepen (prihvatljivog) rizika.

Troškovi izgradnje sistema. Sastoje se od *direktnih* i *indirektnih* troškova. Direktni troškovi proizilaze iz predmera i predračuna i obuhvataju sve pozicije građevinskih radova (iskop, nasipanje, regulacione građevine, lokalna saobraćajna infrastruktura itd.) Indirektni troškovi obuhvataju troškove eksproprijacije, projektovanja, istražnih radova i nepredviđenih izdataka. Troškovi projektovanja i nepredviđeni troškovi obično se definišu procentualno u odnosu na ukupne direk-tne troškove.

Godišnji troškovi se računaju na osnovu ukupnih troškova izgradnje sistema (in-vesticija). Ako se izuzmu plate zaposlenih, ovi troškovi se sastoje od: amortizacije (T_{am}), anuiteta – rate otplate kredita (T_{an}), troškova održavanja (T_{od}) i troškova osiguranja (T_{os}):

$$T_{god} = T_{am} + T_{an} + T_{od} + T_{os} \quad (6.10)$$

Kao što je poznato, godišnje izdvajanje u amortizacioni fond služi da bi se nadok-nadilo smanjenje kapitalne vrednosti objekta tokom vremena zbog njegovog star-jenja, odnosno da bi se finansirala izgradnja novog objekta iste investicione vred-nosti. Amortizacija se vezuje za fizički vek građevinskog objekta (najčešće 50 go-dina), ili za period njegove pune funkcionalnosti.

Amortizaciono izdvajanje može biti konstantno (isto svake godine), ili promenljivo. Može se računati integralno za sistem u celini, ili za svaku njegovu komponentu (podsystem) posebno. Prvi pristup se primenjuje kada sve komponente imaju isti funkcionalni vek; u protivnom, primenjuje se drugi pristup, a ukupna amortizacija je jednaka sumi parcijalnih iznosa.

Sistemi za zaštitu od poplava su veoma skupi i po pravilu se realizuju uz pomoć kredita, čija otplata traje desetinama godina. U preliminarnim analizama, naj-lakše je pretpostaviti da godišnja rata za otplatu kredita (anuitet) ima uvek istu vrednost.

Za proračun amortizacije i anuiteta koriste se formule diskontnog računa. Ova oblast inženjerske ekonomije obrađena je u mnoštvu knjiga, a osnovni pojmovi se mogu naći i na internetu, npr. [297, 296]. Izostavljajući mnoge aspekte (kao što su inflacija, interkalarne kamate, dinamika ulaganja tokom gradnje itd.), ovde se opisuje najjednostavniji model procene godišnjih troškova, zasnovan na dva izraza:

$$A = F \left[\frac{i}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (6.11)$$

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (6.12)$$

gde je: A – godišnje izdvajanje, P – početno ulaganje, F – vrednost uloženih sredstava (investicija) na kraju obračunskog perioda, i – nominalna (godišnja) kamatna stopa i N – broj godina u obračunskom periodu.

Izraz (6.11) koristi se za proračun godišnjeg izdvajanja za amortizaciju, koje se definiše u odnosu na vrednost objekta na kraju obračunskog perioda (životnog veka objekta). Izraz (6.12) se obično koristi kada je u pitanju uzimanje i otplata kredita, pa se godišnje izdvajanje (anuitet) definiše u odnosu na početno ulaganje (sadašnju vrednost potrebne investicije).

Za troškove održavanja sistema može se preliminarno pretpostaviti da će biti uvek isti na godišnjem nivou i da se mogu definisati procentualno u odnosu na investicionu vrednost sistema. Kasnije se mogu sprovesti detaljnije analize, uzimajući u obzir cenu radne snage i usluga, materijala itd. Ovi troškovi se mogu i neravnomerno rasporediti u toku eksploatacionog veka sistema, tako što će se postepeno povećavati sa stepenom raubovanosti objekata i opreme.

Troškovi osiguranja se takođe preliminarno definišu procentulano u odnosu na investicionu vrednost sistema. U vrednovanju varijantnih rešenja se čak mogu izostaviti, jer nisu u ingerenciji projektanta, već države i javnih fondova.

■ **Primer 6.7.** U Tabeli 6.8 navedeni su direktni i indirektni troškovi izgradnje jednog sistema za odbranu od poplava. Ukupni direktni troškovi iznose: $\text{TDIR} = 7 \times 10^6$ €. Troškovi projektovanja iznose 2% TDIR , a nepredviđeni troškovi, 10% TDIR . Sračunati godišnje troškove projektovanog sistema, pretpostavljajući da su vrednosti anuiteta i amortizacije tokom obračunskog perioda nepromenljive. Ulazni podaci: (a) kreditni uslovi: period oplate $N = 50$ god i nominalna kamatna stopa $i = 3\%$; (b) amortizacija: funkcionalni vek objekata $N = 60$ god i godišnje izdvajanje $i = 2\%$.

Rešenje. Ukupne investicije iznose: $\text{TDIR} + \text{TIND} = 9340000$ €. Na osnovu izraza (6.11), gde je $F = \text{TDIR}$ sledi: $T_{am} = 61376$ €/god, a na osnovu izraza (6.12), gde je $P = \text{TDIR} + \text{TIND}$, $T_{an} = 363004$ €/god. Usvajajući da troškovi održavanja iznose 5% TDIR , dolazi se do vrednosti $T_{od} = 350000$ €/god.

Tabela 6.8: Troškovi izgradnje sistema za odbranu od poplava u primeru 6.7.

Direktni troškovi (€)		Indirektni troškovi (€)	
1. Izgradnja nasipa	3000000	1. Eksproprijacija zemljišta	1000000
2. Drenažni sistem	1000000	2. Troškovi projektovanja	140000
3. Ispusti	200000	3. Istražni radovi	500000
4. Regulacija rečnog korita	1500000	4. Nepredviđeni troškovi	700000
5. Pristupni putevi i mostovi	1300000		
Ukupno TDIR:	7000000	Ukupno TIND:	2340000

Ako se troškovi osiguranja izostave iz razmatranja, ukupnih godišnji troškovi iznose: $T_{god} = 774380 \text{ €/god}$.

* * *

Procena dobiti. Već je rečeno da se u slučaju sistema za zaštitu od poplava, dobit iskazuje odsustvom štete koja bi nastala da sistem nije izgrađen. Problem je što procena dobiti nije jednostavna i zahteva višedisciplinarni pristup. Naime, postoje jasno prepoznatljive materijalne dobiti, ali postoje i nematerijalne, posredne koristi. One prve se mogu novčano kvantifikovati, dok ove druge to ne mogu, jer se radi o apstraktnim kategorijama, kao što su na primer, socijalna sigurnost i dobrobit, očuvanje prirodnih i kulturnih vrednosti itd.

Materijalne dobiti mogu biti direktne i indirektno. Prve proizilaze iz tehničkog rešenja i odnose se na otklanjanje ili smanjenje šteta. Primer takve dobiti je korišćenje površina koje, zbog rizika od plavljenja, nisu ranije korišćene.

Primer indirektno koristi je smanjenje štete od prekida u saobraćaju u vreme poplava, iskazano kroz troškove zaobilaznog transporta van ugroženog područja.

Čak i određivanje direktne materijalne dobiti (kao odsustva štete), može biti komplikovano zbog složenih hidrološko-hidrauličkih uticaja. Tradicionalni pristup po kome se šteta iskazuje kada kota nivoa prevaziđe određenu kritičnu vrednost, važi uglavnom za urbana područja i industrijske zone. U slučaju zaštite poljoprivrednog zemljišta, situacija postaje složenija, jer plavljenje zavisi od niza dodatnih faktora:

- trajanja poplave i opstanka poljoprivrednih kultura pod vodom;
- brzine toka i njegovog kapaciteta za spiranja tla;
- sezonskih uslova (poplava u periodu setve, žetve);
- prethodne vlažnosti tla;
- koncentracije suspendovanog nanosa u izlivenoj vodi.

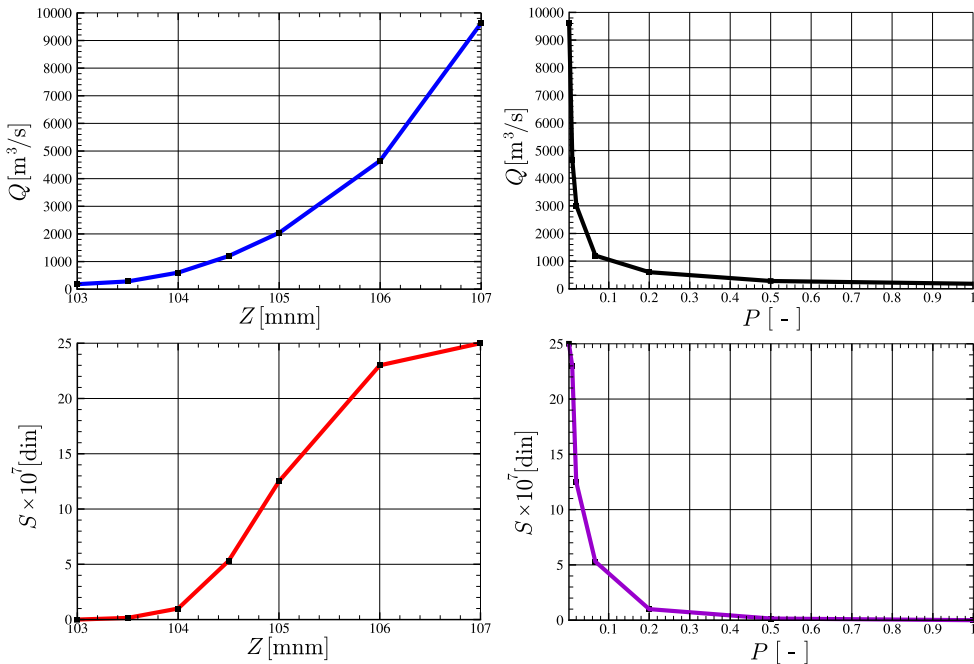
Za poljoprivredne površine su od značaja: A_{pl} – površina plavne zone, T_{pl} – efektivno trajanje plavljenja (koje obuhvata vreme nailaska, zadržavanja i povlačenja vode) i h_{pl} – dubina vode na poplavljenom području. Navedene veličine su u sprezi sa karakteristikama poplavnog talasa – kotom Z_* koja označava početak plavljenja i trajanjem (vremenskom bazom) talasa T_* . U opštem slučaju se može napisati [143]: $A_{pl} \propto (Z^*, T_*)$; $T_{pl} \propto (Z_*, T_*, A_{pl})$; $h_{pl} \propto (Z^*, T^*, T_{pl})$.

6.4.1.5 Optimalna visina nasipa

Kod *pasivne* zaštite od poplava, stepen zaštite je određen visinom nasipa. To je predmet klasične optimizacije na osnovu troškova.

Postupak optimizacije visine nasipa će se objasniti pomoću konkretnog primera.

■ **Primer 6.8.** U prve četiri kolone Tabele 6.9 i na Slici 6.18 date su hidrološke podloge za jednu rečnu deonicu na kojoj je predviđena izgradnja nasipa.



Slika 6.18: *Kombinovanje hidroloških i tehničko-ekonomskih podloga: na osnovu krive protoka $Q(Z)$, empirijske raspodele velikih voda $Q(P)$ i zavisnosti potencijalne štete od kote plavljenja $S(Z)$, dolazi se do krive verovatnoće štete $S(P)$.*

Zavisnost štete od kote nivoa data je u koloni (7) Tabele 6.9 i prikazana je na Slici 6.18. Odrediti ekonomski optimalnu kotu krunu nasipa.

Rešenje. Rezultati proračuna su dati u Tabeli 6.9.

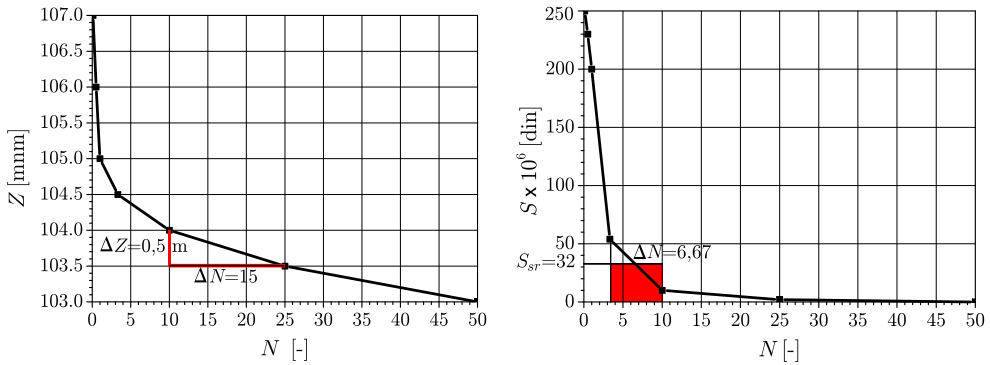
Na Slici 6.19 prikazana je interpretacija prosečne štete po intervalima kote nivoa. Sa dijagrama na Slici 6.20 koji prikazuju rezultate analize dobiti i troškova, može se konstatovati da optimalnoj koti kruna nasipa $Z = 105,00$ mm odgovara velika voda $Q = 2040$ m³/s čija je verovatnoća pojave $P = 0,02$, a povratni period $T = 50$ godina.

Tabela 6.9: Proračun ekonomski optimalne visine nasipa

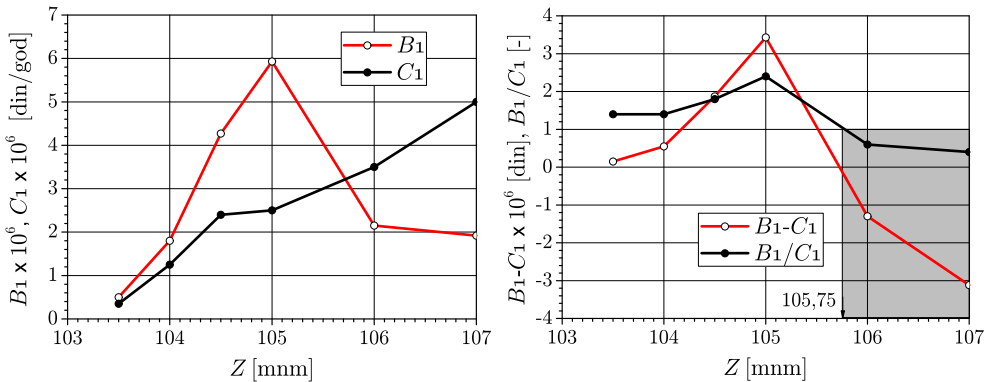
Z	Q	P	T	N	ΔN	S	S_{sr}	$S_{sr} \cdot \Delta N$	B_1	B	C	C_1	$B_1 - C_1$	$\frac{B_1}{C_1}$
[mm]	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$	[-]	[god]	[-]	[-]	[din]	[din]	[din]	$\left[\frac{\text{din}}{\text{god}}\right]$	$\left[\frac{\text{din}}{\text{god}}\right]$	$\left[\frac{\text{din}}{\text{god}}\right]$	$\left[\frac{\text{din}}{\text{god}}\right]$	$\left[\frac{\text{din}}{\text{god}}\right]$	[-]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
103,0	180	1,000	1	50,00		0			0	0				
103,5	280	0,500	2	25,00	25,00	2	1	25	0,50	0,50	0,35	0,35	0,15	1,4
104,0	600	0,200	5	10,00	15,00	10	6	90	1,80	2,30	1,60	1,25	0,55	1,4
104,5	1200	0,067	15	3,33	6,67	54	32	213	4,27	6,57	4,00	2,40	1,87	1,8
105,0	2040	0,020	50	1,00	2,33	200	127	296	5,93	12,50	6,50	2,50	3,43	2,4
106,0	4650	0,010	100	0,50	0,50	230	215	108	2,15	14,60	10,00	3,50	-1,35	0,6
107,0	9630	0,002	500	0,10	0,40	250	240	96	1,92	16,60	15,00	5,00	-3,08	0,4

Objašnjenje:

- (1)-(4) Hidrološke podloge: kriva protoka $Q(Z)$, $Q(P)$ ili $Q(T)$, gde je: Z – kota nivoa, Q – protok, P – verovatnoća pojave u bilo kojoj godini protoka Q (kote Z), T – povratni period (ocena prosečnog vremenskog intervala između pojave dva protoka date (i veće) vrednosti).
- (5) $N = T_0/T$ – očekivan prosečan broj puta da protok premaši datu vrednost u T_0 godina, gde je T_0 – računski period (može odgovarati veku trajanja nasipa) U ovom primeru je $T_0=50$ godina.
- (6) ΔN – očekivan prosečan broj puta u T_0 godina da se kota nivoa nađe između datih vrednosti: na primer, između $Z=103,5$ i $103,0$: $\Delta N=50-25=25$.
- (7) S – očekivana vrednost štete pri datoj koti nivoa Z (prethodno definisana funkcija na osnovu posebnih analiza).
- (8) S_{sr} – očekivan prosečan iznos štete svaki put kada se kota nivoa nađe između datih vrednosti: na primer, između $Z=103,5$ i $103,0$: $S_{sr}=(0+2) \times 10^6/2 = 1 \times 10^6$.
- (9) $S_{sr} \cdot \Delta N$ – očekivana prosečna šteta u periodu T_0 za kote nivoa između datih vrednosti (u intervalu ΔZ).
- (10) $B_1 = S_{sr} \cdot \Delta N/T_0$ – dobit od izgradnje nasipa na godišnjem nivou (dobit=odsustvo štete).
- (11) B – kumulativna funkcija godišnjih koristi B_1 .
- (12) C – godišnji troškovi nasipa (prethodno definisana funkcija na osnovu troškova izgradnje nasipa, koja obuhvata amortizaciju, održavanje, anuitete i osiguranje).
- (13) C_1 – inkrementalni godišnji troškovi nasipa (shodno povećanju kote krune nasipa, odnosno prema intervalima ΔZ).
- (14) $B_1 - C_1$ – kriterijum neto dobiti.
- (15) B_1/C_1 – kriterijum odnosa dobiti i troškova.



Slika 6.19: Dijagram levo prikazuje prosečan broj puta N da u računskom periodu T_0 kota nivoa premaši određenu vrednost; ΔN označava prosečan broj puta da se u periodu T_0 kota nivoa nađe u intervalu ΔZ . Dijagram desno prikazuje površinu koja predstavlja prosečnu štetu u periodu T_0 za kote nivoa u intervalu ΔZ .



Slika 6.20: Optimizacija kote krune nasipa; levo: krive dobiti $B_1(Z)$ i troškova $C_1(Z)$; funkcija dobiti (odsustva štete) raste do određene vrednosti, a zatim opada, smanjenjem verovatnoće pojave velikih voda (opadanjem broja N); funkcija troškova odražava nelinearni porast zapremine ugrađenog materijala sa visinom nasipa. Desno: funkcije $B_1 - C_1$ i B_1/C_1 imaju maksimum na koti 105,00 mmm, kojom je određen optimalan stepen zaštite branjenog područja; visine nasipa iznad kote 105,75 mmm po datim kriterijumima nemaju ekonomsko opravdanje.

* * *

Prikazani primer ukazuje na pravilo da se visina nasipa projektuje u zavisnosti od vrednosti dobara koja se štite! Ovo se u našoj praksi najčešće prenebregava, pa se poljoprivredno zemljište štiti nasipima od 100-godišnje velike vode, bez prethodne analize da li je to ekonomski opravdano. Međutim, zbog neizvesnosti u vezi sa klimatskim promenama, praksa rutinskog dimenzionisanja nasipa na 100-god. veliku vodu možda i nije sasvim bez osnova.

6.4.1.6 Prolom nasipa

Fenomen proloma nasipa je interesantan sa stanovišta rizika od poplava. Pri projektovanju novih sistema za odbranu od poplava ili planiranju rekonstrukcije postojećih sistema, sagledavanje mogućih hidrauličkih posledica proloma nasipa (Slika 6.21) je neophodno u cilju procene *zaostalog rizika* i troškova koji su potrebni za zaštitu potencijalno ugroženog područja.



Slika 6.21: Prolomi nasipa: Tamiš (2005), Tamnava, Trstenica (2014) [64].

U trećem poglavlju su navedeni uzroci oštećenja nasipa, koji, ukoliko se ne preduzmu odgovarajuće sanacione mere, mogu dovesti do rušenja nasipa. Rušenje, ili *prolom nasipa*, definisano je stanjem pri kome nasip više ne može da obezbedi neophodan stepen zaštite pri datom opterećenju, ili kada nasip postane konstruktivno nefunkcionalan.

Mnogi uzroci mogu da dovedu do ovog stanja: greška u projektovanju i/ili izvođenju, pogoršanje hidrološko-geotehničkih uslova (pojava velike vode veće od projektovane, sleganje podloge, izdizanje rečnog korita itd.), ljudski faktor (nedostatak održavanja, vandalizam, terorizam).

Prolom nasipa je rezultat njegovog progresivnog oštećenja. Uzrok može biti *spoljašnja erozija* površine nasipa usled preliivanja, dejstva talasa, delovanja ljudi, ili *unutrašnja erozija* usled filtracijom izazvanog odnošenja čestica tla unutar trupa nasipa, ili u temeljnoj podlozi. Do rušenja nasipa može doći i usled njegove *narušene stabilnosti* (pojave tzv. plitkih i dubokih rotacionih kliznih ravni, translacionog klizanja, sleganja i bubrenja povlatnog sloja itd.). Međutim, u preko 70 % slučajeva, do rušenje nasipa dolazi usled njegovog preliivanja [33].

Ciljevi razmatranja proloma nasipa su: (i) određivanje zapremine vode koja iz reke dospe u inundaciju, kao i dinamike plavljenja; (ii) izrada karata ugroženosti; (iii) projektovanje i uspostavljanje sistema rane najave za evakuaciju stanovništva i zaštitu imovine; (iv) izrada operativnih planova za lokalno upravljanje poplavama.

Problematika proloma nasipa je složena zbog brojnih neizvesnosti, prvenstveno onih vezanih za karakteristike tla. Prolom nasipa se manifestuje kroz formiranje *breše* u telu nasipa, čije se vertikalne i horizontalne dimenzije progresivno povećavaju u procesu evolucije breše. Dodatna neizvesnost je vezana za mesto i vreme proloma. Usled sleganja nasipa, projektovane kote njegove krune se vremenom snižavaju, pa se može očekivati da preliivanje i proboj nasipa nastane tamo gde je kota krune najniža. Od velike važnosti je i trenutak proboja; ako se ovaj

približno poklopi sa vremenom pojave vršnog protoka, branjeno područje će biti izloženo najvećem plavljenju.

Rušenje nasipa se decenijama izučava pomoću zabeleženih podataka o probojima iz prošlosti i rezultata laboratorijskih merenja (Slika 6.22). Razvijeni su razni (polu)empirijski računski modeli za predviđanje dinamike proloma nasipa.

Prepoznata su tri načina erozije trupa nasipa pri njegovom prelivanju [33]: (i) spiranje površinskog sloja i odnošenje materijala u vidu suspenzije (peščani nasipi sa malo gline); (ii) masivno odnošenje grumenja materijala (nasipi od mešovitog tla) i (iii) odvajanje i odnošenje čitavih blokova (nasipi od čvrstog glinovitog tla).



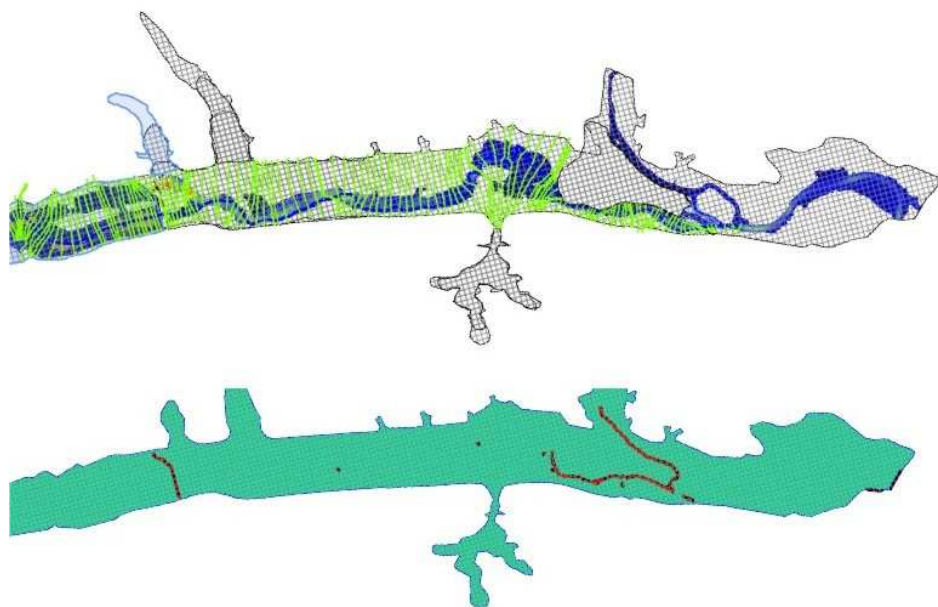
Slika 6.22: Eksperimenti proloma nasipa usled prelivanja; sleva udesno: peščani nasip [130]; nasipi od mešovitog i dominantno glinovitog tla [80].

Modeliranje proloma nasutog objekta (nasipa ili brane) može biti empirijski ili fizički zasnovano. Neki empirijski modeli koriste regresione zavisnosti između količine erodiranog materijala i oticaja kroz brešu u telu nasipa [130]. Drugi se zasnivaju na obradi podataka o probojima u prošlosti i empirijski definisanim funkcijama geometrijskih karakteristika breše (širine, visine, nagiba bokova) po vremenu [251], pri čemu se trenutni protok kroz brešu računa pomoću izraza za prelivanje preko širokog praga.

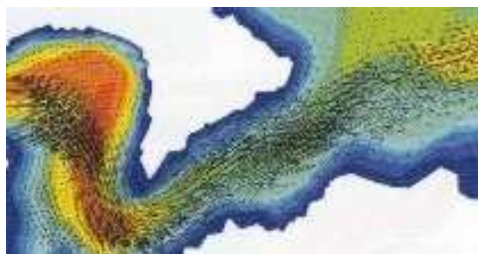
Najveći broj fizički zasnovanih modela erozije nasipa koristi izraz Majer-Peter i Milera (MPM) za pronos vučenog nanosa (KI-10.3.2-(10.19)), modifikovan shodno specifičnim karakteristikama nasutog materijala [80]. Međutim, ovaj pristup je teorijski problematičan, jer MPM izraz za transportni kapacitet rečnog nanosa (pronos u ravnotežnim uslovima) nije izveden za uslove koji vladaju pri prelivanju nasipa. Pregled fizički zasnovanih modela može se naći u literaturi [33].

Za predviđanje posledica rušenja nasipa i brana, u novije vreme se sve više koriste *integralni* računski modeli, koji objedinjuju neki empirijski model proloma i hidraulički model tečenja. Opcije za model tečenja su: linijski (1D) model, ravan-ski (2D) model i kombinacija 1D i 2D modela (Slike 6.23 i 6.24).

Od praktičnog značaja je pitanje kada koristiti 1D, a kada, 2D model tečenja? Numerički 1D modeli mogu dati sasvim dobre rezultate u regulaciji reka, sa mnogo manje uloženog truda, vremena i računarskog resursa od 2D modela. Primenjuju se kada postoji dominantni pravac strujanja, kao na primer kod vodotoka sa uskim inundacijama.



Slika 6.23: *Prolom nasipa*; gore: *profili 1D modela (rečno korito) objedinjeni sa računskom mrežom 2D modela (inundacije)*; dole: *plavno područje (softverski alat HEC-RAS)* [251].



Slika 6.24: *Prolom brane Malpasset u Francuskoj: vektorsko polje brzine na plavnom području (softverski alat Telemac2D)* [83].

Kod velikih reka, 1D modeli su nezamenljivi kada je potrebno analizirati režim velikih voda u periodu od više nedelja ili meseci, na deonicama dužine od više desetina kilometara. Profesionalni softverski paketi daju mogućnost modeliranja strujanja oko raznih objekata (mostova, bočnih preliva, brana, propusta, crpnih stanica i dr.), što (u tolikoj meri) nije slučaj kod 2D modela.

Ravanski (2D) modeli imaju prednost u proračunu plavljenja većih inundacionih površina, gde ne postoji jasno definisani pravac tečenja. U kombinaciji sa 1D modelom, 2D model daje mogućnost efikasnog proračuna hidrauličkih posledica rušenja brane ili nasipa. Višedimenzioni (2D i 3D) modeli su pogodni za analizu lokalnih složenih strujanja (oštre krivine, mostovski stubovi, vodozahvati),

ali zahtevaju veliki fond ulaznih podataka. Primena ovakvih (zahtevnih) modela nema smisla ako kvalitet ulaznih podataka nije na potrebnom nivou i ako ne postoji mogućnost kalibracije modela.

6.4.1.7 Preventivne i operativne mere odbrane kod pasivnih sistema

Ove mere mogu biti *preventivne*, *upravljačke* i *interventne*. Prve se mogu delimično svrstati u neinvesticione mere (koje se opisuju u nastavku), dok se preostale dve preduzimaju u toku poplava.

Preventivne mere se preduzimaju u sklopu pripreme za odbranu od poplava. Obuhvataju:

(1) Evidentiranje slabih mesta u liniji odbrane i materijalnih resursa neophodnih za ojačanje linije odbrane (građevinskog i drugog materijala, radne snage, mehanizacije, zaliha goriva, sredstava komunikacije i dr.). Tu spada i izvršenje radova na ojačanju postojeće linije odbrane.

(2) Planiranje aktivnosti u kriznim situacijama. Od posebnog značaja je uspostavljanje komandnog centra odbrane i komunikacionog sistema, kao i plana za evakuaciju stanovništva sa ugrožnog područja.

(2) Izradu planova odbrane na republičkom i opštinskom nivou. Ovim planovima se imenuju štabovi odbrane (republički, opštinski, lokalni). Planovi sadrže: opis branjenog područja, imenovanje rukovodilaca odbrane i zaduženih radnih organizacija, specifikaciju ovlašćenja i odgovornosti, kao i tehničke podatke, kao što su: merodavni vodostaji, mere odbrane, način obaveštavanja i uzbunjivanja, učesnici u odbrani, neophodna oprema i materijali itd. Planovi se periodično ažuriraju.

Operativne upravljačke mere su oraganizacionog karaktera. Obuhvataju:

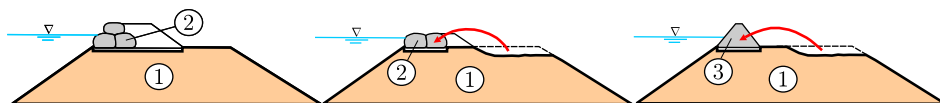
(1) Preliminarne aktivnosti, kao što su: aktiviranje planova odbrane, okupljanje ljudstva, dovoz opreme i materijalnih sredstava, hidrološki monitoring, upostavljanje komunikacionih linija, aktiviranje patrolne i inspeksijske službe, obavešavanje javnosti i dr.

(2) Aktivnosti u toku poplave, kao što su: izvršenje i koordinacija sanacionih radova na odbrambenom sistemu, aktiviranje plana za evakuaciju stanovništva u slučaju potrebe i dr.

(3) Aktivnosti po završetku plavnog događaja, kao što su: dokumentovanje preduzetih mera, arhiviranje podataka i ocena uspešnosti postojećeg plana odbrane.

Operativne interventne mere su hidrograđevinske prirode i preduzimaju se duž odbrambene linije u kriznim situacijama. Zavise od lokalnih uslova, stanja odbrambenog sistema, vrste oštećenja i veličine poplave. Prilagođene su konkretnim uslovima u pogledu metodološkog pristupa, obima radova i vrste korišćenog materijala.

(1) Spoljašnja erozija nasipa. Već je rečeno da spoljašnju eroziju nasipa mogu izazvati: prelivanje, velike brzine toka i talasi. Tehničke mere koje se mogu primeniti za sprečavanje prelivanja nasipa obuhvataju konvencionalne metode nadvišenja nasipa (Slike 6.25 i 6.26), uz primenu veštačkih materijala (Slika 6.27). U kriznim situacijama, za zaštitu nasipa od erozije kosina i procurivanja, mogu se koristiti kameni nabačaj, razne folije, limovi (Slika 6.28).



Slika 6.25: Nadvišenja nasipa (1); sleva na desno: izgradnja „zečjih nasipa” (2) na kruni glavnog nasipa; dopremanje vreća punjenih peskom ili materijalom sa lica mesta (2); nadvišenje formirano od lokalnog materijala (3) (prema [69]).



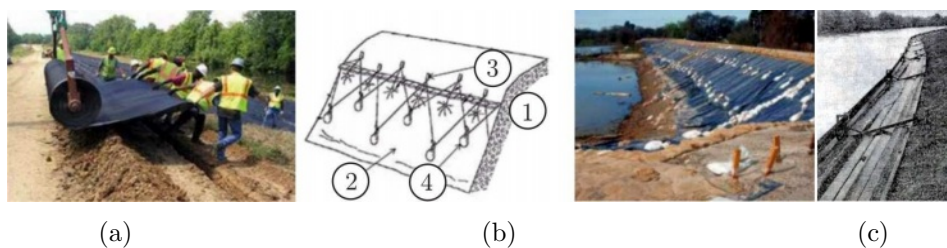
Slika 6.26: Konvencionalno nadvišenje nasipa; sleva na desno: pravilno i proizvoljno naslagane vreće od jute punjene peskom [305] i dodatni od glinovitog materijala [33].



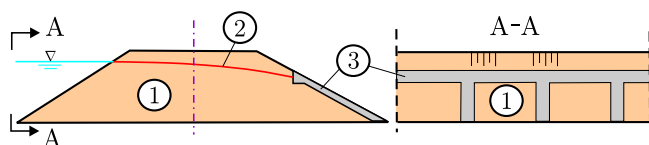
Slika 6.27: Nadvišenje nasipa pomoću veštačkih materijala; sleva na desno: zid o čeličnih talpi [304]; pobijanje talpi na Tisi (1970) [69]; barijera od vinil-poliestera ispunjena vodom daje nadvišenje od $0,3 \div 2,5$ m; barijera od spojenih plastičnih cevi dužine 15,2 m, prečnika 0,5 m, ispunjenih vodom ili betonom [33].

(2) Unutrašnja erozija nasipa. Mere za odbranu nasipa imaju za cilj: (i) smanjenje infiltracije (Slika 6.28), (ii) uspostavljanje improvizovane drenaže (Slika 6.29), (iii) povećanje filtracione dužine (Slika 6.30) i (iv) smanjenje hidrauličkog gradijenta (Slika 6.31).

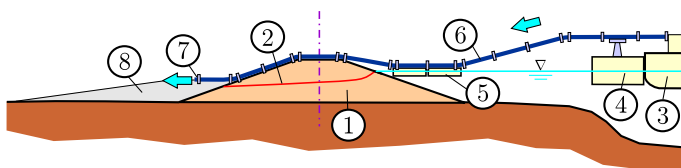
(3) Nestabilnost nasipa. Sprečavanje obrušavanja nasipa svodi se na smanjenje nagiba njegovih kosina, snižavanje nivoa podzemne vode i smanjenje uzgona [33]. Neke od ovih mera su već ranije opisane.



Slika 6.28: Interventne mere na zaštiti nasipa od spoljašnje erozije i procurivanja; (a) postavljanje folije po kosini ka vodi; (b) učvršćenje plastične folije: 1 – nasip; 2 – folija; 3 – kolje; 4 – vreće sa peskom [33]; (c) zaštitni limovi (Tisa, 1970) [69].



Slika 6.29: Kontrola procurivanja pomoću drenažnih kanala ispunjenih šljunkom, širine i dubine 15÷20 cm; 1 – nasip; 2 – filtraciona linija; 3 – drenažni kanali [69].



Slika 6.30: Kontrola procurivanja pomoću balasta od peščanog materijala na branjevoj strani nasipa; 1 – nasip; 2 – filtraciona linija; 3 – bager refuler; 4 – pontonski pristan; 5 – plovci; 6 – cevovod; 7 – rasprskivač; 8 – balast (prema [69]).



Slika 6.31: Kontrola procurivanja pomoću bunara na branjevoj strani nasipa [33].

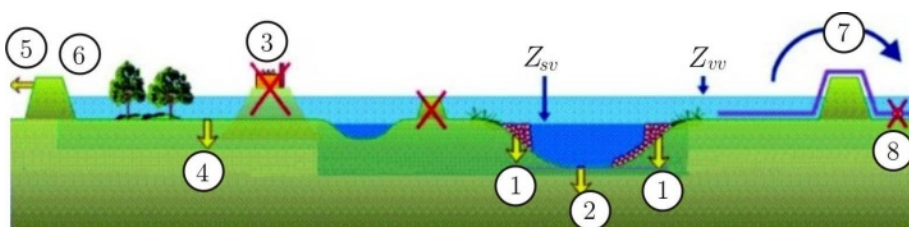


Slika 6.32: Sleva na desno: zatvaranje breše glinovitim materijalom; zaustavljanje širenja breše „džambo” vrećama sa kamenom ispunom [33]; fiksiranje breše folijom i cevastim balastom od poliesterskog materijala presvučenog plastikom [17].

(4) Proboj nasipa. Razne su mogućnosti interventnih radova na saniranju prekinute linije odbrane. Primeri zatvaranje breše u telu nasipa prikazani su na Slici 6.32.

6.4.1.8 Rekonstrukcija pasivnih sistema zaštite

U svetu je veoma aktuelno preispitivanje postojećih sistema pasivne zaštite u svetlu hidroloških neizvenosti usled klimatskih promena. Nova paradigma „obezbediti prostor za vodu” (engl. „give water space”) obuhvata niz investicionih, konstruktivnih mera u cilju što efikasnije evakuacije velikih voda (Slika 6.33). Kako su u pitanju ogromna ulaganja, opravdanost ovakvih mera je pre svega pitanje ekonomskog potencijala svake zemlje.



Slika 6.33: Revizija investicionih mera pasivne zaštite: 1 – sniženje napera; 2 – produbljenje rečnog korita; 3 – uklanjanje hidrauličkih prepreka; 4 – sniženje inundacija; 5 – lokalno pomeranje nasipa; 6 – pomeranje cele odbrambene linije; 7 – pumpanje u retencione prostore; 8 – smanjenje bočnog dotoka [306].

6.4.2 Aktivna zaštita od poplava

Za razliku od pasivne zaštite, aktivna (ili „proaktivna”) zaštita ima za cilj ublaženje poplavnog talasa smanjenjem njegovog vrha i produženjem njegove vremenske osnove. To se postiže pomoću čeonih akumulacija (akumulacija u gornjem delu sliva), retenzija i rasteretnih kanala.

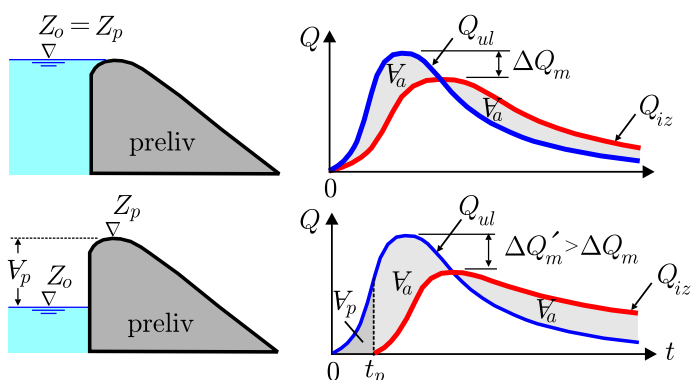
6.4.2.1 Čeone akumulacije

Kao što je poznato, akumulacije mogu biti isključivo namenjene prihvatanju poplavnih talasa, ili višenamenske, kod kojih samo deo zapremine ima ovu namenu.

Akumulacije prihvataju poplavne talase u celini ili delimično. One omogućavaju transformaciju, ili ublaženje poplavnih talasa, pri čemu stepen ublaženja zavisi od raspoložive zapremine, vrste i kapaciteta evakuacionih objekata – preliva i ispusta. Kod višenamenskih akumulacija, upravljanje režimom velikih voda nizvodno od brane zavisi i od operativnog plana eksploatacije, koji, pored preliva i ispusta, uzima u obzir i evakuaciju velikih voda kroz turubine i prevodnice (ako postoje).

Transformacija poplavnih talasa u akumulacijama može se efikasno numerički simulirati kao što je pokazano u prvoj knjizi (KI-5.5.4). Shematski prikaz transformacije poplavnog talasa u akumulaciji sa slobodnim prelivom (bez ustava) dat

je na Slici 6.34. Početni uslov predstavlja kota nivoa u akumulaciji $Z_o(t = 0)$, koja može biti jednaka koti normalnog uspora ili niža od nje.



Slika 6.34: Ublaženje poplavnog talasa u akumulaciji sa slobodnim prelivom: $Q_{ul}(t)$ – ulazni hidrogram, $Q_{iz}(t)$ – izlazni hidrogram, ΔQ_m – smanjenje vršnog protoka, koje zavisi od početne kote nivoa Z_o u odnosu na kotu krune preлива Z_p ; gore: talas nailazi na punu akumulaciju ($Z_o = Z_p$), zadržana zapremina je V_a ; dole: talas nailazi na delimično ispražnjenu akumulaciju ($Z_o < Z_p$), prelivanje počinje u trenutku t_p kada se popuni zapremina V_p , a nivo dostigne kotu krune preлива Z_p ; ukupno zadržana zapremina je $V_p + V_a$, a smanjenje vršnog protoka: $\Delta Q'_m > \Delta Q_m$.

Transformacija talasa u slučaju preлива sa ustavama (Slika 6.35) zavisi od vrste i veličine ustava, kao i njihovog upravljanja. Na Slici 6.36 shematski je prikazano upravljanje transformacijom talasa u akumulaciji pomoću ustave na prelivu.

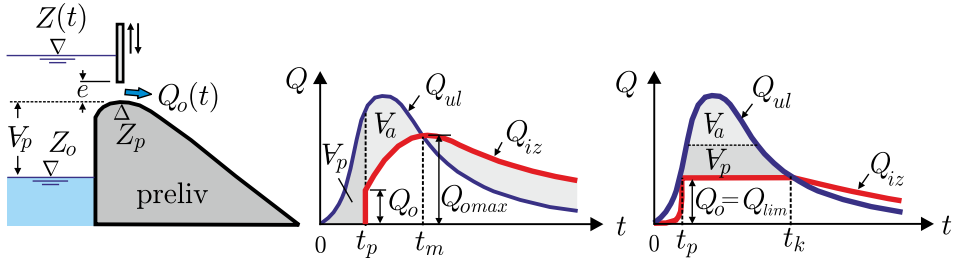


Slika 6.35: Tablasta ustava (HE Đerdap I) i segmentna ustava (HE Đerdap II).

6.4.2.2 Retenzije

Radi se o inundacionim površinama ograničenim nasipima (ili visokim terenom), koje se u periodu velikih voda kontrolisano plave upuštanjem vode iz reke, od trenutka kada vodostaj u reci premaši određenu kritičnu kotu. Na taj način se protoci i nivoi značajno smanjuju na nizvodnom području.

Najveći efekti retenzija se postižu kada se one nalaze u gornjem delu sliva. To su tzv. „čione retenzije”.



Slika 6.36: Ublaženje poplavnog talasa u akumulaciji sa ustavom na prelivu, u slučaju pretpražnjene zapremine V_p ; levo: podizanjem ustave u trenutku t_p do visine isticajnog otvora $e = \text{const}$, uspostavlja se promenljiv izlazni protok $Q_o(t) = Q_{iz}$, čija se maksimalna vrednost $Q_{o\max}$ javlja u trenutku t_m kada je isticanje jednako dotoku; desno: ako zaštita od poplava na nizvodnom području zahteva ograničenje izlaznog protoka na $Q_{lim} < Q_{o\max}$, manevrom ustave i podešavanjem visine isticajnog otvora $e(t)$ može se postići da u periodu $t_k - t_p$ izlazni protok bude približno konstantan $Q_o = Q_{lim}$.

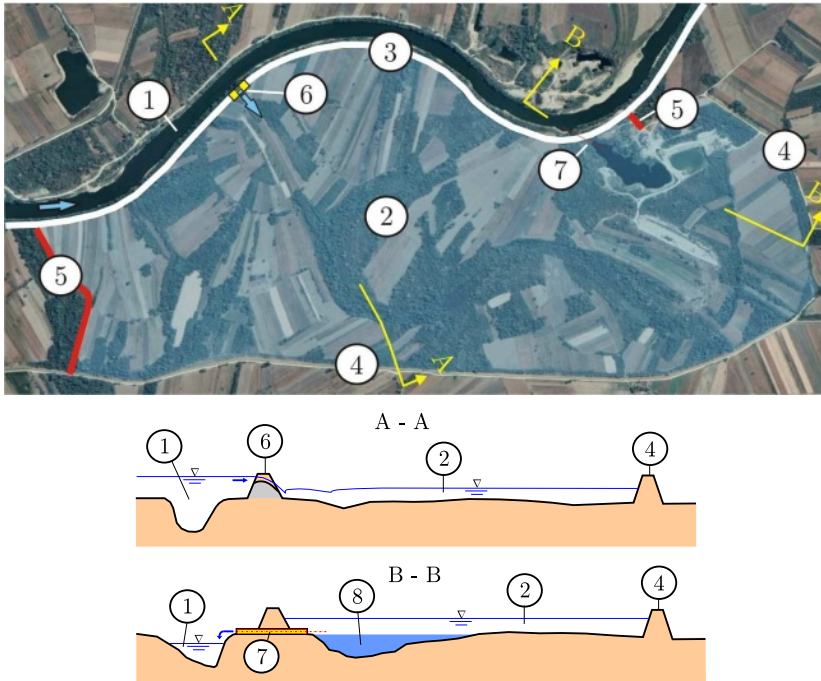
Bočne retenzije se grade duž vodotoka tamo gde postoje uslovi za prihvatanje značajnog dela zapremine projektnog poplavnog talasa. Efekte retenzija je potrebno utvrditi u fazi projektovanja, jer retenzije omogućavaju da novi nasipi budu niži, ili da se poveća stepen zaštite postojećih nasipa.

Upuštanje vode iz reke u retenziju obavlja se preko bočnog preliva – upusta, a pražnjenje retenzije, pomoću ispusta, obično lociranog na nizvodnom kraju retenzije (Slika 6.37). Velike retenzije mogu imati, shodno lokalnim uslovima, više tačaka upuštanja i ispuštanja vode.

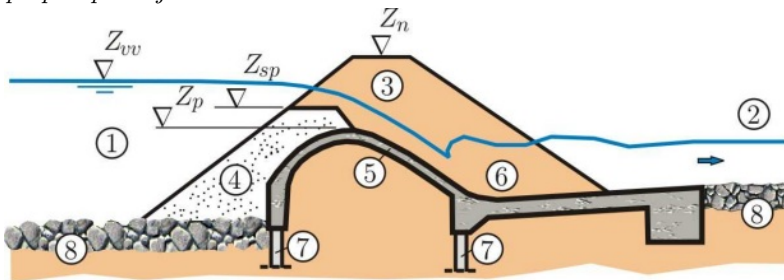
Izbor položaja retenzije je predmet tehničko-ekonomske analize. Dva osnovna uslova su: (i) dovoljna retenziiona zapremina i (ii) prihvatljivi troškovi izgradnje pomoćnih nasipa koji „zatvaraju” retenzioni prostor (Slika 6.37), kao i objekata za upuštanje vode (bočnih preliva) i za ispuštanje vode (cevastih ispusta, crpnih stanica). Izgradnja pomoćnih nasipa je karakteristična za veštački formirane retenzije, dok su prirodne retenzije ograničene postojećim nasipom i visokim terenom. Veće veštačke retenzije iziskuju niže pomoćne nasipe i obrnuto.

Pri projektovanju retenzija vodi se računa da na retenzionom području nema stambenih i vrednih infrastrukturnih objekata (puteva, cevovoda, elektro instalacija, kulturno-istorijskih spomenika itd.). Biraju se po pravilu zemljišta nižeg boniteta, ili poljoprivredne parcele sa kulturama koje su otporne na kratkotrajno plavljenje u toku godine.

Punjenje retenzija se obično obavlja pomoću bočnih preliva. To su najčešće slobodni prelivi bez ustava, izgrađeni u telu nasipa na uzvodnom ili središnjem delu retenzije. Jedan tip slobodnog preliva koji se često primenjuje sastoji se od fiksnog betonskog dela na kome je postavljen „sigurnosni” nasip od erodibilnog tla, sa kotom krune koja je niža od kote krune glavnog nasipa (Slika 6.38).



Slika 6.37: Primer retenzijske za smanjenje velikih voda na nizvodnom području; 1 – reka; 2 – retenzijska; 3 – postojeći nasip; 4 – put; 5 – nasip izgrađen za zatvaranje retenzionog prostora (kasete); 6 – bočni preliv za upuštanje vode iz reke u retenzijsku; 7 – cevasti ispušt za gravitaciono pražnjenje retenzijske; 8 – deo retenzijske koji se prazni prepumpavanjem vode u reku.

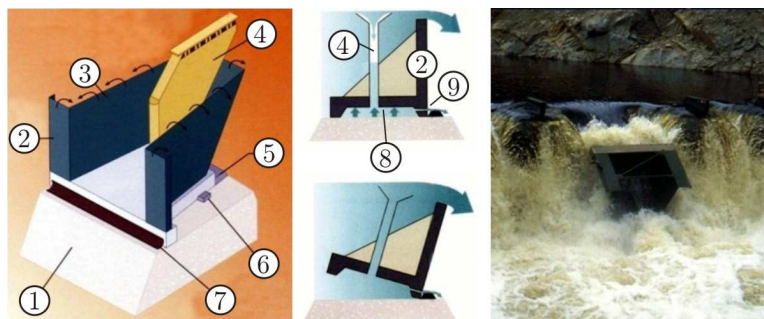


Slika 6.38: Primer preliva u nasipu retenzijske; 1 – rečni tok; 2 – retenzijska; 3 – glavni nasip dimenzionisan na veliku vodu (Z_{vv}); 4 – sigurnosni (pomoćni) nasip od pokretnog tla, niži od glavnog nasipa ($Z_{sp} < Z_n$); 5 – betonski preliv sa kotom krune Z_p ; 6 – bučnica; 7 – antifiltracione zavese; 8 – kameno osiguranje dna (prema [174]).

Kada nivo u reci prevaziđe kotu krune sigurnosnog nasipa nastaje njegovo prelivanje i brzo odnošenje tla od koga je izgrađen, što inicira punjenje retenzijske preko betonskog dela preliva. Sigurnosni nasip se obnavlja u periodu između dve poplave.

Treba naglasiti da je dužina bočnih preliva *hidraulička kategorija*! To znači da za usvojenu kotu krune preliva, projektnom vršnom protoku poplavnog talasa odgovara samo jedna – optimalna dužina bočnog preliva, koja obezbeđuje najveći stepen amortizacije tog talasa. Isuviše kratak preliv sa malim bočnim dotokom ima za posledicu da se retenzija dovoljno ne napunu u toku prolaska poplavnog talasa, a isuviše dugačak preliv izaziva prebrzo punjenje retenzije, što ne daje vremena za dovoljno ublaženje i usporenje talasa.

Pored betonskih preliva, postoje i druga konstruktivna rešenja (Slika 6.39).



Slika 6.39: Sigurnosni preliv tipa Hydroplus[®]; 1 – prag; 2 – metalno korito; 3 – čunkasti preliv; 4 – prijemno okno (levak); 5 – nizvodna podloška; 6 – klin za nivelisanje; 7 – uzvodna zaptivka; 8 – prostor za formiranje uzgona; 9 – ventil; prevrnuti kutijasti elementi se posle prolaska poplave moraju vratiti u prvobitni položaj [300].

Retenzije se prazne gravitaciono, kroz cevasti ispust na nizvodnom kraju retenzije (Slika 6.37). Voda zadržana u depresijama retenzionog prostora, ispod kote cevastog ispusta, vraća se u reku prepumpavanjem kroz nasip ili preko njega.

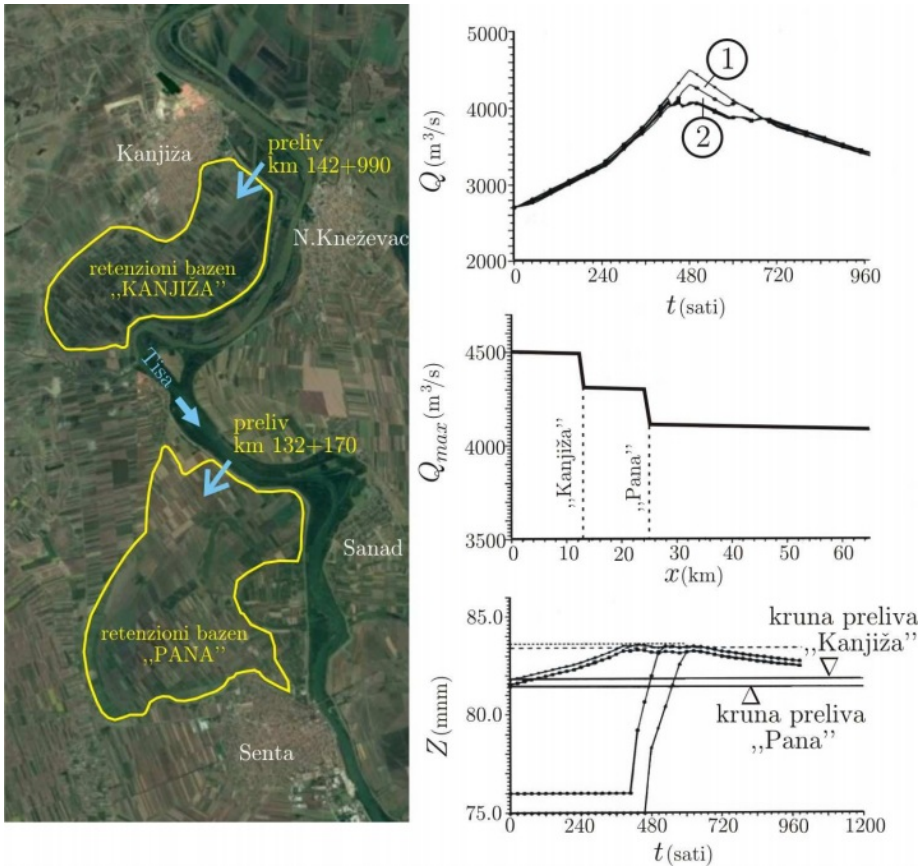
Retenzioni efekti se mogu efikasno računski proveriti, na isti način kao kod akumulacija. Jedan primer iz prakse sa proračunom linijskog neustaljenog tečenja prikazan je na Slici 6.40.

Za grubu prognozu maksimalnog sniženja vršnog protoka pomoću retenzije (ΔQ_m) može se primeniti relacija iz ruske literature [60]:

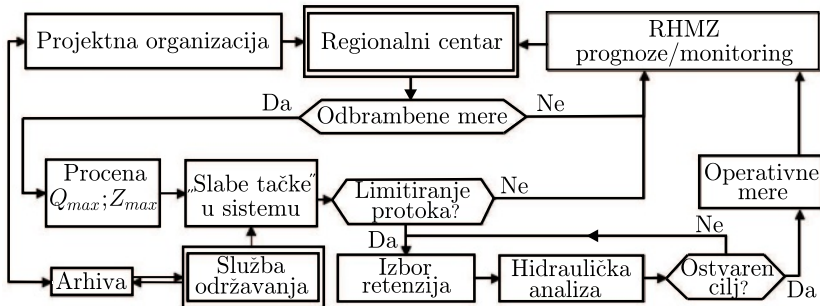
$$\frac{\Delta Q_m}{Q_{\max}} = \frac{\forall_r}{\forall_{ul}}, \quad (6.13)$$

gde je: \forall_r – zapremina retenzije, a \forall_{ul} , Q_{\max} – zapremina i vršni protok poplavnog talasa.

Operativno upravljanje retenzionim prostorima zahteva organizovani pristup, sa mnoštvom učesnika u obavljanju profesionalnih zadataka (projektanti, Republički hidrometeorološki zavod RHMZ, lokalne službe itd.). Blok shema aktivnosti i učesnika prikazana na Slici 6.41.



Slika 6.40: Potencijalni retenzioni bazeni duž reke Tise (levo) i rezultati proračuna transformacije talasa 100-god. velike vode (desno); odozgo na dole: hidrogrami, 1- zapremina zadržana u retenziji „Kanjiža”; 2- zapremina zadržana u retenziji „Pana”; raspored vršnog protoka; nivogrami punjenja retenzionih bazena [129].



Slika 6.41: Blok shema korišćenja retenzija u odbrani od poplava.

6.4.2.3 Rasteretni kanali

Veštački, obloženi ili neobloženi kanali mogu da služe za odvođenje voda oko visoko vrednih područja, najčešće naselja, štiteći ih od plavljenja (Slika 6.42).



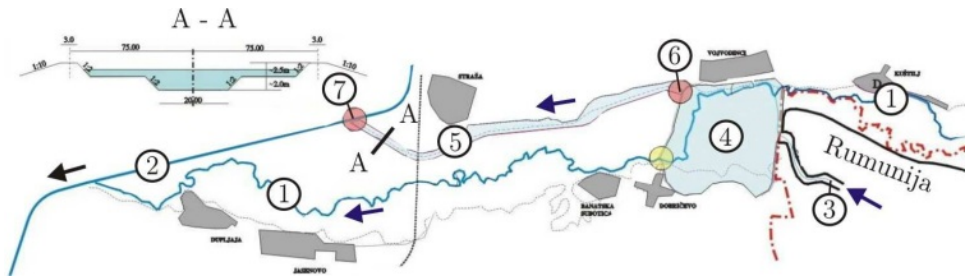
Slika 6.42: Primer rasteretnog kanala; 1 – reka; 2 – rasteretni kanal; 3 – ulazna građevina; 4 – izlazna građevina; 5 – naselje koje se štiti od plavljenja.

Suština je u podeli protoka velikih voda tako da protok u reci (između ulaza u rasteretni kanal i izlaza iz njega) bude unutar glavnog korita reke, čime se sprečava izlivanje u inundacije. Shodno tome, određuje se potrebna propusna moć rasteretnog kanala, kao njegove projektne karakteristike (trasa, uzdužni nagib dna, poprečni presek).

Rasteretni kanal može biti obložen ili neobložen. U duhu naturalnog uređenja, preporučuje se neobložen, zatravljen kanal blagih nagiba, koji se u periodima kada nije u funkciji, može koristiti kao pašnjak. Proračun propusne moći zatravljenih kanala može se naći u prvoj knjizi (KI-3.3).

Ulaz i izlaz rasteretnog kanala moraju biti visinski fiksirani i zaštićeni od erozije. Na ulaznoj građevini se mogu postaviti ustave za kontrolu protoka. Veliki rasteretni kanali mogu biti opremljeni daljinskim sistemom za upravljanje protokom u kanalu. Mali kanali mogu biti bez ustava, sa ulazom visinski postavljenim tako da voda počne slobodno da ulazi u kanal kada kota nivoa u reci premaši kotu dna kanala na ulazu.

Po svom položaju, rasteretni kanali mogu biti *paralelni* u odnosu na vodotok, ili *poprečni*, kada prebacuju deo velikih voda u drugi vodotok. *Obodni kanali* se mogu shvatiti kao posebna vrsta rasteretnih kanala. Trasiraju se po obodu visokog terena, sa koga u vreme velikih padavina prihvataju površinske vode i odvođe ih u reku. Na Slici 6.43 prikazan je primer rasteretnog kanala iz naše prakse.



Slika 6.43: Projektno rešenje zaštite od 100-god. velike vode priobalja reke Karaš, usmereno ka očuvanju ovog vodotoka u prirodnom stanju; 1 – reka Karaš; 2 – magistralni kanal sistema „Dunav-Tisa-Dunav“ (DTD); 3 – reka Vičinik, pritoka reke Karaš; 4 – retenzija za prihvatanje velikih voda; 5 – rasteretni kanal; 6 – ulazna građevina rasteretnog kanala na spoju sa retenzijom; 7 – izlazna građevina rasteretnog kanala na spoju sa kanalom DTD [12].

6.4.3 Zaštita od poplava urbanih područja

Kao kod ruralnih, u urbanim područjima je zaštita od poplava suočena sa brojnim neizvesnostima. Često nedostaju homogeni nizovi mernih nivoa i protoka za hidrološku analizu. Čak i tamo gde postoje podaci o kišama, prognoza oticaja je otežana, jer dve identične kiše ne daju nužno isti oticaj, koji zavisi od trenutnog stanja na urbanom slivu. To znači da se prognoza kretanja velikih voda mora zasnivati na kombinaciji hidroloških i hidrauličkih proračuna, pri čemu su ovi drugi jako komplikovani (istovremeno tečenje po površini i kroz kanalizacioni sistem, mnoštva objekata itd.).

Urbanizacija² drastično menja hidrološki ciklus; infiltracija (upijanje vode u tlu) i intercepcija (zadržavanje na vegetaciji) se smanjuju, a površinski oticaj (praćen zagađenjem vode) se povećava. Ukupno povećanje količine voda (atmosferskih i otpadnih) može da premaši kapacitet postojećeg kanalizacionog sistema. S druge strane, retenzioni kapacitet priobalja (inundacija) se zbog urbanizacije smanjuje, a raste zagađenje rečnih recipijenata. Takođe raste i brzina prostiranja velikih voda do recipijenta, jer se voda kreće kroz betonske cevi i kolektore.

Ranije je već ukazano na to da na režim poplava sve veći uticaj imaju klimatske promene, kao posledica prirodnih procesa koji se odvijaju u hiljadugodišnjoj vremenskoj razmeri, kao i ljudskih aktivnosti (sagorevanje fosilnih goriva, seča šuma itd.). Izvesna je veća učestalost i intenzitet plavnih događaja, što znači da sadašnji objekti za zaštitu od poplava u budućnosti neće pružati prvobitno projektovani stepen zaštite.

Imajući ove činjenice u vidu, potpuna zaštita od poplava u urbanim područjima nije moguća, već se svodi prvenstveno na sprečavanje gubitaka ljudskih života, dok je zaštita meterijalnih dobara racionalna samo u određenoj meri.

²Do 2020. godine, u urbanim sredinama je već živelo oko 80 % evropskog stanovništva [260].

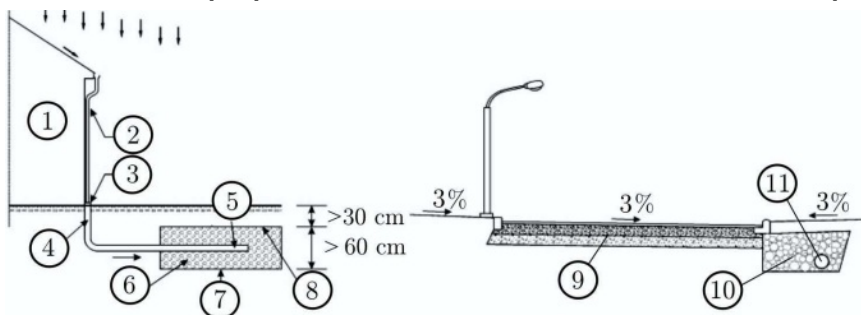
U svetu je prisutan koncept „*održivih urbanih drenažnih sistema*” (eng. *SuDS-Sustainable Drainage Systems*) [179, 309], koji treba da: (i) zadovolje ekonomske, ekološke i socijalne aspekte projektovanja sistema za odvodnjavanje urbanih područja, minimizirajući suprotstavljane zahteve i interese; (ii) stvore uslove odvodnjavanja što sličnije prirodnim uslovima – da se atmosferske vode prečišćavaju filtracijom kroz tlo i *polako* otiču ka recipijentu; (iii) obezbede što jednostavnije, energetske efikasne sisteme upravljanja poplavama, estetski uklopljene u ambijent.

Realizacija navedenih ciljeva se može postići na razne načine. Samo neka od brojnih tehničkih rešenja se prikazuju u nastavku.

Prolongiranje oticaja. Jedan od načina za smanjenje i prolongiranje površinskog oticaja u gradovima je korišćenje tzv. „zelenih krovova” (Slika 6.44). Deo padavina se kroz proces evapotranspiracije vraća u atmosferu, čime se smanjuje količina vode u kanalizacionom sistemu. Pored toga, vegetacija poboljšava mikroklimatske uslove u zgradama, smanjuju buku i emisiju CO₂ i unapređuje estetski kvalitet ambijenta. Neki drugi primeri tehničkih rešenja za efikasno urbano odvodnjavanje prikazani su na Slici 6.45.



Slika 6.44: „Zeleni krovovi”; *seva na desno*: ACROS hol, Fukuoka [310]; zgrada ASLA u Vašingtonu [311]; kalifornijska akademija nauka u San Francisku [312].

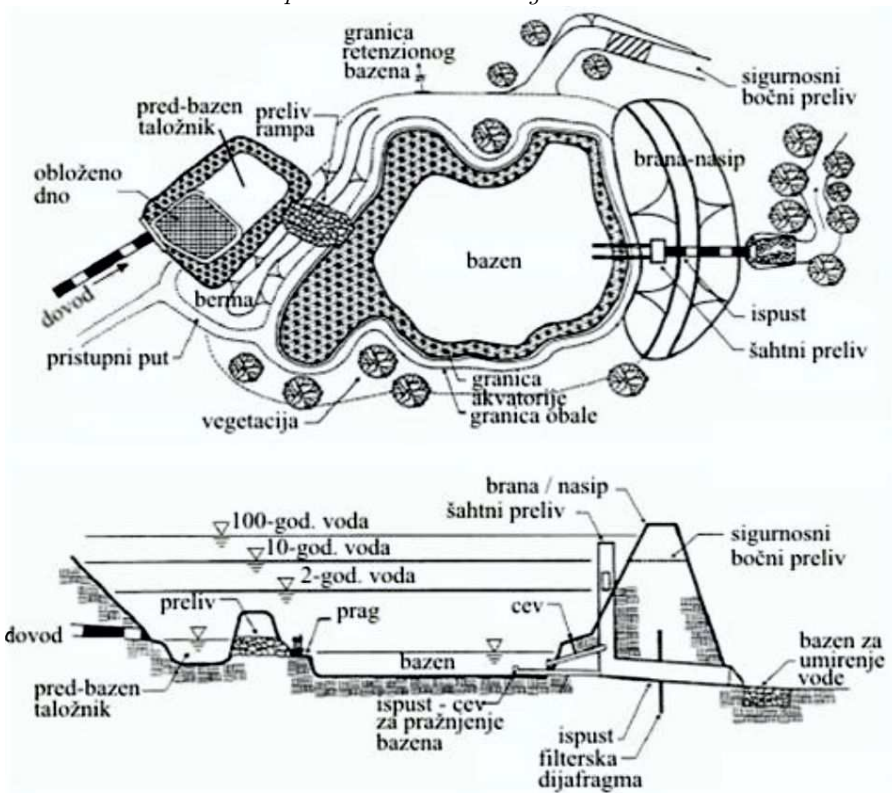


Slika 6.45: Primeri mera za prolongiranje oticaja; *levo*: pre upuštanja u kanalizacioni sistem, kišne vode se zadržavaju i prečišćavaju u podzemlju; 1 – zgrada; 2 – oluk; 3 – mrežasti filter; 4 – odvodna plastična cev; 5 – perforirana cev; 6 – infiltracioni rov ispunjen šljunkom ili drobljenim kamenom; 7 – dno rova; 8 – geotekstil; *desno*: zadržavanje površinskog oticaja: 9 – porozni kolovoz; 10 – infiltracioni rov; 11 – drenažna cev [208].

Gradske retenzije. Reč je o zatravljenim prostorima koji se samo po potrebi pune vodom, ili imaju karakter trajnih malih akumulacija (Slike 6.46 i 6.47). Njihova zapremina zavisi od projektnog poplavnog talasa (najčešće povratnog perioda $2 \div 10$ god.), a površina, od lokalnih uslova (najčešće do desetak ha). Zapremina gradskih retenzija mora biti dovoljna ne samo za ublaženje poplavnih talasa, već i za efikasno zadržavanje nanosa. Naročito je bitno zadržavanje prašinstog i glinovitog taloga (koji čini oko 80% suspendovanog nanosa), preko koga se unose zagađivači. Projektovanje gradskih retenzija je specifično po nizu hidrauličkih i psamološko-ekoloških aspekata [119].

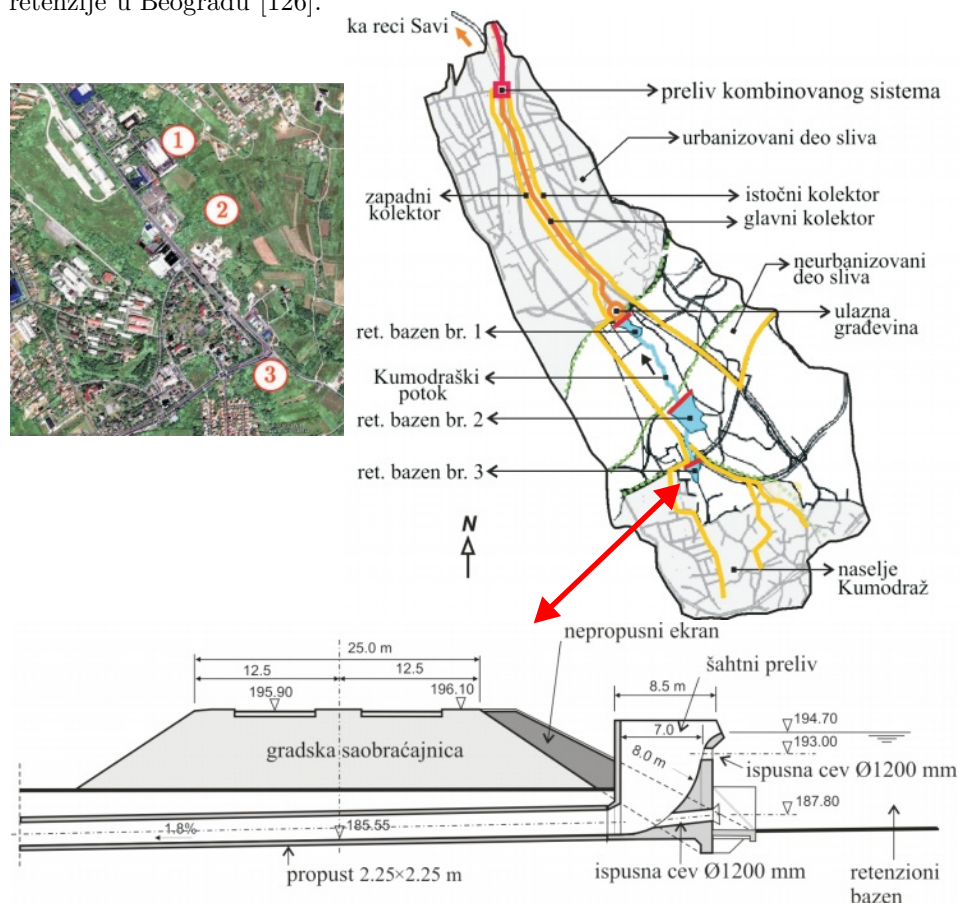


Slika 6.46: Primeri povremenih i stalnih gradskih retenzionih bazena.



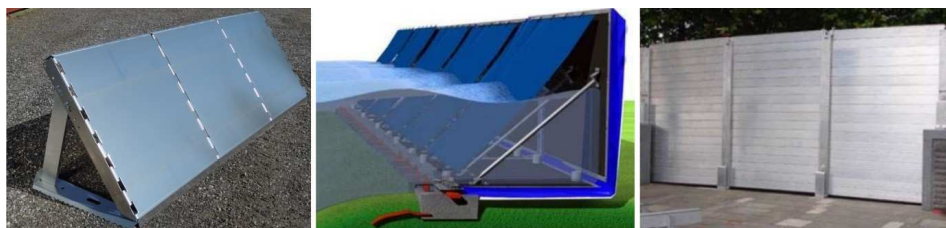
Slika 6.47: Shematski prikaz tipičnog gradskog retenzionog bazena [119].

Na Slici 6.48 je prikazano projektno rešenje kaskadnog sistema od tri gradske retenzije u Beogradu [126].



Slika 6.48: Projektovani retenzioni bazeni ukupne zapremine 180000 m^3 za zadržavanje velikih voda Kumodraškog potoka u Beogradu; sistem bi prihvatao velike vode povratnih perioda do 10 godina, što bi omogućilo nesmetano funkcionisanje postojećeg glavnog kolektora kapaciteta do $3 \text{ m}^3/\text{s}$, nizvodno od sistema; u bazenima bi se zadržalo 92% krupnog nanosa, i 56% glinovitih frakcija.

Mobilna zaštita. Ako u gradu ne postoji nasip, ili se iz nekog razloga on ne može nadvisiti, postoji mogućnost korišćenja mobilne opreme (Slika 6.49). Konstruktivna rešenja obuhvataju lake aluminijumske panele potrebne visine koji se ređaju duž odbrambene linije (tipične dužine oko 2 m, visine $0,75 \div 1,2 \text{ m}$), kombinaciju ramova i folija, kao i aluminijumskih stubova između kojih se ređaju metalne talpe do potrebne kote odbrane. Neki tipovi ove opreme se postavljaju direktno na postojeću podlogu, dok drugi zahtevaju pripremljen niski nivelisani zid na kome se ugrađuju nosači za postavljanje mobilnih elemenata [56].



Slika 6.49: Razni tipovi mobilnih konstrukcija za zaštitu od poplava [56, 307, 308].

Mere lokalne zaštite. Paradigma „živeti sa poplavama” podrazumeva i primenu raznih mera zaštite od poplava na nivou stambenih objekata (Slika 6.50). Ove mere su detaljno razrađene u specijalizovanoj literaturi (npr. [119, 249, 262]) pod opštim nazivima „mere otpornosti” ili „oporavka” (engl. „*resilience*”) i „mere naknadnog opremanja” (engl. „*retrofitting*”).



Slika 6.50: Primeri lokalne zaštite od poplava; sleva na desno: izdizanje objekta [313], elastične i metalne barijere [249, 314], zaštita podrumskih prostorija [249].

6.4.4 Odbrana od ledenih poplava

Kao i kod poplava koje nisu izazvane ledenim barijerama, mere za odbranu od ledenih poplava mogu biti *investicione* (konstruktivne) i *neinvesticione* (nekonstruktivne). Neke se preventivne, a neke se primenjuju u kriznim periodima, nakon formiranja ledenih barijera ili u toku ledenih poplava.

6.4.4.1 Preventivne mere odbarane od leda

Reč je o merama koje su usmerene ka: (i) izučavanju režima leda na predmetnom vodotoku; (ii) određivanju kritičnih poteza sa stanovišta kontinualnog pronosa leda i (iii) na izvođenju regulacionih radova za obezbeđenje ravnomerne propusne moći za led duž vodotoka.

Analiza režima leda. Režim leda na našim velikim vodotocima karakterišu tri perioda: (i) period pojave priobalnog leda i tzv. „jesenjeg ledohoda”; (ii) period zimskog *ledostaja* (sa ledenim barijerama koje mogu izazvati ledene poplave) i (iii) period topljenja leda sa tzv. „prolećnim ledohodom”. Podaci o režimu leda, koji se svakodnevno prikupljaju u profilima hidroloških stanica, obuhvataju datume pojave i prestanka ledohoda i ledostaja. Statističkom obradom ovih podataka, definišu se srednji, najraniji i najkasniji datumi pojave i trajanja ledohoda i ledostaja, njihova učestalost i zastupljenost, odnosno empirijska verovatnoća pojave

u zimskim periodima. Pored navedenih podataka, u periodima pojave leda prikupljaju se i podaci o ledenom pokrivaču (debljina, raspored, mesta nagomilavanja).

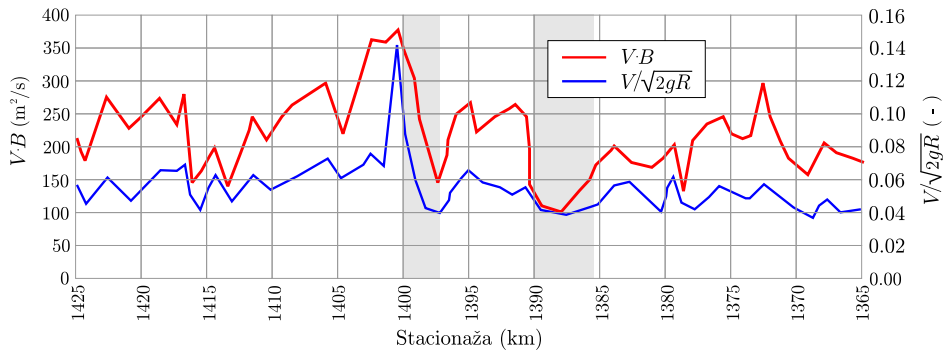
Hidraulički proračuni vezani za uticaje leda. Osnovni cilj ovih proračuna je određivanje pri kojim uslovima može doći do ledenih poplava na pojedinim deonicama vodotoka. Proračuni obuhvataju slučaj ledohoda (nevezani led) i slučaj ledene barijere. Izbor računskih protoka je zasnovan na statističkoj analizi protoka u uslovima pojave leda, a nizvodni granični uslov, na odgovarajućim kotama nivoa. U optičaju su na primer: najučestaliji protoci pri prvoj pojavi leda i pri jesenjem ledohodu, najučestaliji maksimalni protok u zimskom periodu, a na plovnim rekama, protok niskog plovnog nivoa, ako je brzina toka dovoljno mala za formiranje ledene kore.

Teorijske postavke modela linijskog tečenja sa ledom mogu se naći u dokumentaciji programskog paketa HEC-RAS [251]. U korišćenju ovog modela prisutne su brojne neizvesnosti elemenata koji služe za procenu hidrauličkih otpora tečenju, kao što su debljina, gustina i kompaktnost ledene kore, kao i raspored ledene mase po površini vodotoka. Izvesno je samo da su hidraulički efekti ledenih formacija povećanje otpora (rapavosti) i okvašenog obima, a smanjene hidrauličkog radijusa (KI-3.4-Sl:3.7). U nedostatku pouzdanih informacija, u proračunima se obično pretpostavlja da je raspored ledene mase po dužini i širini vodotoka konstantan i da su vrednosti debljine ledene kore i rapavosti u svim poprečnim profilima iste. Najvažniji rezultat hidrauličkog proračuna je veličina uspora izazvanog ledenom barijerom, odakle sledi procena rizika od ledene poplave.

Kritične deonice. Radi se o deonicama sa nedovoljnom propusnom moći za led u periodu ledohoda i deonicama pogodnim za formiranje ledenih barijera. Ove deonice su određene na osnovu ledenih epizoda zabeleženih u prošlosti. Oštre krivine su tipične kritične deonice. U našoj praksi se za označavanje kritičnih deonica koriste vrednosti dva karakteristična hidrauličko-morfoloških parametra: proizvoda brzine toka i širine korita $V \cdot B$ i Frudovog broja u obliku $V/\sqrt{2gR}$. Prvi parametar je indikator propusne moći korita za ledohod, a drugi parametar, indikator formiranja ledenih barijera. Male vrednosti parametra $V \cdot B$ ukazuju na „uska grla” za tranzit leda, a velike vrednosti, na opasnost od ledenih barijera, podvlačenjem ledenih santi ispod već obrazovane ledene kore³. Ilustrativni primer prikazan je na Slici 6.51 [165].

Mere za povećanje propusne moći za led. Na deonicama koje nemaju dovoljnu propusnu moć za led preduzimaju se regulacioni radovi. Uređenjem rečnog korita, koje podrazumeva ublažavanje oštih krivina, uklanjanje prirodnih i veštačkih prepreka, kao i izgradnju objekata za zadržavanje, usmeravanje i evakuaciju leda, može se povećati propusna moć za ledohod.

³Najnepovoljniji slučaj je kada se neposredno uzvodno od profila sa malom vrednošću $V \cdot B$ nalazi deonica sa visokim vrednostima parametra $V/\sqrt{2gR}$ ($> 0,1$). Uočiti da ovaj pristup ne uzima u obzir uticaj zakrivljenosti trase rečnog korita.



Slika 6.51: Deonice nepovoljne sa stanovišta propusne moći za led i mogućnosti formiranja ledenih barijera na Dunavu, na sektoru Apatin, pri protoku niskog plovnog nivoa $Q_{npr} = 1150 \text{ m}^3\text{s}$ (prema [165]).

Velika ulaganja u ove radove su tim pre opravdana ako se njima istovremeno postižu i drugi ciljevi, kao što su povećanje propusne moći za vodu i nanos, ili poboljšanje plovidbenih uslova.

6.4.4.2 Operativne mere odbrane od leda

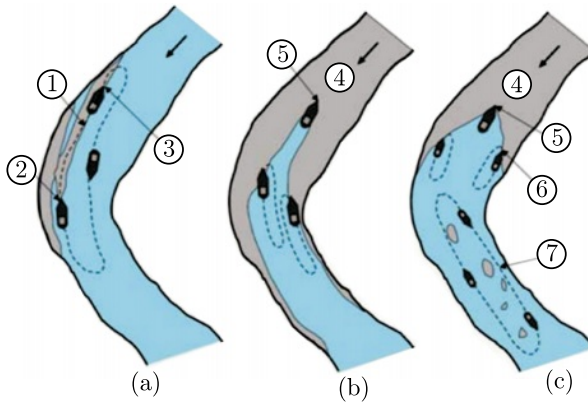
Osnovna operativna mere odbrane od leda na rekama je mehaničko razbijanje leda pomoću brodova ledolomaca (Slika 6.52) i pomoću eksploziva (miniranjem ledenih naslaga ili bombardovanjem iz vazduha).



Slika 6.52: Razni tipovi ledolomaca; sleva u desno: klasični ledolomac koji svojim pramcem razbija ledene sante; ledolomački sastav broda potiskivača i dodatnog korita („ledolomca”), povezanih ekscentarskom spojnicom, tako da se led razbija vibracijama dodatnog korita koje se ne prenose na brod potiskivač; ledolomac koji razbija led naskokom na sante.

Rad ledolomaca prilagođen je režimu leda na rekama. U periodu jesenjeg ledohoda, ledolomci patroliraju duž vodotoka i lokalnim intervencijama sprečavaju zastoje leda i rano formiranje ledenih barijera. U toku ledostaja, otvaraju i održavaju plovne koridore širine do 50 m (Slika 6.53), dok u periodu prolećnog ledohoda održavaju kontinualni pronos pokrenutih santi.

Nabavka ledolomaca zahteva velika finansijska ulaganja, a zbog čestih oštećenja i kvarova, eksploatacioni troškovi ovih specijalizovanih plovila su značajno veći od onih kod drugih brodova.



Slika 6.53: Shematski prikaz kretanja ledolomaca; (a) čišćenje plovnog puta: 1 – granica ledenog pokrivača; 2 – mesto proboja leda; 3 – probijen led; (b) i (c) probijanje ledene barijere: 4 – stabilni ledeni pokrivač; 5 – otvaranje koridora; 6 – širenje koridora; 7 – održavanje kretanja ledenih santi (prema [11]).

Za razbijanje leda eksplozivom (dinamit, trotil, amonit) koriste se minska punjenja postavljena na površini ledene kore ili (što je efikasnije) ispod nje, po mogućstvu u zoni matice vodotoka. Broj, raspored i jačina eksplozivnih punjenja zavise od širine korita i debljine ledenog pokrivača. Preporuka je da se miniranjem obezbedi po matici reke proticajni pojas od $1/4 \div 1/3$ širine minor korita [11]. Preduslov za miniranje ledenih barijera je da nizvodne deonice budu slobodne za oticanje ledenih santi i da se pri miniranju obezbede sve neophodne mere sigurnosti.

Pored mehaničkog razbijanja leda i uklanjanja ledenih barijera, postoje i neke druge mere, od kojih je najvažnija ona koja se odnosi na upravljanje radom ustava na branama (snabedevanim grejačima) da bi se režim uspora prilagodio zimskim uslovima, posebno u periodu evakuacije leda. Razne termičke i hemijske mere za topljenje leda, kao što su posipanje leda tamnim prahom (pepeo, šljaka) ili hemijskim materijama (KHCO_3 , NaF) su ograničenog, uglavnom eksperimentalnog karaktera.

6.5 Neinvesticione mere zaštite od poplava

Ove mere iziskuju određene investicije, ali su one neuporedivo manje od onih potrebnih za izgradnju pasivnih i aktivnih odbrambenih sistema, pa otuda naziv „neinvesticione (nekonstruktivne) mere”. Mogu se svrstati u tri kategorije.

Mere planiranja. Na osnovu izrađenih karata ugroženosti i rizika, donosi se odgovarajuća planska dokumentacija i zakonska regulativa usmerena ka smanjenju šteta. Ovo prati i odgovarajuća politika osiguranja materijalnih dobara. Mere planiranja moraju biti u saglasnosti sa investicionim merama; npr. planovi urbanog razvoja i buduće namene površina moraju biti usaglašeni sa položajem postojećih ili projektovanih retenzija, nasipa i drugih objekata za zaštitu od poplava.

Mere za smanjenje šteta. Primenjuju se na lokalnom nivou, a obuhvataju izdizanje stambenih objekata ili njihovu privremenu zaštitu od plavljenja (zemljani nasipi, vreće sa peskom, veštačke barijere, mobilna zaštita), a u krajnjem slučaju, preseljenje ugroženih domaćinstava.

Mere u vanrednim uslovima. Jedna od ovih mera podrazumeva projektovanje i izgradnju sistema za ranu najavu. Tu spada i izrada planova upravljanja poplavama na državnom, regionalnom i lokalnom nivou. Planovi upravljanja poplavama sadrže specifikaciju učesnika, materijalnih resursa i konkretnih mera na sanaciji odbrambenih linija. Ovi planovi su podložni reviziji i ažuriranju, jer se uslovi na terenu vremenom menjaju, kao i sami sistemi zaštite.

6.5.1 Kartiranje rizika od poplava

Ranije je definisan pojam statističkog rizika. Kada je u pitanju zaštita od poplava, pojam rizika dobija šire značenje jer pored „hazarda” – *verovatnoće* plavnog događaja (uzroka) obuhvata i „ranjivost” – *štetu* (posledicu), kao što shematski prikazuje dijagram na Slici 6.54 [118, 186, 206]. Iako se ranjivost usled poplava najčešće iskazuje kroz materijalne (novčane) gubitke, pojam ranjivosti ovde treba posmatrati u najširem smislu, tako što obuhvata i druge – socijalne i ekološke – nepovoljne posledice poplava⁴.



Slika 6.54: Komponente rizika od poplava; „ugroženost” („hazard”) predstavlja verovatnoću plavnog događaja, a „ranjivost” sistema predstavlja meru potencijalne štete; fotografije desno: rizik od poplava je veliki ako je veliko preklapanje hazarda i ranjivosti, a mali, ako je preklapanje malo [186].

Za kvantifikaciju rizika od poplava, u praksi se obično koristi ranije statistički definisana veličina nazvana „očekivna godišnja šteta” (tačka 6.4.1.3). Sračunati rizik, koji se može shvatiti kao „bazični” („osnovni”) rizik, ne može se u potpunosti sprečiti, već se merama zaštite može samo svesti na društveno i ekonomski prihvatljivu meru. Razlog je što je rizik od poplava *vremenska* kategorija. Menja se sa promenama u slivu, bilo da su one posledica ljudske delatnosti, ili usled prirodnih faktora koji utiču na pojavu velikih voda. Pored toga, statističke i hidrauličke ana-

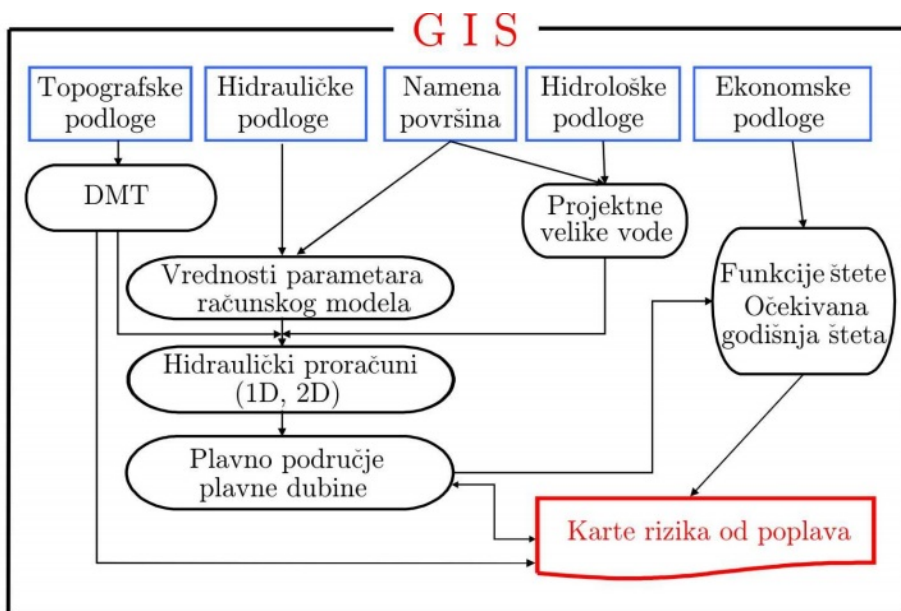
⁴Za naseljena područja je moguće razlaganje: „ranjivost = izloženost × osetljivost” [11]. Izloženost se odnosi na razmere *potencijalnih* posledica poplave (životno ugroženih stanovnika i imovine). Osetljivost je indikator *stvarnih* štetnih posledica, ali uzimajući u obzir efekte odbrambenih mera preduzetih na prostoru izloženosti.

lize počivaju na merenjima i proračunima podložnim greškama, što unosi određeni stepen neizvesnosti u procenu bazičnog rizika. Ako se ove neizvesnosti shvate kao dodatni rizik, onda je ukupni rizik jednak zbiru bazičnog i dodatnog rizika.

Kartiranje rizika od poplava je uslovljeno Evropskom direktivom o upravljanju poplavama [319] i našim Zakonom o vodama [318]. Generalno, ovo kartiranje obuhvata šest aktivnosti:

1. hidrološku analizu velikih voda i izbor projektnih poplavnih talasa;
2. hidrauličke proračune za definisanje plavnih područja;
3. izradu karata ugroženosti („hazarda”);
4. procenu potencijalne očekivane godišnje štete;
5. izradu karata šteta i rizika;
6. korišćenje karata rizika u svakodnevnom životu (planiranje, osiguranje, promet nekretnina itd).

Međusobna povezanost navedenih aktivnosti prikazana je na Slici 6.55. Proračuni se obavljaju pomoću savremenih softverskih alata u GIS okruženju.



Slika 6.55: Aktivnosti na kartiranju rizika od poplava.

Analiza rizika od poplava i izrada odgovarajućih karata može se obavljati u dve faze koje se razlikuju u stepenu detaljnosti, a obuhvataju tri osnovne aktivnosti [21]: (i) regionalne procene velikih voda; (ii) određivanje potencijalno plavnih površina i (iii) procenu šteta (Tabela 6.10). Prva, preliminarna faza je manje komplikovana od druge, u kojoj se zahteva veći stepen prostorne rezolucije i simulacija dinamike prirodnih procesa.

Tabela 6.10: Metodologija za preliminarnu i detaljnu analizu rizika od poplava (prema [21]).

Aktivnost	Prva faza	Druga faza
Regionalne analize velikih voda	Statističke (regionalne) analize: - izučeni sliv: osmotreni protoci - neizučeni sliv: osmotrene kiše - neizučeni sliv: računске kiše	Hidrološko modeliranje: - Računske kiše - Transformacija padavine-oticaј - Stvarni/sintetički hidrogrami
Hidraulički uticaji	Kota nivoa i plavne zone: - istorijska dokumentacija - uprošteni model (karte 1:50000) - 1D model (ustaljeno, DMT 1:5000)	Kote nivoa i plavne zone: - 1D model (ne/ustaljeno) - 2D model (strujno polje) - 1D+2D model (prolom nasipa)
Procena štete	Procene zavisnosti šteta: - namena površina (CORINE/ATKIS) - obim i dubina plavljenja - globalni iznosi za receptore rizika	Kvantifikacija šteta: - na lokalnom nivou - kategorizacija i tipologija - uticaj brzine toka, trajanja i dr.

6.5.1.1 Karte ugroženosti

U izradi karata ugroženosti („hazarda“) razmatraju se poplave koje spadaju u tri hidrološke kategorije:

(i) poplave male verovatnoće pojave, odnosno ekstremno velike vode povratnih perioda mnogo većih od 100 godina; tu spadaju i poplave nastale prolomom nasipa ili brana, poplave koje su posledica grešaka u dimenzionisanju evakuacionih objekata ili njihovog oštećenja u toku eksploatacije, poplave usled zagušenja mostovskih otvora i propusta, kao i poplave koje su posledica koincidencije velikih voda na reci i njenim pritokama;

(ii) poplave umerene verovatnoće pojave, povratnog perioda do 100 godina;

(iii) poplave velike verovatnoće pojave, povratnog perioda reda veličine 10 godina, koje su od interesa za lokalne zajednice izložene čestim izlivanjem bujičnih reka.

Karte ugroženosti se rade za postojeće uslove, pretpostavljajući da je uticaj klimatskih promena već sadržan u ažuriranim hidrološkim ulaznim podacima. Budući trendovi velikih voda, ako se mogu predvideti, razmatraju se posebno, u okviru planova za upravljanje rizikom od poplava.

Smernice za izradu karata ugroženosti. Polazi se od toga da moraju biti zadovoljeni određeni tehnički uslovi koji se odnose na prikupljanje i obradu neophodnih podloga (topografskih, hidroloških i hidrauličkih), kao i na izbor i korišćenje računskih modela [158].

(1) *Hidrologija.* Protoci velikih voda klasifikuju se prema verovatnoći pojave (odnosno povratnom periodu). Rezultat su statističke analize osmotrenih nivoa, ili proračuna padavine-oticaј. Ovaj drugi pristup omogućava da se numerički

simulira niz diskretnih plavnih događaja i da se naknadnom statističkom obradom računskih hidrograma dođe do relativno pouzdanih vrednosti ekstremih protoka u slivu.

(2) *Topografija*. Kvalitetne topografske podloge treba da obuhvate glavno korito i inundacije, uključujući nasipe i druge hidraulički relevantne objekte. Glavno korito i građevine se geodetski snimaju na terenu, a inundacije i linije nasipa se definišu na osnovu digitalizovanih geografskih karata ili digitalnog modela terena (DMT). Razmak poprečnih profila mora biti izabran tako da budu obuhvaćena sva mesta nagle promene geometrije rečnog korita i ne bi trebalo da bude veći od 200 m. Broj koordinata koje definišu poprečni presek mora biti dovoljan da se oblik preseka može prikazati sa prihvatljivom tačnošću. Liniju najvećih dubina (matice – „talvega”) treba snimiti na terenu, na velikim rekama eho uređajem, a na malim, priručnim sredstvima – mernom letvom ili čeličnim užetom sa tegom.

Svi hidraulički važni objekti (mostovi, brane, prelive, propusti) moraju biti geodetski snimljeni. Isto važi i za linije nasipa, ukoliko rezolucija DMT to ne dozvoljava. Tačnost DMT je presudna za definisanje plavnih zona, pa se DMT izrađuju na osnovu aerofotogrametrije ili laserskog skeniranja terena iz vazduha (LiDAR). Za izradu DMT se preporučuje mreža rezolucije ≤ 2 m, da bi se mogle uhvatiti nagle promene terena i linijski entiteti (reke, nasipi, putevi, pruge). Uobičajeno je da se relevantni detalji naknadno geodetski snimaju i dodaju na postojeći DMT.

(3) *Namena površina*. Podaci o nameni površina (zemljišnom pokrivaču) su bitni za proračune površinskog oticaja i tečenja u rečnom koritu. Ovi podaci se mogu kombinovati sa podacima iz literature da bi se definisali hidraulički otpori. Izvori podataka se mogu naći na internetu (baze podataka ATKIS – *Official topographic-Cartographic Information System*, CORINE – *Land Cover Data*). Preporučuje se i prikupljanje dopunskih podataka obilaskom terena ili obradom ortofoto dokumentacije. Kada se radi proračuni ravanskog (2D) tečenja, konture zgrada se mogu geometrijski obuhvatiti računskom mrežom samo ako je njihov broj mali. U suprotnom, zgrade se modeliraju globalno, pomoću tzv. „veštačke poroznosti” (procentualnim isključenjem površine pod zgradama, ili se njihov uticaj na strujno polje uzima u obzir globalno, povećanjem hidrauličkih otpora.

(4) *Hidraulika*. Za kartiranje plavnih površina koriste se hidraulički modeli različitih nivoa složenosti. Ključni kriterijum za izbor modela su karakteristike rečne doline – širina i uzdužni nagib dna. Da se ponovi ono što je poznato: za relativno uske doline sa jasno definisanim pravcem strujanja koriste se modeli linijskog (1D) strujanja, a za široke doline bez jasno definisanog pravca strujanja, modeli ravnanskog (2D) strujanja. Prvi daju kote nivoa i osrednjene brzine u računskim poprečnim profilima, a drugi, kote nivoa i po dubini osrednjene brzine za mnoštvo tačaka računске mreže u horizontalnoj ravni. Obe vrste modela simuliraju ustaljeni ili neustaljeni režim tečenja. Postoji mogućnost i kombinovanja 1D i 2D modela.

Problemi u primeni računskih modela su vezani za podloge i kalibraciju. Kartiranja plavnih zona može biti kompromitovano nedovoljnim ili nekvalitetnim podlogama. Tipična je situacija kada se u cilju sniženja troškova terenskih radova smanji broj poprečnih profila koje treba snimiti. Umesto cele inundacije, nije redak slučaj da se snimanjem obuhvate samo njeni najuži ili najniži delovi (neko je procenio da će se voda samo tu sigurno kretati). Ovakva praksa ne samo da utiče na pouzdanost proračuna, već dovodi u pitanje kalibraciju računskog modela. Naime, podešavanjem vrednosti Manningovog koeficijenta, mogu se uskladiti kote nivoa računskog i opaženog poplavnog talasa, ali to nije dovoljno, jer se moraju uskladiti i brzine prostiranja ovih talasa. Sa pogrešnom geometrijom rečnog korita, pogotovo sa neadekvatnim retenzionim prostorom u inundacijama, to nije moguće (ili se može postići samo sa fizički nerealnim vrednostima Manningovog koeficijenta).

Postupak kalibracije računskog modela može biti vrlo problematičan. Ako se za kalibraciju modela koriste podaci jako udaljenih hidroloških stanica. Bez dovoljno topografskih i hidrauličkih podataka između dve stanice, računski model poprima karakter modela „crne kutije” i rezultat njegove kalibracije može biti fizički nerealna linearna veza između protoka i koeficijenta otpora. Pored toga, problematično je i uvreženo mišljenje da je za korišćenje nekog računskog modela u praksi dovoljna njegova uspešna kalibracija i verifikacija⁵. Problem je u tome što su fizički uslovi promenljivi. Na primer, sa promenom protoka i brzine toka, nanosne formacije se menjaju, pa odgovarajuće vrednosti aluvijalnih otpora (oblika) koje se koriste za kalibraciju i verifikaciju modela ne moraju biti iste. To znači da se vrednosti parametara određene u fazi kalibracije ne mogu smatrati invarijantnim, a svaki pokušaj verifikacije iziskuje novo podešavanje ovih vrednosti. Ovim postaje jasno da za ocenu pouzdanosti modela potrebno više od dva merenja, što znači da je verifikacija modela *kontinualni proces* koji obuhvata što više postojećih (i budućih) merenja.

Treba naglasiti da je kartiranje ugroženosti od poplava nezamislivo bez GIS okruženja. Poznato je da su GIS alati efikasno sredstvo za predprocesiranje ulaznih podataka i postprocesiranje rezultata proračuna. To podrazumeva ne samo arhiviranje i vizualizaciju raznih prostornih podataka, već i njihovu analizu. Međutim, GIS alati imaju i mogućnost integrisanja i unakrsnog povezivanja različitih računskih komponenti, što daje GIS sistemu nove funkcijske i algoritamske opcije (komponentu modeliranja). S druge strane, poznati softverski sistemi, kao što je na primer HEC-RAS, razvijaju sopstvene GIS module za vizuelizaciju prostornih podataka i rezultata hidrauličkih proračuna [251].

Sadržaj i izgled karata ugroženosti. Izrada karata hazarda obavlja se GIS alatima. Tematski sadržaji ovih karata arhiviraju se i prikazuju u vektorskom i

⁵Podsetimo se da je kalibracija proces podešavanja vrednosti parametara računskog modela sve dok se ne postigne prihvatljivo slaganje rezultata proračuna i merenja, a verifikacija modela je proces potvrđivanja dobrog slaganja rezultata proračuna sa drugim podacima istog ili nekog drugog merenja, bez podešavanja vrednosti parametara (kalibrisanog) modela.

raster formatu. Podaci se arhiviraju u vidu metapodataka koji se odnose na izvor, tačnost, razmeru i datum poslednjeg ažuriranja. Za štampanje karti plavljenja, pogodan je format DIN A0. Karte moraju da zadovolje kartografske standarde u pogledu oznaka, razmera i drugih relevantnih podataka. Razmena digitalnih karata preko interneta mora biti oslobođena podela na stranice i mora omogućiti neprekidno pomeranje („panning”) i uvećanje („zooming”), prikazivanje/skrivanje specifičnih informacija, kao i preuzimanje slika u nizu standardnih formata.

Granice plavnog područja, dubine vode i brzine toka (gde je potrebno) prikazuju se za svaku poplavu merodavnog povratnog perioda. Preporučuje se da se dubine obeleže po intervalima ili prikažu skalom u boji, kao što je prikazano na Slici 6.56. Zbog različitog tretmana nebranjjenih i branjenih zona, preporučuje se da se kod nebranjjenih zona koriste razne nijanse plave boje za obeležavanje dubine plavljenja, a za branjeno područje, razne boje, prema tematskom sadržaju (Slika 6.56). Objekti za zaštitu od poplava (nasipi, retenzije i dr.) moraju se takođe prikazati na kartama plavljenja.

Ako se za karte ugroženosti (hazarda) koriste modeli ravanskog (2D) tečenja, pored dubine plavljenja, prikazuje se i raspored brzine toka u horizontalnoj ravni. Prikazuje se vektorsko polje brzine, sa dužinom vektora koja je proporcionalna intenzitetu brzine (Slika 6.57). Pored brzine, od interesa za kartiranje mogu da budu i neke druge veličine vezane za udarni efekat poplavnog talasa. Reč je o veličinama koje ukazuju na impuls (količinu kretanja) i energiju poplavnog talasa: $(hV)_{\max}$ i $(hV^2)_{\max}$ [251].

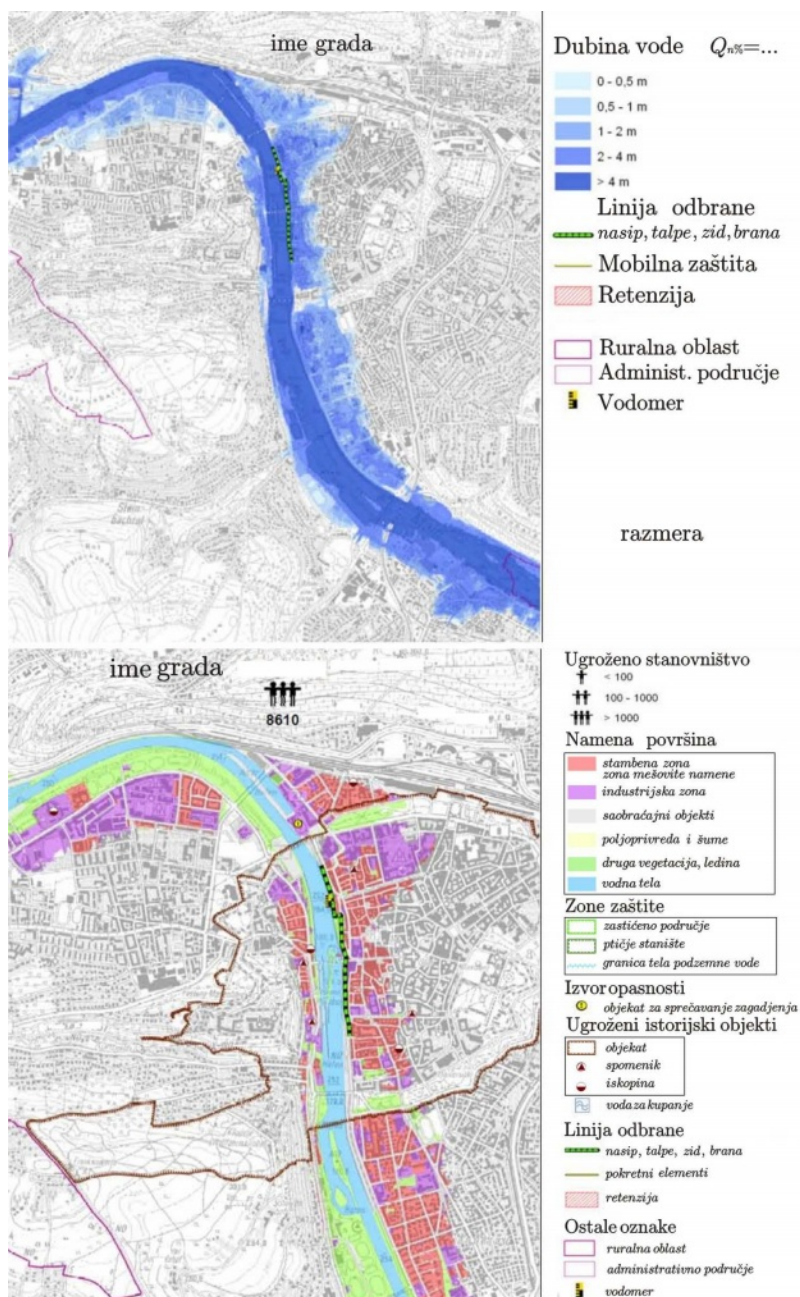
6.5.1.2 Karte rizika

U načelu, kartiranje rizika se zasniva na kvantifikaciji materijalne štete u zavisnosti od verovatnoće plavnog događaja. Potencijalna šteta od poplava obuhvata: ugroženo stanovništvo i životinje, kao i razne vrste materijalnih šteta koje se odnose na stambene objekte, infrastrukturu, industriju, useve, pokretnu imovinu, otvorene prostore (dvorišta, parkove). Za navedene kategorije ugroženih od poplava koristi se termin „receptori rizika”.

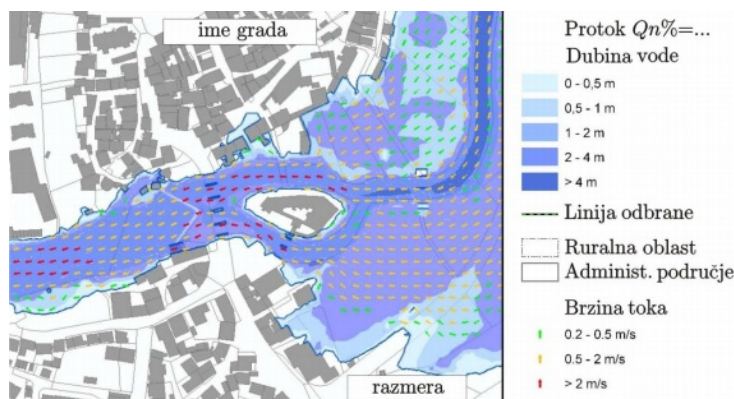
Vrednost imovine. Može se proceniti na dva načina.

(1) *Statistička vrednost imovine.* Određuje se za svaki „receptor rizika”. U slučaju urbanih područja (stambeni objekti, industrija, infrastruktura itd.), vrednost objekata (i pripadajućeg inventara) može se iskazati na dva načina, kroz:

- cenu izgradnje novoizgrađenih objekata ili cenu nabavke inventara, pretpostavljajući da se ta cena tokom vremena ne menja, ili alternativno, da je vremenski promenljiva, diskontnim obračunom amortizacije, osiguranja i drugih godišnjih troškova poslovanja;
- stvarnu cenu postojećih objekata koja podrazumeva i troškove njihove obnove posle poplave (može se računati bez promene vrednosti tokom vremena ili sa diskontovanjem, kao u prethodnom slučaju).



Slika 6.56: Ugledni primer karata ugroženosti koje prikazuju granice plavnog područja, dubine plavljenja, broj ugroženih stanovnika i strukturu ugroženosti (namenu površina, objekte, elemente odbrambenog sistema i dr.) [158].



Slika 6.57: Ugledni primer karte ugroženosti koja prikazuje raspored dubine i vektorsko polje brzine sračunato pomoću modela ravanskog (2D) strujanja [158].

(2) *Regionalna vrednost imovine.* Ovaj pristup podrazumeva određivanje: (i) apsolutne vrednosti imovine prema nameni površine [din, €] i (ii) specifične vrednosti imovine po jedinici površine određene namene [din/m², €/m²].

U regionalnim analizama se pravi razlika između urbanih i ruralnih područja. Koriste se podaci državnog statističkog zavoda. Podaci o urbanim područjima se odnose na površinu naselja, ukupni broj stanovnika i gustinu stanovanja [st/km²]. Treba imati u vidu da štete koje se procenjuju na osnovu zvaničnih statističkih podataka, *ne moraju predstavljati stvarne štete*. Takođe treba voditi računa da se ovde radi o *direktnim* materijalnim štetama, a da indirektno materijalne i nematerijalne štete (npr. zastoje u saobraćaju, gubitak posla, ljudske patnje i dr.) nisu uzete u obzir.

Vrednost imovine u naseljima. Određivanje nije jednostavno, jer je imovina raznovrsna i obuhvata: objekte, inventar i motorna vozila.

- Vrednost *privatnih objekata* izražava se kao ukupna vrednost svih objekata ili kao vrednost tipskog objekta. Domaćinstva se klasifikuju prema broju ukućana, a ukupna privatna imovina se može normirati u novčanim jedinicama po stanovniku [din/st, €/st].
- Vrednost *inventara* u objektu se može proceniti jedino pomoću podataka osiguravajućih društava, a kako su ti podaci obično nedostupni, procena vrednosti inventara je manje-više subjektivna.
- Vrednost *privatnih motornih vozila* se procenjuje na osnovu broja domaćinstava, ili podataka o registraciji i osiguranju vozila. Prosečna vrednost motornih vozila se obično pretpostavlja (npr. za automobil 10000 €, a za motocikl 3000 €). Teretna vozila (autobusi, kamioni, traktori) nisu obuhvaćeni ovom kategorijom imovine.

Sabirajući navedene vrednosti imovine, može se odrediti *specifična* vrednost imovine u naseljima izražena po jedinici površine [din/m², €/m²].

Industrija i infrastruktura. Specifična vrednost ove imovine može se sračunati deljenjem ukupne vrednosti industrijskih objekata (sa inventarom) i ukupne vrednosti infrastrukture sa odgovarajućom površinom. Podaci o vrednosti regionalnih industrijskih i infrastrukturnih kapaciteta mogu se potražiti u zvaničnim statističkim godišnjacima, ili se dobiti od nadležnih ministarstava.

Zemljište. Razmatraju se tri kategorije: poljoprivredno (obradivo) zemljište, pašnjaci/livade i šume. Ova kategorizacija proizilazi iz različitog stepena „ranjivosti” zemljišta usled plavljenja. Osnova za procenu šteta u poljoprivredi je *godišnji prinos*. Vrednost prinosa se definiše za svaku kulturu posebno i izražava se po jedinici površine [din/ha, €/ha].

Godišnja vrednost imovine za kategoriju „pašnjaci/livade” računa se pod pretpostavkom da rast trave daje tri „žetve” godišnje, pa se na osnovu jedinične cene, može odrediti i ukupna godišnja cena. (Npr. ako je ukupni prinos $50 \text{ m}^3/\text{ha}$, a jedinična cena trave oko 15 €/m^3 , godišnja vrednost iznosi: $50 \times 15 = 750 \text{ €/ha}$).

U nedostatku pouzdanih podataka, vrednost imovine za kategoriju „šume” procenjuje se na osnovu vrednosti godišnjeg „prinosa” sirovog drveta. Prema nemačkim preporukama [186], mogu se uzeti sledeće prosečne godišnje vrednosti: (i) listopadne šume: 990 €/ha ; (ii) četinarske šume: 630 €/ha ; (iii) mešovite šume: $(990+630)/2 = 810 \text{ €/ha}$.

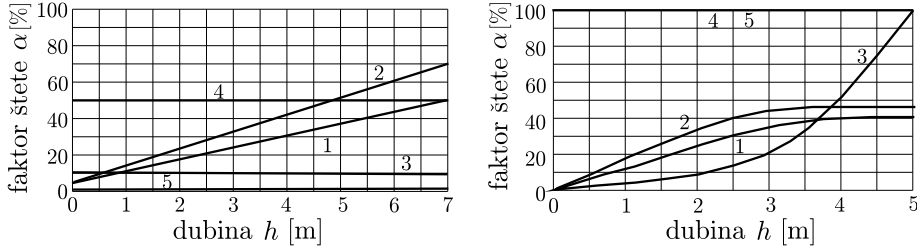
Funkcije šteta. Predstavljaju sredstvo za razmenu informacija o štetama, polazeći od vrednosti maksimalne moguće štete za dati receptor rizika (namenu površine): S_{\max} . Reč je o gornjoj granici štete („totalnoj šteti”) koja se ne dostiže čak i u slučaju ekstremno velikih poplava. Za definisanje funkcija štete se koristi „faktor štete” (α) koji pokazuje koliko je stvarna šteta S manja od maksimalne štete: $S = \alpha S_{\max}$.

Funkcije štete prikazuju zavisnost vrednosti ugrožene imovine (potencijalne štete) od dubine plavljenja. Mogu biti zasnovane na *stvarnim* štetama (registrovanim u prošlosti) ili na *sintetički* generisanim štetama. Ove druge se koriste u prognostičke svrhe, najčešće za potrebe ekonomske „benefit-cost” analize projektovanog sistema za zaštitu od poplava.

Za urbana područja mogu se koristiti sledeće preporuke za izradu sintetičkih funkcija šteta [186]:

1. formirati klase objekata na osnovu njihove namene i veličine;
2. za svaku klasu odabrati nekoliko reprezentativnih stambenih objekata i proceniti njihovu vrednost, kao i vrednost pripadajućeg inventara; šteta se određuje za nekoliko izabраниh kota nivoa vode ispod i iznad nivoa terena;
3. osrednjavanjem štete na reprezentativnim objektima pri različitim kotama plavljenja, dobijaju se merodavne vrednosti štete za svaku klasu objekata.
4. grafički prikaz uspostavljenih zavisnosti predstavljaju funkcije štete.

Treba napomenuti da funkcije potencijalnih šteta odražavaju lokalne uslove i regionalno se mogu veoma razlikovati. Ilustracije radi, na Slici 6.58 prikazane su funkcije šteta za reke Rajnu i Elbu u Nemačkoj⁶ [186]. Njihov analitički oblik dat je u Tabeli 6.11.



Slika 6.58: *Funkcije šteta od poplava u dolini reka Rajne (levo) i Elbe (desno): 1- naselja, 2- industrija, 3- saobraćajna infrastruktura, 4- poljoprivreda, (pašnjaci/livade); 5- šume* [186].

Tabela 6.11: *Funkcije štete koje se koriste u Nemačkoj* [186].
 α – faktor štete [%], h – dubina vode [m]

Namena površina	Funkcija štete	
	Rajna (IKSR)	Elba (IKSE)
Naselja	$\alpha = 6,4h + 4,9$	$\alpha = -2h^2 + 18h$
Industrija	$\alpha = 9,6h + 6$	$\alpha = -3,3h^2 + 24,4h$
Infrastruktura	$\alpha = 10$	$\alpha = 2h^3 - 8h^2 + 12h$
Poljoprivreda	$\alpha = 50$	$\alpha = 100$
Pašnjaci/livade	$\alpha = 50$	$\alpha = 100$
Šume	$\alpha = 1$	$\alpha = 100$

Funkcije potencijalnih šteta u poljoprivredi mogu se uprostiti tako što se faktor štete smatra nezavisnim od dubine i trajanja plavljenja, pa se za obradivo zemljište smatra da plavljenje izaziva gubitak useva od 100 %, kao u slučaju reke Elbe (Tabela 6.11). S druge strane, pretpostavka da je faktor štete za pašnjake i livade iznosi 50 %, odgovara slučaju da u poplavi strada samo jedna „žetva” trave godišnje. Kada su šume u pitanju, vrednost faktora štete ne zavisi od dubine plavljenja, ali zavisi od trajanja poplave; kratkotrajna poplava ima nisku vrednost faktora štete (slučaj reke Rajne), a dugotrajna poplava izaziva totalnu štetu od 100 % (slučaj reke Elbe, Tabela 6.11). Navedeno potvrđuje da je formiranje funkcija štete od poplava vezano za svojstva vodotoka i mnoštvo lokalnih uslova.

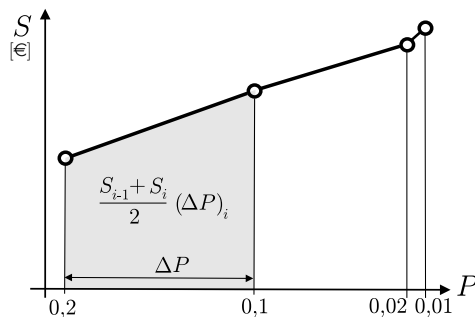
Očekivana ukupna godišnja šteta. Već je ukazano na činjenicu da se šteta ne može sa sigurnošću predvideti, već samo statistički iskazati kao *očekivana godišnja šteta* koja, kao što je ranije rečeno, obuhvata poplave raznih povratnih perioda i zavisi od veličine plavnog područja, dubine plavljenja i namene površina. Opšti izraz

⁶U ovoj zemlji je još 1985. godine započet sistematski rad na prikupljanju i obradi podataka o štetama od poplava. Svi podaci su obrađeni pomoću, za tu svrhu razvijenog, softverskog sistema HOWAS, koji se sastoji od nekoliko modula: učitavanje, ispitivanje i korekcija ulaznih podataka, administriranje, selekcija i povezivanje podataka, analiza i eksport podataka.

za očekivanu godišnju štetu (6.9) se može definisati preko nekoliko verovatnoća merodavnih za kartiranje rizika [206, 186]:

$$\bar{S} = \int_{P_0}^{P_{\max}} S(P) dP \approx \sum_{i=1}^{\max} \frac{S_{i-1} + S_i}{2} (\Delta P)_i . \quad (6.14)$$

Oznake: \bar{S} – očekivana godišnja šteta (potencijalna srednja godišnja šteta) [din/god, €/god]; $S(P)$ – šteta [din, €] usled plavnog događaja verovatnoće pojave P [1/god]; P_0 i P_{\max} su verovatnoće poplava koje izazivaju najmanju i najveću štetu [1/god] (Slika 6.59); ΔP – priraštaj verovatnoće, i – indeks povratnog perioda.



Slika 6.59: Grafička interpretacija određivanja očekivane godišnje štete numeričkom integracijom funkcije $S(P)$ (trapezno pravilo); granične vrednosti $P_0 = 0,2$ i $P_{\max} = 0,01$ se usvajaju.

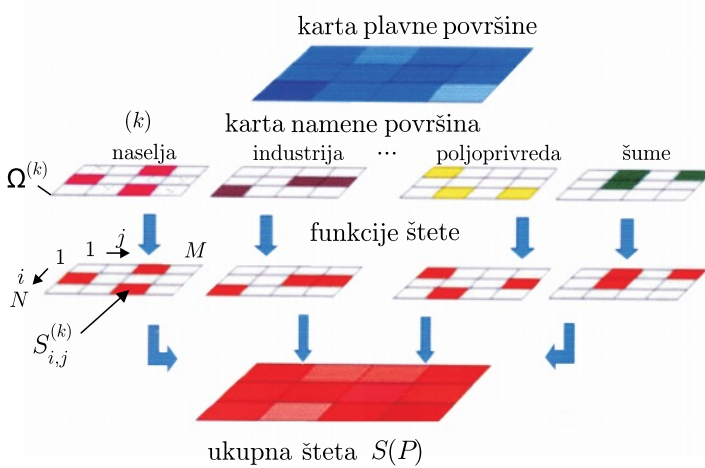
Proračun ukupne potencijalne štete u GIS okruženju. Na Slici 6.60 shematski je prikazan način proračuna ukupne potencijalne štete za poplavu određenog povratnog perioda $S(P)$. Oblast se diskretizuje pravougaonom mrežom, pri čemu je pogodno da jedno polje mreže (na ekranu piksel) odgovara jediničnoj površini. Svaka kategorija nemene površina ima svoju mrežu. Specifična (jedinična) vrednost materijalnih dobara za datu namenu površine, izražena u novčanim jedinicama po jedinici površine [din/m², €/m²], dobija se kao količnik:

$$V_1^{(k)} = \frac{V^{(k)}}{\Omega^{(k)}} , \quad (6.15)$$

gde je $V^{(k)}$ – ukupna vrednost materijalnih dobara [din, €], a $\Omega^{(k)}$ – površina oblasti [m²] određene namene (k). U kontekstu rizika od poplava, veličina definisana izrazom (6.15) predstavlja potencijalno najveću moguću („totalnu”) štetu na području date namene. Potencijalna specifična (jedinična) šteta definiše se za svako polje na Slici 6.60:

$$S_{i,j}^{(k)} = \alpha_{i,j}^{(k)} V_1^{(k)} \quad [\text{din}/\text{m}^2, \text{€}/\text{m}^2], \quad (6.16)$$

gde je $\alpha_{i,j}^{(k)} = \alpha(h_{i,j})$ – faktor štete za datu namenu površine, a $h_{i,j}$ – dubina vode u polju (i, j) pri poplavi verovatnoće pojave P .



Slika 6.60: Kombinovanje podataka pri proceni ukupne potencijalne štete za poplavu određenog povratnog perioda [186].

Ukupna potencijalna *specifična*, ili *jedinična* šteta za namenu površine k iznosi:

$$S_1^{(k)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_{i,j}^{(k)} \quad [\text{din}/\text{m}^2, \text{€}/\text{m}^2], \quad (6.17)$$

gde simboli N i M označavaju ukupan broj polja mreže na Slici 6.60.

Ukupna potencijalna šteta za namenu površine k biće:

$$S^{(k)} = S_1^{(k)} \Omega^{(k)} \quad [\text{din}, \text{€}]. \quad (6.18)$$

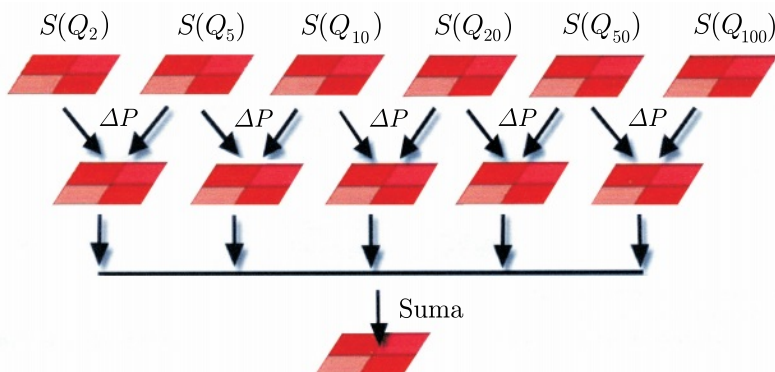
Sabiranjem doprinosa svih namena površina, dobija se ukupna potencijalna šteta, koja se može iskazati na dva načina:

$$S(P) = \begin{cases} \sum_{k=1}^L S_1^{(k)} & [\text{din}/\text{m}^2, \text{€}/\text{m}^2] \\ \sum_{k=1}^L S^{(k)} & [\text{din}, \text{€}], \end{cases} \quad (6.19)$$

gde L predstavlja broj svih kategorisanih površina određene namene.

Na osnovu sračunatih šteta za poplave raznih verovatnoća (povratnih perioda), može se sračunati očekivana godišnja šteta, kao što je shematski prikazano na Slici 6.61.

Opisani postupak kvantifikuje rizik od poplave određenog povratnog perioda preko veličine štete koju ta poplava proizvodi. Skala rizika se može učiniti široj javnosti lakše razumljivom ako se vizuelno prikaže pomoću *karte rizika od poplava*. Iako



Slika 6.61: Proračun očekivne godišnje štete [186].

za sada kartiranje rizika od poplava nije svuda standardizovano, obično se rizik klasifikuje prema učestalosti poplava, a zone rizika se, radi lakšeg prepoznavanja, prikazuju u raznim bojama (Tabela 6.12).

Tabela 6.12: Zoniranja plavnih oblasti u Nemačkoj prema stepenu rizika [186].

Stepen rizika	Boja	Povratni period
Nizak	zelena	> 50 godina
Umeren	žuta	10 ÷ 50 godina
Visok	crvena	< 10 godina

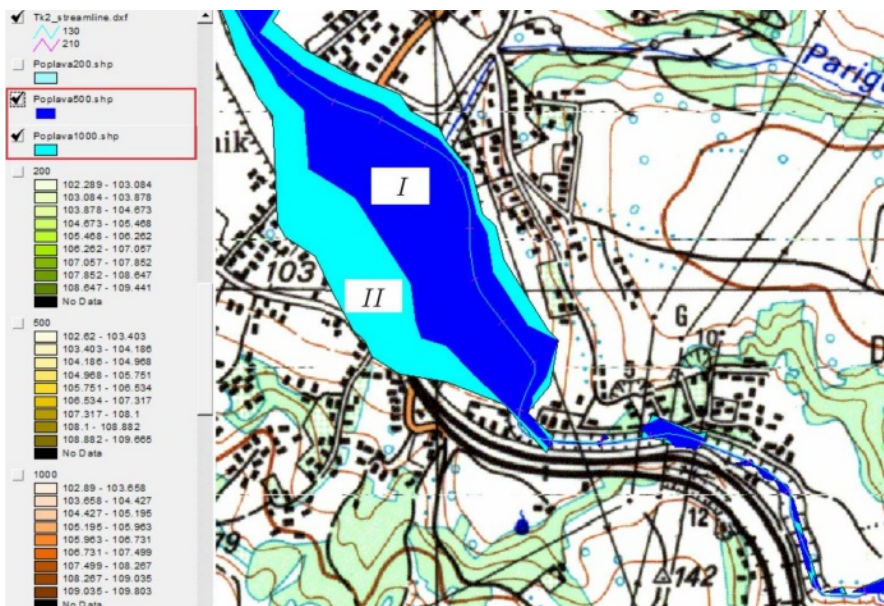
Sadržaj i izgled karata rizika. Tipične razmere za ove karte su: 1:2500, 1:10000, izuzetno 1:25000. Karte rizika sadrže granice plavnog područja, prenete iz karata ugroženosti (hazarda) koje su prethodno izrađene za najmanje tri velike vode izabranih povratnih perioda. Kao što će se videti na primerima koji slede, na ovim kartama se daje mnoštvo informacija, kao što su: namena površina, broj potencijalno ugroženih stanovnika, broj i položaj ugroženih stambenih, industrijskih i infrastrukturnih objekata, zaštićenih područja, lokacija od istorijskog i kulturnog značaja itd.

■ **Primer 6.9.** Na Slici 6.62 prikazan je deo sliva Topčerske reke u blizini naselja Resnik, sa regulisanom rečnom deonicom dužine 2 km. Za ovo urbanizovano slivno područje od interesa su posledice retkih plavnih događaja, povratnog perioda 200, 500 i 1000 godina: $Q_{200} = 108 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{500} = 130 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{1000} = 146 \text{ m}^3/\text{s}$ [116, 231].

Rešenje. Za razmatrano područje izrađen je digitalni model terena. Prema nameni, površine su kategorisane: naselja, saobraćajna infrastruktura (železnička pruga i putevi), poljoprivredno zemljište i travnate površine. Podela slivnog područja prema nameni korišćena je u hidrološkoj analizi za ocenu površinskog oticaja, a u hidrauličkoj analizi, za procenu vrednosti Manningovog koeficijenta otpora u inundacijama.



Slika 6.62: Deo sliva Topčiderske reke sa granicama računске deonice [116, 231].



Slika 6.63: Plavno područje u dolini Topčiderske reke; I - oblast plavljenja pri velikim vodama Q_{500} i Q_{1000} ; II - oblast koja se plavi samo pri Q_{1000} . Prosečne dubine plavljenja u oblasti I su: $h_{500} = 0,16$ m i $h_{1000} = 0,45$ m, a u oblasti II: $h_{1000} = 0,15$ m [231].

Na osnovu proračuna linijskog ustaljenog tečenja pomoću programskog paketa HEC-RAS, konstatovano je da do neznatnog izlivanja iz rečnog korita dolazi samo u nekoliko profila pri protoku Q_{200} , a da značajno plavljenje priobalja dolazi tek pri velikim vodama povratnog perioda 500 i 1000 godina. Na Slici 6.63 prikazano je plavno područje sračunato sa protocima Q_{500} i Q_{1000} . Sa inundacionih karti očitane su dubine plavljenja, neophodne za proračun očekivane godišnje štete.

Za svaku kategoriju namene površina unutar plavne zone, određene su potencijalne jedinične štete, prema sledećoj specifikaciji:

(1) *Naselja*. Na razmatranom području postoji 273 relativno nova stambena objekta. Za reprezentativan objekat je izabrana porodična prizemna kuća površine 200 m^2 , sa cenom izgradnje od 950 €/m^2 . Cena objekta uvećana je za 15 % da bi se obuhvatila vrednost okućnica i pomoćnih objekata. Pretpostavljeno je da vrednost pokretne imovine (kućnog „inventara“) iznosi 600 €/m^2 , kao i da svaka porodična kuća ima bar jedno putničko vozilo. Vrednosti svih materijalnih dobara procenjene su prema njihovoj trenutnoj vrednosti. Detalji proračuna dati su u Tabeli 6.13.

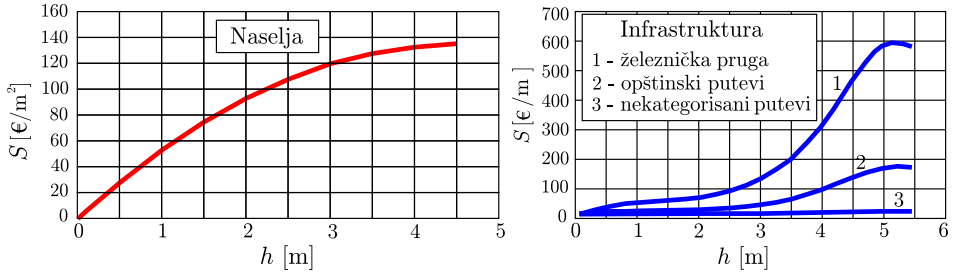
Tabela 6.13: Jedinične štete za naseljeni deo sliva Topčiderske reke [231].

(1)	Površina pod stambenim objektima	289908,06	m^2
(2)	Broj objekata	273	
(3)	Prosečna površina objekta	200	m^2
(4)	Jedinična cena izgradnje objekta	950	€/m^2
(5)	Prosečna vrednost objekta $1,15 \times (3) \times (4)$	218500	€
(6)	Vrednost nepokretne imovine (objekata) $(2) \times (5)$	59650500	€
(7)	Prosečna jedinična vrednost stambenog inventara	600	€/m^2
(8)	Vrednost stambenog inventara $(2) \times (3) \times (7)$	32760000	€
(9)	Broj privatnih motornih vozila	273	
(10)	Prosečna vrednost vozila	15000	€
(11)	Vrednost privatnih motorinih vozila $(9) \times (10)$	4095000	€
(12)	Vrednost pokretne imovine $(8) + (11)$	36855000	€
(13)	Ukupna vrednost materijalnih dobara $(6) + (12)$	96505500	€
(14)	Specifična (jedinična) šteta $(13)/(1)$	332,88	€/m^2

(2) *Saobraćajna infrastruktura*. U nedostatku pouzdanih podataka, pretpostavljeno je da je cena rekonstrukcije poplavom oštećene saobraćajne infrastrukture približno jednaka ceni njene izgradnje. Na osnovu dužine koloseka i širine železničkog koridora, kao i jedinične cene izgradnje pruge, došlo se do jedinične štete od 583 €/m^2 . Na sličan način određena je i cena izgradnje/rekonstrukcije puteva, pa je jedinična šteta za opštinske puteve 160 €/m^2 , a za nekategorisane puteve 10 €/m^2 [231].

(3) *Zemljište*. Imajući u vidu evropske i domaće cene poljoprivrednih kultura, procenjena je jedinična šteta za poljoprivredne površine od 23 €/m^2 , a za travnate površine $0,1 \text{ €/m}^2$ [231].

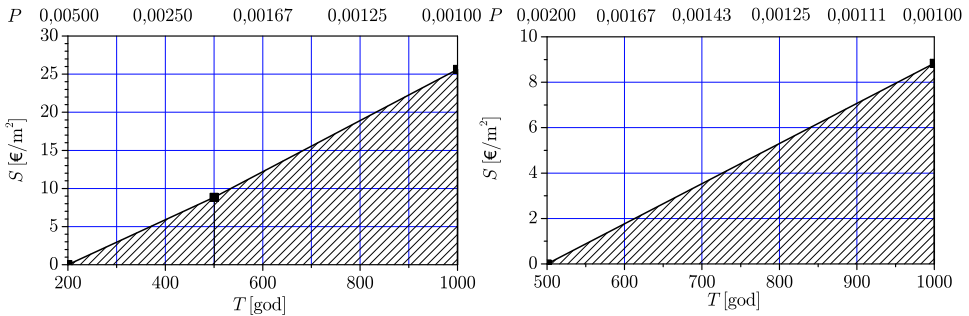
U konkretnom slučaju je procenjeno da je funkciju štete u naseljenoj oblasti naj-prikladnije izvesti prema faktoru štete IKSE (Tabela 6.11), jer je taj faktor izveden statističkom obradom velikog broja podataka o stambenim objektima prigradskog tipa (porodična kuća sa okućnicom). Na osnovu funkcije IKSE i jedinične štete iz Tabele 6.13), dobijena je funkcija prikazana na Slici 6.64. (Na primer, za dubinu od 1,0 m, faktor štete prema IKSE iznosi $\alpha=16\%$, što daje $0,16 \times 332,88=53,26 \text{ €/m}^2$). Na sličan način izvedena je i funkcija štete za saobraćajnu infrastrukturu.



Slika 6.64: Funkcije jedinične potencijalne štete na razmatranom delu sliva Topčiderske reke [116, 231].

Funkcija štete za poljoprivredno zemljište formirana je prema IKSR funkciji (Tabela 6.11), jer ova funkcija više odgovara našim uslovima. Faktor IKSR ima konstantnu vrednost 50% pri svim dubinama vode. Na osnovu sračunate jedinične štete, proizilazi da jedinična šteta za poljoprivredno zemljište iznosi 11,5 €/m², a za travnate površine, 0,05 €/m², bez obzira na dubinu plavljenja.

Na osnovu prosečnih dubina plavljenja u pojedinim povratnim periodima (Slika 6.63) i funkcija jediničnih potencijalnih šteta (Slika 6.64) formiraju se zavisnosti jedinične štete od povratnog perioda. (Na primer, za naseljeno područje u oblasti I, jedinična šteta za dubinu plavljenja od 0,15 m iznosi 8,838 €/m², a za dubinu od 0,45 m, 25,615 €/m²; isti postupak se prmenjuje i za oblast II). Konstruisani dijagrami prikazani su na Slici 6.65.

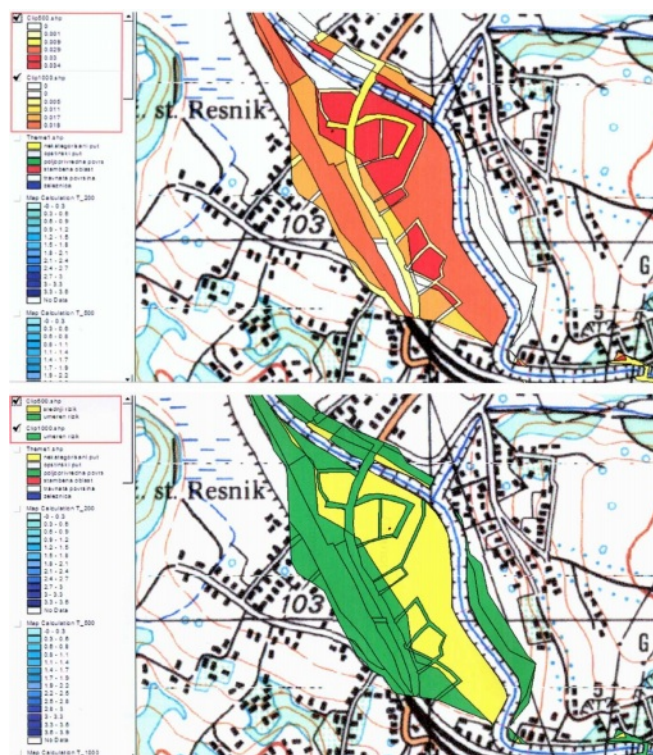


Slika 6.65: Jedinične štete za naseljeno područje (I i II) u zavisnosti od povratnog perioda, odnosno verovatnoće poplave [231].

Šrafirana površina na dijagramima na Slici 6.65 predstavlja *očekivanu jediničnu godišnju štetu* za naseljeno područje. Konkretno vrednosti su:

- plavna oblast I: $S(P) = 0,03048 \text{ €/}(m^2 \text{ god})$;
- plavna oblast II: $S(P) = 0,00441 \text{ €/}(m^2 \text{ god})$.

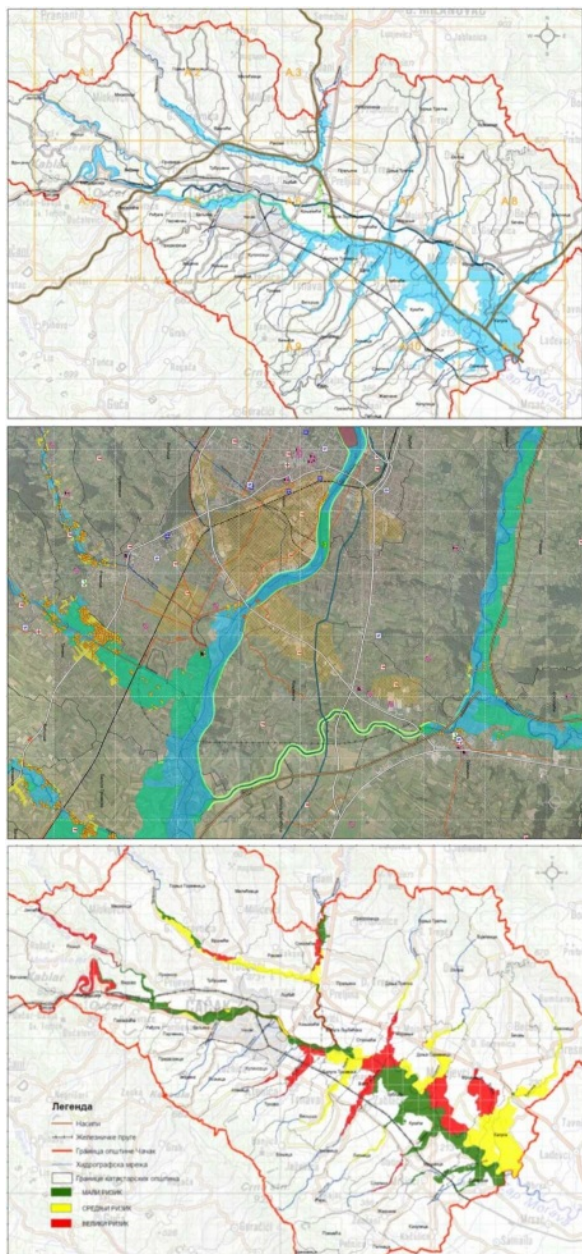
Na isti način se određuju očekivane godišnje štete i za ostale kategorije namene površina. Grafički prikaz *ukupne* očekivane godišnje štete za razmatrano područje dat je na Slici 6.66.



Slika 6.66: Karte očekivane godišnje štete (gore) i rizika (dole) za razmatrani deo sliva Topčiderske reke; obojene površine u oba slučaja ukazuju na novčane vrednosti u jedinicama $[\text{€/}(m^2 \text{ god})]$ [116, 231].

Za kartiranje rizika neophodno je izvršiti klasifikaciju rizika prema veličini očekivane godišnje štete. Alternativni pristup je da se klasifikacija rizika obavi prema visini osiguranja od poplava (koje je srazmerno očekivanoj šteti). Koristeći podatke osiguravajućih kompanija evropskih zemalja, za klasifikaciju rizika u naseljenom području (uključujući saobraćajnu infrastrukturu) za prag umerenog rizika može se usvojiti vrednost $0,03 \text{ €/}(m^2 \text{ god})$, a za prag visokog rizika, vrednost $1 \text{ €/}(m^2 \text{ god})$. Za poljoprivredno zemljište i travnate površine prag umerenog rizika predstavlja vrednost $0,012 \text{ €/}(m^2 \text{ god})$ [231]. Karta rizika prikazana je na Slici 6.66.

■ **Primer 6.10.** Na Slici 6.67 su ilustracije radi, prikazani rezultati kartiranja ugroženosti i rizika od bujičnih poplava na teritoriji opštine Čačak [66].



Slika 6.67: Odozgo na dole: karta ugroženosti, detalj karte ugroženosti i karta rizika od bujičnih poplava na teritoriji opštine Čačak [109, 66].

6.5.2 Sistemi za ranu najavu poplava

Savremena sredstva daljinske detekcije i telekomunikacionih tehnologija omogućavaju brze meteorološke prognoze, koje se putem računskih modela dovoljno brzo (čak u realnom vremenu) mogu prevesti u predviđanje poplavnih događaja, što je preduslov za rad sistema za ranu najavu poplava (SRNP). Međutim, uloga SRNP nije samo u blagovremnom upozorenju, već i u omogućavanju *dinamičkog upravljanja* sistemima aktivne odbrane, kao što su akumulacije, retenzije i rasteretni kanali.

Glavnu primenu SRNP imaju u najavi bujičnih, „naglih poplava” (engl. *flash floods*), koje karakterišu kratka trajanja i veliki vršni protoci. Ove poplave, koje nastaju kao rezultat intenzivnih padavina na maloj površini, obično nastaju bez prethodne najave i daju velike mogućnosti blagovremene zaštite stanovnika i imovine.

Osnovne hardverske komponente SRNP su: sistemi za merenje padavina (satelitski senzori, radari, mreže kišomernih stanica) i mreže uređaja za merenje nivoa u rekama. Osnovne softverske komponente su: kompjuterski programi za kratkoročne prognoze naglih poplava na osnovu podataka o kišama i meteorološko-hidrološki programi (modeli) za procenu rizika od poplava na nivou slivnih područja. Sastavni deo SRNP su i tehnička sredstva za obaveštavanje institucija zaduženih za odbranu od poplava, kao i upozorenje šire javnosti na ugroženom području.

Efikasno funkcionisanje SRNP je nezamislivo bez savremenih mernih i komunikacionih uređaja. Za merenje padavina koriste se neregistrujući kišomeri – totalizatori i registrujući kišomeri – težinski pluviografi i pluviografi sa klackalicom [194]. Pouzdanost i tačnost merenja pomoću kišomera su ključni faktori za uspešno korišćenje SRNP, pa je rekonstrukcija i automatizacija postojećih padavinskih stanica prvi korak ka uspostavljanju SRNP.

Meteorološki sateliti se mogu efikasno koristiti za predviđanje padavina. Geostacionarni sateliti koriste infracrvene senzore za formiranje meteorološke slike na širem planu, ali nisu dovoljno efikasni pri velikoj oblačnosti. Pasivni mikrotalasni senzori na satelitima koji kruže oko polova, otkrivaju vodu i led unutar oblaka i tako omogućavaju tačnije kvantitativne prognoze padavina. Aktivni mikrotalasni (radarski) senzori imaju najveću prostornu tačnost. Najbolje rezultate daje kombinovanje podataka prikupljenih sa svih satelita, ali je osnovni nedostatak što se podaci o kišama dobijaju u vremenskim intervalima od 3÷4 sata.

Meteorološki radari omogućavaju prognozu padavina u realnom vremenu. Otkrivaju stvaranje olujnih oblaka i prate ih na širokom prostoru. To omogućava utvrđivanje prostornog i vremenskog rasporeda padavina u visokoj rezoluciji, što je velika prednost u odnosu na tačkasto merenje pomoću kišomera. Ograničenja radara vezana su za opadanje jačine signala usled povećanog intenziteta kiše, ili usled terenskih smetnji za prostiranje radarskog signala.

Uređaji za automatsko registrovanje nivoa vode u rekama mogu biti različiti, počev od vodomernih letvi opremljenih kamerama za kontinualno praćenje nivoa, limni-grafa, akustičnih senzora i dr. Za uspešan rad SRNP bitno je sistematsko održavanje mreže ovih uređaja, kao i merenje protoka savremenom ADCP tehnologijom, kako bi se uspostavile pouzdane krive protoka. Solarno napajanje limni-grafa i prenos podataka mobilnom telefonijom omogućava praćenje nivoa u rekama u realnom vremenu.

Komunikacioni uređaji su od presudne važnosti za prenos podataka (u svim vremenskim uslovima) do centra u kome se obavljaju prognoze i šalju upozorenja. Na kratkim odstojanjima, radio veza može biti dovoljna, a na dužim odstojanjima, koriste se mreže fiksne i mobilne telefonije. Pristup internetu je obavezan, da bi se mogli koristiti satelitski snimci i pogodnosti „cloud” tehnologije. Dva tipa rezervne („backup”) komunikacije su na raspolaganju centrima SRNP: (i) alternativne, sekundarne linije za prenos podataka i (ii) rezervna servisna podrška od strane nekog drugog centra SRNP (idealno, svaki centar treba da je povezan sa najmanje još dva centra).

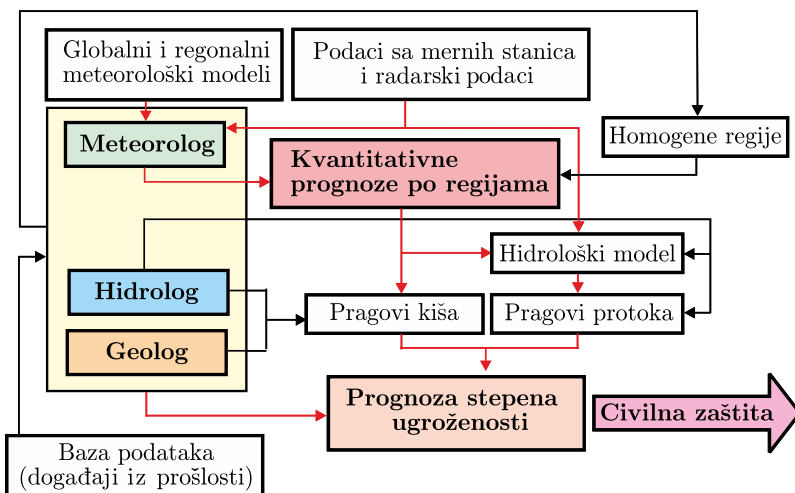
Dobar primer SRNP je onaj u regiji Piedmont (Piemonte) u Italiji [321]. Razvijan još od 1978. godine, ovaj sistem radi 24/7 po operativnim grupama (meteorologija, hidrologija, geologija) na najavi bujičnih poplava. Operativni centar izdaje dnevne izveštaje o trenutnoj i očekivanoj meteorološkoj situaciji, sa posebnom pažnjom na prognozu padavina. Prognoze se dostavljaju agencijama zaduženim za upozorenje javnosti i zaštitu stanovništva. Regionalni centri kontinualno ispituju opasnost od:

- poplava usled dugotrajnih obilnih padavina na području većem od 400 km², sa značajnom ugroženošću naselja i infrastrukture;
- lokalnih poplava usled kratkoročnih, intenzivnih padavina na površinama manjim od 400 km², sa mogućom pojavom klizišta i oštećenja na objektima bitnim za evakuaciju velikih voda;
- oštećenja saobraćajne infrastrukture usled poplava ili smetova, koja mogu izazvati prekid ili preusmeravanje saobraćaja.

U slučaju neposredne opasnosti, šalje se alarm lokalnim vlastima i široj javnosti. Sistem upozorenja je regionalno organizovan po „homogenim oblastima”, određeni prema geofizičkim, klimatskim i plavnim karakteristikama. Operativna struktura sistema je prikazana na Slici 6.68. Srce sistema je automatizovana mreža za meteorološki i hidrometrijski monitoring. Računske komponente sistema obuhvataju numeričke modele za globalnu i lokalnu meteorološku prognozu i modele za simulaciju poplava u hidrografskoj mreži.

Prognoza stepena ugroženosti se obavlja na dva načina. Prvi podrazumeva poređenje trenutnog stanja sa pragovima padavina i protoka koji su unapred definisani na osnovu studija i numeričkih simulacija događaja iz prošlosti (u tzv. „off-line” režimu rada). Drugi („on-line”) način prognoze koristi numeričke simulacije u realnom vremenu.

U prognostičkom režimu rada, kvantitativne prognoze padavina i oticaja omogućavaju upozorenje 1÷2 dana unapred i namenjene su lokalnim vlastima, ali ne i široj javnosti zbog mogućnosti greške (lažnog alarma). U upravljačkom režimu rada, hidrometeorološka osmatranja u realnom vremenu i hidrodinamički računski modul omogućavaju relativno pouzdanu kratkoročnu prognozu vršnog protoka i vremena nailaska (6÷12 sati unapred). Informacije u realnom vremenu su ključne za donošenje odluka u kriznim situacijama.



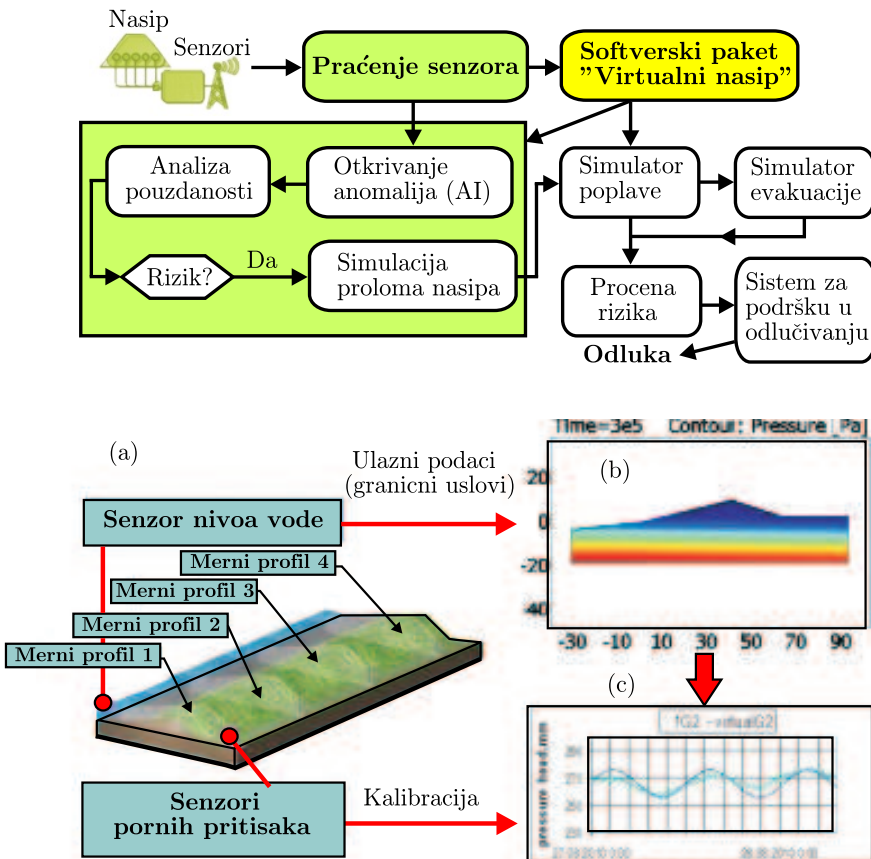
Slika 6.68: Komponente sistema za ranu najavu poplava regije Piedmont [321]; linije u crnoj boji označavaju „off-line” režim rada, linije u crvenoj boji, „on-line” aktivnosti u realnom vremenu.

Razvoj SRNP ide korak dalje od prognoze hidrološkog rizika, predviđajući i rizik od havarija na objektima za odbranu od poplava, pre svega nasipa. Nasipe su tradicionalno nadgledali čuvari (uglavnom u periodu poplava). Do sada je, iz mnogo razloga, inspekcija nasipa bila prostorno i vremenski ograničena. Sada međutim, savremene tehnologije daljinske detekcije, optičkih vlakana i elektronskih senzora ugrađenih u nasipe omogućuju njihov *neprekidan* nadzor [153]. SRNP prati rad senzora, detektuje nepravilnosti emitovanog signala, računa verovatnoću proloma nasipa i numerički simulira hidrauličke posledice. Rezultati simulacije se unose u interaktivni sistem za podršku u donošenju odluka.

Konfiguracija ovog tipa SRNP prikazana je na Slici 6.69. Modul za praćenje senzora instaliranih u telu nasipa, filtrira signale pomoću detektora anomalija (AI) i upozorava na destabilizaciju nasipa (ili kvar senzora). Modul za analizu pouzdanosti procenjuje verovatnoću proboja nasipa. Ako je ta verovatnoća velika, softverski simulator proboja predviđa dinamiku procesa, hidrogram plavljenja i ukupno vreme pojave, a zatim, simulator prostiranja poplavnog talasa definiše brzinu njegovog kretanja i veličinu plavnog područja.

Komponenta sistema je i paket softverskih alata „Veštački nasip” (eng. *Virtual Dike*) za istraživanja mehanizma proboja nasipa i obuku modula veštačke inteligencije (AI) za analizu parametara signala u slučaju havarije. Reč je o virtualnoj laboratoriji za stručne korisnike i programere koji rade na razvoju i kalibraciji računskih modela u okviru ovog SRNP. Kalibracijom računskog modela određuju se vrednosti parametara modela koje najbolje opisuju heterogenost i anizotropnost prirodnih zemljanih materijala od kojih se grade nasipi.

Veoma je važno da SRNP odlikuju *fleksibilnost* i *modularnost*, što znači da se pojedini računarski moduli mogu zameniti drugim modulima bez izmene arhitekture sistema i drugih modula. Takođe je važna i *adaptivnost* sistema, što upućuje na povezivanje istih ili različitih SRNP duž jednog sistema nasipa, ili na integraciju SRNP u hijerarhijsku strukturu višeg nivoa.



Slika 6.69: Primer SRNP koji upozorava na prolom nasipa [153]; (a) mreža senzora za merenje nivoa vode i pornih pritiska u telu nasipa; (b) numerička simulacija polja pornih pritiska; (c) poređenje lokalno izmerenih i sračunatih pornih pritiska (kalibracija modela).

6.5.3 Osiguranje od poplava

Osiguranje je jedna od najvažnijih neinvesticionih mera zaštite od poplava. Tržište osiguranja ima presudnu ulogu u saniranju šteta od poplava u privatnom i korporativnom sektoru. Važna uloga osiguranja je i podsticanje građanstva i privrede da, zahvaljujući povoljnim premijama, unaprede mere sopstvene zaštite. Međutim, uloga osiguranja seže daleko izvan pružanja finansijske nadoknade po zahtevu; osiguranje treba sistematski da prati i analizira štete pomoću statističkih modela i odgovarajućih baza podataka i sačini sopstvene funkcije šteta. Konačno, tu je prisutna i edukaciona misija da se putem publikacija, seminara i predavanja u javnosti (a naročito kod donosilaca odluka) raširi svest o neminovnosti „življenja sa poplavama”.

Osnovni problem osiguranja od poplava je ambivalentan odnos potencijalnih klijenata. Samo su stanovnici koji su na svojoj koži osetili poplave svesni rizika, dok su oni drugi, iako žive u blizini reka, skloni da ignorišu opasnost. Naime, posle velike poplave, percepcija jednog broja stanovnika je da se takav događaj za njihovog života više ne može ponoviti. Samo u područjima gde se poplave veoma često dešavaju i gde se štete periodično ponavljaju, postoji potražnja za osiguranjem⁷. Efekat negativne selekcije je naročito izražen u slučaju veoma retkih, katastrofalnih poplava, kada je proračun visine premija problematičan (radi se o množenju veoma malog broja koji predstavlja verovatnoću događaja i veoma velikog broja koji predstavlja štetu). Nasuprot tome, osiguranje od čestih bujičnih poplava je veoma isplativo, jer ove poplave imaju relativno uniformnu raspodelu verovatnoće u prostoru i vremenu, a osiguranje se može ostvariti na širokom frontu, sa povoljnim premijama.

Cena osiguranja imovine. Cena osiguranja (premija) mora po ugovoru da bude jednaka očekivanom budućem gubitku, uvećanom za troškove poslovanja, kompenzaciju rizika i profit osiguravača. Teorijski, premija se određuje prema izrazu [161]:

$$P = E \left[\sum_{i=1}^N L'_i \right] (1 + k_1)(1 + k_2)(1 + k_3), \quad (6.20)$$

gde je: E – operator statističkog očekivanja slučajne veličine L'_i – diskontovane nadoknade po i -tom zahtevu:

$$L'_i = L_i [1/(1 + r)]^{T_i}. \quad (6.21)$$

Oznake u izrazima (6.20) i (6.21) imaju sledeće značenje: L_i – sadašnja vrednosti gubitka (štete); r – kamatna stopa; T_i – period ispostavljanja i -tog zahteva; N – broj zahteva u periodu važnosti polise; k_1 – udeo troškova poslovanja (administracija, porezi, tržišni troškovi i dr.); k_2 – udeo dobiti osiguravajućeg društva; k_3 – udeo u ceni usled neizvesnosti tokova novca.

⁷Ova pojava se u osiguranju naziva „nepovoljna selekcija” (engl. „*adverse selection*”).

Argument operatora E predstavlja ukupnu diskontovanu novčanu vrednosti za obeštećenje osiguranika, dok sam operator E predstavlja težinsku srednju vrednost gubitka u periodu važnosti polise osiguranja:

$$E = \frac{L'_1 p_1 + L'_2 p_2 + \dots + L'_N p_N}{p_1 + p_2 + \dots + p_N}, \quad (6.22)$$

gde su verovatnoće pojave p_1, \dots, p_N (čiji je zbir jednak 1), težinski faktori. Ako svi ishodi slučajnih događaja imaju isto očekivanje: $p_1 = p_2 = \dots = p_N$, operator E se svodi na prostu aritmetičku sredinu.

Osnovni problem u proračunu premija za osiguranje imovine je definisanje statističkih modela za slučajne veličine N i L'_i . Obično se za diskretnu promenljivu N pretpostavlja Binomna ili Poasonova teorijska raspodela, dok izbor teorijske raspodele za promenljivu L' zavisi od prirode hazarda, odnosno uzroka potencijalne štete. (Ovim problemom se bavi specijalizovana literatura.) Inicijalno sračunate teorijske premije mogu biti naknadno modifikovane zbog političkih, socijalnih, ili tržišnih uslova (konkurentnosti). Najčešći uzrok korekcije su državne regulatorne mere koje uslovljavaju da premije ne smeju biti premale (zbog likvidnosti osiguravajućih kompanija), prevelike (zbog ograničenja profita), niti diskriminatorne (zbog socijalne jednakosti).

Kako se štete od poplava mere stotinama miliona, da bi se zaštitile od bankrota, osiguravajuće kompanije pribegavaju *reosiguranju* – osiguravanju same osiguravajuće kompanije kod veće (najčešće međunarodne) kompanije. Na taj način se lokalne štete, posredstvom reosiguranja, transferišu na globalni plan i efikasnije amortizuju. Šteta koja je predmet reosiguranja procentualno zavisi od ekonomskog potencijala primarnog tržišta osiguranja. U zemljama u razvoju, taj procenat tipično iznosi 95%, a u razvijenim zemljama, 50÷90% [151].

Karte ugroženosti i osiguranje. U prethodnom poglavlju je konstatovano da nije lako izraditi karte rizika, jer najčešće ne postoji mogućnost pouzdane procene direktne materijalne štete. Zato se rangiranje rizika za potrebe osiguranja razlikuje od slučaja do slučaja. Jedan pristup je da se karte rizika poistovete sa kartama ugroženosti, što znači da se osiguranje zasniva na hazardu (stepenu izloženosti), a ne na stvarnom riziku (štetama). Područja „male i umerene izloženosti” (poplave povratnog perioda 10÷50 godina), pogodna su za osiguranje bez ograničenja. Imovinu na području „velike izloženosti” (poplave povratnog perioda do 10 godina) ima smisla osiguravati samo pod određenim uslovima [109, 151].

Rangiranja rizika zasnovano na *kombinaciji* utvrđenih plavnih zona i visini očekivane godišnje štete za sve „receptore rizika” (objekti, industrija, poljoprivreda itd.) je za osiguravajuće kompanije mnogo sigurniji pristup⁸.

⁸Već je rečeno da u razvijenim zemljama postoje tzv. „funkcije štete”, čija je izrada finansirana upravo od strane osiguravajućih kompanija. Nažalost, u Srbiji još uvek nisu definisane funkcije šteta, pa izrada karti rizika (koja je u toku) uglavnom nije zasnovana na funkcijama šteta.

Akumulacija rizika. Kao što se klijenti osiguranjem štite, tako i osiguravajuće kompanije imaju mehanizme zaštite od prevelikih gubitaka. Radi se o tzv. „kontroli akumulacije rizika”, što podrazumeva procenu „verovatno najvećeg gubitka” (engl. *Probable Maximum Loss*) – PML [152]. Ukratko, akumulacija predstavlja ukupni rizik koji nastaje kada je više pojedinačnih rizika (različitih šteta) korelisano (geografski i na drugi način), tako da jedan plavni događaj pokrene istovremeno sve te rizike i izazove kumulativni gubitak (Slika 6.70).



Slika 6.70: Akumulacija rizika na primeru gradskog pristaništa [215].

Postoje razni modeli za proračun PML, a zajedničke su im tri faze. U prvoj – prostornoj analizi, identifikuje se ugroženo urbano područje. U drugoj fazi – tzv. „analizi portfelja” (skupa vrednosnih sredstava kompanije), procenjuju se očekivani gubici na nivou neke administrativne jedinice (npr. jednog poštanskog faha). U poslednjoj, trećoj fazi – analizi akumulacije, sumiraju se vrednosti svih gubitaka, po svim administrativnim jedinicama i dolazi do ukupnog gubitka (PML). Zbog raznih neizvesnosti (regionalizacija, podloge, greške proračuna), ovaj pristup nema dovoljnu tačnost za razmatranje *lokalnog rizika* od poplava, već je, svojom prostornom rezolucijom i nivoom tačnosti namenjen kontroli akumulacije gubitaka na regionalnom i državnom nivou.

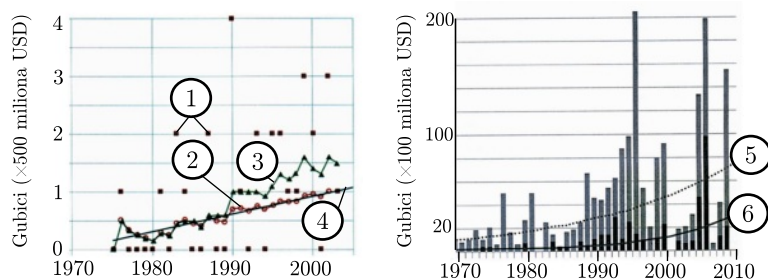
Trend porasta šteta od poplava i deregulacija cena su uzroci povećane dinamike poslovanja na tržištu osiguranja (Slika 6.71). Zbog toga je procena agregacije gubitaka sredstvo za *upravljanje* akumulisanim rizicima. Razvijeni su softverski alati koji omogućuju donošenje odluka *na dnevnom nivou* u skladu sa portfeljom osiguravajuće kompanije i to: (i) automatsku identifikaciju akumulacije rizika; (ii) kodiranje geografskih celina relevantnih za akumulaciju rizika; (iii) analizu inkrementalnog uticaja novih rizika; (iv) automatsku proveru prekoračenja dozvoljenog rizika i (v) izradu uputstva za procenu gubitaka za razne scenarije osiguranja⁹.

Karte osiguranja. U Evropi je od 2002. godine aktuelno kartiranje *prekogranične* ugroženosti od poplava. Za civilni sektor je posebno važan deo sa atlasom karata osiguranja [316]. Na ovim kartama je prikazano sve ono što je od interesa za tržište osiguranja: izloženost objekata (osiguranje imovine), ugroženost

⁹Dobar primer korišćenja informacionih tehnologija u upravljanju akumulacijom rizika je projekat CRESTA (Catastrophe Risk Evaluation and Standardizing Target Accumulation) [315].

stanovništva (osiguranje života) i izloženost industrije (poslovno osiguranje i osiguranje od prekida rada). Ove digitalne karte (u razmerama 1:10000 do 1:25000) sadrže razne tematske slojeve i služe za izradu portfelja, tarifiranje usluga i poslovanje (re)osiguranja. Podaci imaju komercijalnu vrednost i nisu javno dostupni, osim agregatnih podataka o izloženosti riziku (kumulativnim štetama). Kako je zaštita od poplava prekogranični problem, kartiranje ugroženosti se obavlja po slivnim područjima, što zahteva razmenu informacija između više zemalja. U tom cilju su osiguravajuće kompanije i njihove asocijacije razvile niz interaktivnih informacionih sistema sa internet portalima¹⁰.

Osiguranje od poplava i klimatske promene. Posle objavljenih izveštaja renomiranih institucija (kao što su IPCC – *The Intergovernmental Panel on Climate Change* [317] i WMO-*The World Meteorological Organization* i dr.), izvesno je očekivati da će u budućnosti poplave (kao i suše) biti veće i češće, a sa njima i štete (Slika 6.71).



Slika 6.71: *Levo: godišnji broj velikih nepogoda u Evropi sa štetom većom od 500 miliona dolara; 1 – istorijski broj; 2 – srednja vrednost; 3 – vrednost 10-godišnje pokretne sredine; 4 – trend [260]. Desno: Gubici usled velikih prirodnih katastrofa na globalnom nivou; 5 – trend gubitaka; 6 – trend osiguranih gubitaka [215].*

Klimatske promene su uticale da se promeni paradigma osiguranja u mnogim zemljama, jer se pokazalo da dosadašnji sistem osiguranja postaje neodrživ. Iskomplicovala se obrada zahteva za obeštećenje, jer je postalo nužno uvesti trijažu prioriteta raznih vodoprivrednih zahteva (plavljenje, odvodnjavanje, vodosnabdevanje itd.), pri čemu su klimatske promene ovu situaciju učinile još složenijom.

Osiguravajuće kompanije sve više teže ka promeni načina poslovanja i da premije vežu za *kvalitet lokalnih odbrambenih sistema*. Pri tome, standardne polise se nude samo za odbrambene sisteme koji štite od poplava povratnog perioda do 75 godina (najviše 200 godina). Izuzetak može da bude osiguranje imovine *postojećih* klijenata (i to samo do izvesne sume), ali ne i nove imovine.

¹⁰Švajcarska (CatNet), Austrija (HORA), Češka Republika (FRAT), Francuska (ARMINES), Nemačka (ZÜRS), Italija (ANIA) itd. [316].

Novi konceptualni pristup osiguranju može se opisati na sledeći način. U početku, kompanije su primenjivale *neaktivni* pristup, odgovarajući na zahteve kada ovi pristignu i ne ispitujući detaljno uzrok zahteva i specifičnosti lokacije. Sa porastom šteta, prešlo se na *reaktivan* pristup, sa prikupljanjem mnoštva informacija u vezi sa konkretnim zahtevom i sa komunikacijom sa drugim interesnim grupama, kao što su zakonodavci, prostorni planeri, lokalne vlasti i dr. U novije vreme prisutan je *proaktivan* pristup, koji podrazumeva da se rizik od poplava uvede u plansku dokumentaciju i standarde izgradnje objekata. Reč je o interdisciplinarnoj aktivnosti u kojoj osiguranje treba da utiče na donošenje odluka tamo gde se finansijski interesi prepliću sa zahtevima javne sigurnosti, privrednog razvoja i kvaliteta života stanovništva.

Istovremeno, osiguravajuće kompanije razvijaju svoje partikularne strategije, uvođeći strožiju selektivnost u prihvatanju rizika kroz nove stavke ugovora o polisama. Tu su suočene sa problemom kvaliteta informacija (digitalni modeli terena, procena šteta i njihova agregacija na širem području), koje se pribavljaju od specijalizovanih kompanija na komercijalnoj osnovi. Kako po pravilu ove kompanije nisu voljne da otkriju kako funkcionišu njihovi modeli i kolika je njihova pouzdanost, prognoze nužne za formiranje politike osiguranja su opterećene nepoznatim stepenom neizvesnosti.

6.5.4 Upravljanje rizikom od poplava

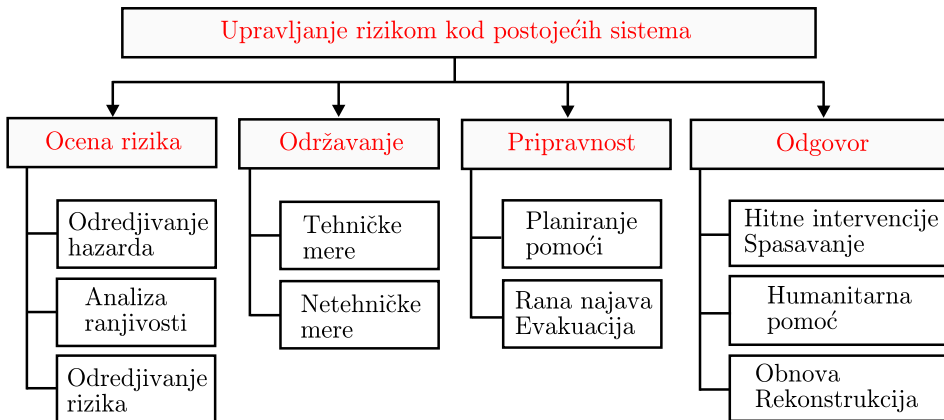
Termin „upravljanje rizikom” (engl. *flood risk management*) upućuje na proces smanjenja rizika usled prirodnih ili antropogenih uzroka poplava, kroz niz konkretnih mera. Prema [193], upravljanje rizikom obuhvata tri vrste aktivnosti neophodnih za: (i) efikasnu eksploataciju postojećih odbrambenih sistema; (ii) planiranje novih sistema ili rekonstrukcija postojećih sistema zbog izmenjenih uslova i (iii) projektovanje optimalnih tehničkih rešenja. Do sada, inženjeri su se uglavnom bavili tehničkim problemima (iii), koji se svode na izbor projektnog protoka i konstruktivnog rešenja koje će najbolje prihvatiti i amortizovati projektni protok.

Eksploatacija postojećih sistema. Upravljanje poplavama je dinamička kategorija. Promenama izazvanim globalnim prirodnim uticajima i ljudskom delatnošću, menja se i mogućnost postojećih sistema da odgovore na sadašnje i buduće zahteve, tako da je nužno planiranje njihove rekonstrukcije ili zamene novim sistemima. Na Slici 6.72 prikazane su upravljačke komponente kod postojećih sistema zaštite od poplava.

Upravljanje rizikom kod postojećih odbrambenih sistema sastoji se od aktivnosti koje treba da nepovoljne posledice plavljenja svedu na prihvatljivu meru [193]:

1. *Analiza rizika.* Funkcionalnost i unapređenje postojećeg sistema iziskuje stalno preispitivanje rizika zasnovano na *najnovijim* hidrološkim podacima, podacima o nameni površina i teorijskim saznanjima. To podrazumeva ažuriranje karti ugroženosti i šteta, na osnovu kojih se identifikuju slabe tačke odbrambenog sistema i definišu novi projektantski i izvođački zadaci.

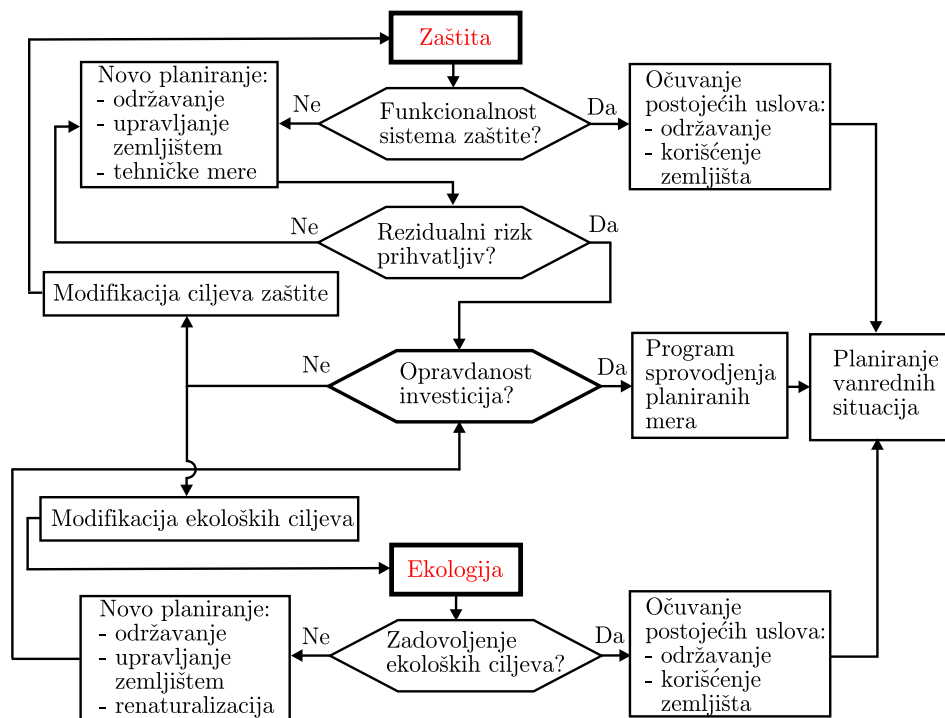
2. *Održavanje*. Podrazumeva se da je *sistematsko* održavanje preduslov funkcionalnosti odbrambenog sistema. Unapređenje zaštite od poplava može zahtevati i lokalne izmene u održavanju postojećeg sistema, ili u planiranju održavanja novog sistema.
3. *Pripravnost*. Radi se aktivnostima koje treba da pomognu u donošenju odluka kada dođe do sloma postojećeg sistema za odbranu od poplava. Nijedan sistem nije apsolutno siguran (niti je projektovan za sve verovatnoće plavnih događaja). Uvek postoji izvestan „*zaostali rizik*“, kao što je na primer, rizik od proboja postojećih nasipa. Zbog toga se projektuju i grade sistemi za rano upozorenje, čija je efikasnost zasnovana na aktivnostima pod 1.
4. *Odgovor*. Ova komponenta upravljačkog sistema obuhvata aktivnosti na pružanju pomoći stradalim od poplave i obnovi oštećenih stambenih i infrastrukturnih objekata.



Slika 6.72: Faze u upravljanju rizikom od poplava (prema [193]).

Bitan element upravljanja rizikom od poplava je *planiranje*. Danas je trend da zaštita od poplava i zaštita životne sredine budu od podjednako značaja, pa optimalni sistem zaštite treba da bude kompromis različitih zahteva. Radi se o postizanju ravnoteže između tehničkih uslova zaštite i ekoloških zahteva na nekom području. Da to nije jednostavno pokazuje shema na Slici 6.73.

Situaciju komplikuje činjenica da se donošenje odluka suočava sa nizom spoljašnjih uticaja, kao što su na primer: sukob interesa zainteresovanih učesnika, politička volja, finansijska ograničenja. U takvim okolnostima, može se desiti da nijedno planirano rešenje ne zadovolji sve zahteve. Tada je potrebna revizija ciljeva u skladu sa trenutnom realnošću, što može da redukuje određene ekološke zahteve, ili da odloži realizaciju nekih tehničkih zahvata.



Slika 6.73: Integralno projektno planiranje koje tretira sigurnost od poplava i ekologiju kao komplementarne ciljeve (prema [193]).

Važnu komponentu upravljanja rizikom od poplava predstavlja i kompleks mera za ublažavanje *posledica* plavljenja. Već je rečeno da je prvi korak u tom pravcu izrada karata ugroženosti, šteta i rizika. Ove karte treba izraditi za sve razmatrane varijante investicionih i neinvesticionih mera zaštite od poplava.

U praksi se to često svodi na iznalaženje tehničkog rešenja koje će kombinovati zaštitu urbanih i ruralnih područja, što podrazumeva da se u sklopu regulacije vodotoka projektuju ispusti kanalizacionih sistema, mostovski otvori i propusti sa propusnom moći većom od projektnog plavnog protoka. U optičaju mogu biti i mere lokalnog karaktera u vidu retenzija i rasteretnih kanala. Pored konstruktivnih mera, tu spadaju i mere u pravcu jačanja obnovljivosti sistema posle poplava.

Konvencionalni pristup za iznalaženje optimalnog tehničkog rešenja je analiza dobiti i troškova (engl. *benefit-cost*). Međutim, kada je reč o zaštiti od poplava, od ekonomski optimalnog rešenja se može odstupiti kada su ugroženi ljudski životi. Teorijski, prihvatljiv je onaj sistem zaštite od poplava kod koga je rizik od gubitka ljudskih života jednak drugim rizicima kojima su ljudi izloženi u svakodnevnom životu kada nema poplave [193].

Plan upravljanja poplavama. Osnovni cilj ovog planskog dokumenta je smanjenje šteta od poplava u kontekstu nacionalne ekonomije, pri čemu je kriterijum *neto dobit*¹¹ od:

- osvajanja novih (nekada plavnih) površina;
- povećanja proizvodnje u postojećim inundacijama i
- povećanja vrednosti lokacije nakon zaštite od plavljenja.

Plan upravljanja poplavama obuhvata:

1. aktivne mere koje deluju na smanjenje protoka/nivoa: akumulacije, retenzije, rasteretni kanali, pošumljavanje sliva;
2. pasivne mere koje sprečavaju nekontrolisano izlivanje: izgradnja nasipa;
3. pasivne mere koje deluju na povećanje propusne moći korita: regulacioni radovi i građevine;
4. mere za smanjenje postojeće ugroženosti od poplava: izmeštanje imovine, mere blagovremenog upozorenja;
5. mere za smanjenje budućeg nivoa ugroženosti od poplava: izbor namene zemljišta, eksproprijacija, planska dokumenta, propisi i standardi u oblasti izgradnje.

Prve tri kategorije mera su investicione, a poslednje dve, neinvesticione. Planom smanjenja šteta od poplava se najpre utvrđuje koje mere su potencijalno moguće na datom području, koji je njihov obim i kakvi su njihovi ekonomski efekti. Zatim se sprovodi analiza varijantnih tehničkih rešenja, uključujući njihovo kombinovanje. Na kraju se, primenom ekonomskih kriterijuma, potvrđuje optimalno rešenje. Ovo ukazuje na to da Plan predstavlja sveobuhvatni, sekvencijalni proces planiranja, projektovanja, izvođenja i eksploatacije sistema za odbranu od poplava. Napominje se da je planiranje vezano sa izradom *studija opravdanosti*, koje treba da potvrde funkcionalnost tehničkog rešenja, ispunjenost ekoloških zahteva i zadovoljenje interesa lokalne zajednice. Pri tome se, u cilju poređenja, analizira i tzv. „nulta varijanta” („ne raditi ništa”), koja podrazumeva postojeće prirodno stanje i odsustvo bilo kakvih odbrambenih mera. U konačnoj fazi izrade Plana rangiraju se varijantna rešenja po ekonomskim kriterijumima da bi se došlo do optimalnog rešenja koje ispunjava kriterijume izvodljivosti. Tada se Plan prosleđuje dalje na projektovanje i sprovođenje.

Projektovanje. Ova etapa podrazumeva izradu projektne dokumentacije za izabrano rešenje, kao i druge planske dokumentacije neophodne za izgradnju i eksploataciju odbrambenog sistema. Projektna dokumentacija se dovodi na nivo izvođačkih projekata, pri čemu su manje izmene (koje na zadiru u koncepciju rešenja) mogu naknadno vršiti u toku izgradnje ili eksploatacije sistema.

¹¹U Americi se za Plan upravljanja poplavama koristi skraćenica „NED” od eng. „*National Economic Development*” [240]. Neto dobit predstavlja razliku između ukupne dobiti i troškova projektovanja, izgradnje, eksploatacije i održavanja planom predviđenog odbrambenog sistema.

Izrada projekata zahteva povezivanje određenih elemenata u logičku i funkcionalnu celinu. Sadržaj i detaljnost projektne dokumentacije zavisi od nivoa projekta.

Niži nivo projektovanja

I. Definicija ciljeva projekta

1. Željeni stepen zaštite od poplava
2. Uticaj na životnu sredinu
 - 2.1 Kvalitet vode
 - 2.2 Biljne i životinjske vrste (naročito riblja populacija)
 - 2.3 Rekreacija
 - 2.4 Očuvanje istorijskih lokaliteta
 - 2.5 Očuvanje ambijenta

II. Mere za ostvarenje ciljeva projekta

1. Investicione (konstruktivne) mere
 - 1.1 Nasipi
 - 1.2 Akumulacije i/ili retenzije
 - 1.3 Rasteretni kanali
2. Neinvesticione (nekonstruktivne) mere
 - 2.1 Kartiranje plavnih površina
 - 2.2 Preliminarno određivanje potencijalne štete
 - 2.3 Preliminarno kartiranje rizika

III. Određivanje optimalnog rešenja

1. Kriterijumi za vrednovanje varijanti
2. Izbor optimalne varijante

Viši nivo projektovanja

IV. Razrada optimalnog rešenja zaštite od poplava

1. Prikupljanje podloga i podataka o postojećem stanju
 - 1.1 Slivno područje
 - 1.1.1 Topografija
 - 1.1.2 Geologija
 - 1.1.3 Produkcija nanosa
 - 1.1.4 Namena površina
 - 1.1.5 Hidrologija (krive trajanja, hidrogrami i dr.)
 - 1.2 Rečno korito sa inundacijama
 - 1.2.1 Geomorfologija
 - Geodetski snimljeni poprečni profili
 - Dužina hodova krivina
 - Geometrija meandera
 - Stabilnost obala
 - Karakteristike materijala iz korita i obala
 - Položaj stenovitih delova korita i obala

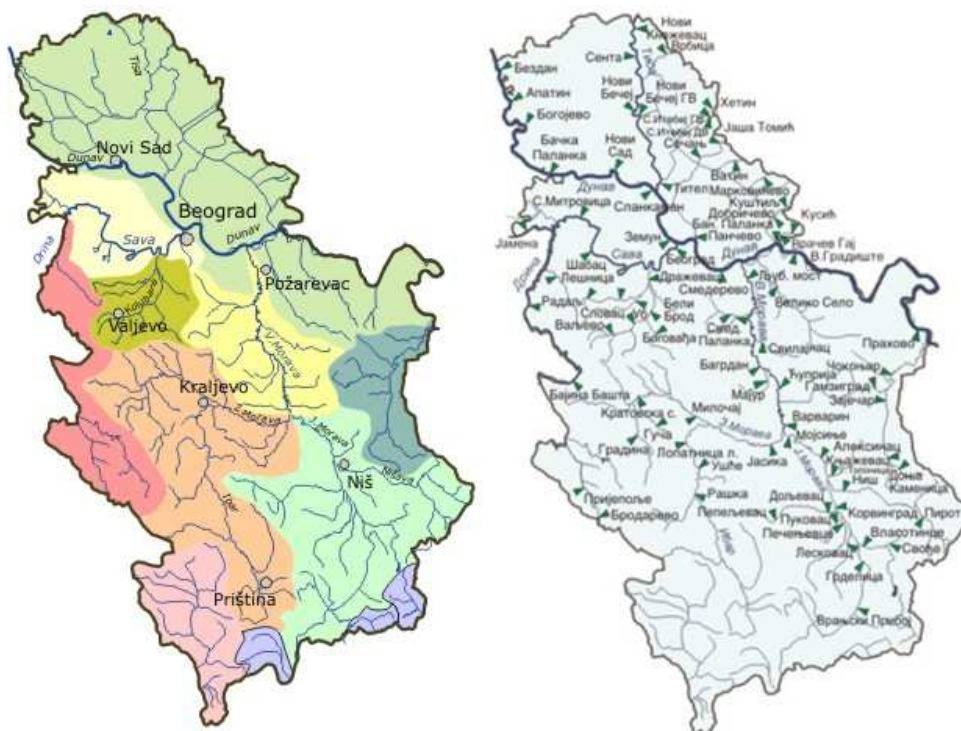
- 1.2.2 Rečna hidraulika
 - Zavisnost otpora od protoka
 - Kontrolni profili
 - 1.2.3 Podzemne vode
 - Hidrogeološki profil
 - Sezonske varijacije nivoa podzemnih voda
 - 1.2.4 Postojeći objekti
 - Tip i položaj
 - Konstruktivne karakteristike
 - Zabeležena lokalna deformacija korita
 - 1.2.5 Led
 - Prosečni datumi lodostaja i ledohoda
 - Debljina ledene kore
 - Kritična mesta nagomilavanja leda
 - 1.2.6 Ekologija
 - Vegetacija u priobalju
 - Kopneni ekološki sistemi
 - Vodeni (akvatični) ekološki sistemi
 - 1.2.7 Kvalitet vode
 - Fizički paramtri
 - Hemijski parametri
 - Biološki parametri
 - 1.2.8 Specifične lokacije (arheološke, rekreativne i dr.)
2. Projekat zaštite od poplava
- 2.1 Trasiranje regulisanog korita i nasipa
 - 2.2 Hidraulički proračuni
 - 2.2.1 Deonice u burnom režimu
 - 2.2.2 Deonice u mirnom režimu
 - 2.2.3 Dimenzionisanje minor korita
 - 2.2.4 Dimenzionisanje major korita
 - 2.2.5 Dimenzionisanje nasipa
 - 2.2.6 Dimenzionisanje objekata aktivne zaštite
 - 2.2.7 Stabilizacije mere (rečne građevine)
 - 2.2.8 Provera stabilnosti minor korita
 - 2.2.9 Hidrauličke mere ekološke zaštite
 - 2.3 Projekat održavanja sistema zaštite od poplava
 - 2.4 Predmer i predračun radova

Glava 7

Uređenje vodotoka u Srbiji

7.1 Pregled izvedenih regulacionih radova

U Srbiji je najveći obim regulacionih radova realizovan na velikim rekama Dunavu, Savi, Tisi i Velikoj Moravi (Slika 7.1). U Tabeli 7.1 dat je pregled regulacionih radova i objekata koji su realizovani do 2000. godine.



Slika 7.1: Slivovi velikih reka u Srbiji i položaj hidroloških mernih stanica [106].

Tabela 7.1: Pregled izvedenih građevina i radova u Srbiji do 2000. [256].

Slivno područje reka	Regulacione građevine (dužina, m)				
	Obaloutvrde	Naperi	PPG	Pregrade	Pragovi
Dunav	216 037	27 832	29 244	7 050	2 144
Sava	56 894	400	7 847	1 949	36
V. Morava	213 275	4 186	68 680	5 923	4 407
Ukupno:	486 206	32 418	105 771	14 922	6 587
	Regulacioni radovi (m)				
	Prosecanje krivina	Uređenje korita			
Dunav	48 000	57 030			
Sava	22 360	134 837			
V. Morava	59 749	226 390			
Ukupno:	130 109	418 257			

Dunav. Planska regulacija započeta je još krajem XIX veka, sa ciljem obezbeđenja plovnog puta i zaštite obala od erozije. Radovi, koji su obuhvatali prosecanje krivina, pregrađivanje rukavaca, izgradnju obaloutvrda i napera, naročito su intenzivirani posle II svetskog rata, u skladu sa Međunarodnom konvencijom o režimu plovidbe na Dunavu i Generalnim planom Dunavske komisije koja je nadležna za ovaj međunarodni plovni put najvišeg ranga. Ovim radovima su na našem sektoru Dunava obezbeđene najmanje vrednosti plovne dubine 2,5 m, širine plovnog puta 180 m i poluprečnika krivine 800 m, što u većem delu godine omogućava plovidbu brodovima nosivosti do 1000 t. Nizvodno od Beograda, potreba za klasičnim regulacionim radovima je prestala izgradnjom Hidroenergetskog i plovidbenog sistema „Đerdap I” i „Đerdap II” 1972. godine. Na ovom sektoru Dunava, regulacione građevine se danas uglavnom sastoje od nasipa i obaloutvrda, koje štite obale od erozionog dejstva talasa izazvanih vetrom i dnevnih oscilacija nivoa vode izazvanih radom hidroelektrana.

Sava. Prvi regulacioni radovi obavljani su kod Sremske Mitrovice i na ušću Drine. Sistematska regulacija Save obavljena je samo u Beogradu – od ušća do Makiša, u sklopu izgradnje Novog Beograda i rekreacionog centra na Adi Ciganliji. Na drugim sektorima, uređenje Save je do sada imalo lokalni karakter i svodilo se na rešavanje problema zaštite obala u zonama naselja i savladavanje kritičnih deonica za plovidbu. Od pritoka Save, regulisana je Kolubara proširenjem i produbljenjem korita, a u zoni Beograda regulisane su Topčiderska i Železnička reka.

Tisa i vodotoci u Vojvodini. Veliki obim regulacionih radova na Tisi i manjim vodotocima u Banatu (Begeju, Zlatici, Brzavi, Moravici) i Bačkoj (Krivaji, Kerešu, Čiku) započet je još u XVIII i XIX veku. Do kraja 1875. godine, dužina Tise je skraćena za oko 450 km prosecanjem 110 krivina, od čega je u Vojvodini 13 proseka ukupne dužine 29 km. U kasnijem periodu, na Tisi su građene obaloutvrde, naperi i paralelne građevine, a posle poplave 1970. godine, obavljeno je ojačanje nasipa.

Posle izgradnje brane kod Novog Bečeja (1978), na uzvodnom sektoru Tise došlo je potpuno ili delimično potapanje regulacionih objekata u koritu.

Velika Morava i pritoke. Sistematski regulacioni radovi na Velikoj Moravi, započeti još 1950. godine, obuhvatili su prosecanja 16 krivina, čime je dužina korita skraćena preko 20%. Izveden je i veliki broj raznih vrsta građevina u koritu. Regulisani su kraći potezi više pritoka Velike Morave (Resave, Ralje, Jasenice, Rače, Lepenice, Belice, Lugomira). Najveći obim regulacionih radova na Zapadnoj Moravi i njenim najvećim pritokama (Rasini, Čemernici, Despotovici, Đetinji, Skrapežu) rađen je u periodu 1965-1969, uglavnom u cilju zaštite od poplava. Na Južnoj Moravi je samo uzvodno od Stalaća izvršena klasična regulacija sa prosecanjem krivina i osiguranjem korita, dok je na ostalim deonicama izvedena samo lokalna zaštita obala, mostova i ušća pritoka, posebno u Grdeličkoj klisuri. Sa izuzetkom Sitnice, lokalni karakter imaju i regulacioni radovi na Ibru i njegovim pritokama.

Ostali vodotoci. Sistematski regulacioni radovi su izvedeni samo na Mlavi, dok su na Peku, bujičnim vodotocima u Beogradu (Gročici, Bolečici), Timoku i njegovim pritokama, intervencije bile lokalnog karaktera. Na Drini je izvedeno samo lokalno osiguranje obala u zoni naselja, a značajna je delimična regulacija njene pritoke Jadra, koja je poznata po čestim poplavama.

Radovi na zaštiti od poplava. U Srbiji se velike poplave dešavaju relativno često – u priobaljima Dunava (1965, 1981, 2006), Save (1974, 1981), Tise i Tamiša (1999, 2000, 2001, 2006), Morave (1965, 1977, 2002, 2006), Kolubare (1999, 2001). Poplava iz 2014. godine svrstava se u kategoriju katastrofalnih poplava.

U Srbiji je poplavama ugroženo oko 2 miliona ha, najviše u Vojvodini, 1,3 milion ha (60% površine pokrajine). Blizu 80% plavnih površina čini poljoprivredno zemljište, ali je ugroženo i 500 gradova (Novi Sad, Zrenjanin, Pančevo, Bačka Palanka, Bečej i Novi Bečej, Apatin, Kovin, Senta, Titel) i naselja, oko 680 km pruga i oko 4000 km puteva.

U zaštiti ugroženih gradova i infrastrukture najviše su zastupljene pasivne mere zaštite pomoću nasipa. U slivu Dunava ukupna dužina izgrađenih nasipa iznosi oko 1600 km, u slivu Save oko 770 km, a u slivu Morave oko 1180 km, što daje ukupnu dužinu nasipa od 3550 km. Nasipi na Dunavu i na Tisi imaju stepen zaštite na 100-godišnju veliku vodu i rekonstruisani su posle katastrofalnih poplava 1965. i 1970. godine. Na ostalim vodotocima u Vojvodini, nasipi su deo hidrosistema Dunav-Tisa-Dunav (DTD), tako da zajedno sa veštaškim kanalima, čine jedinstven sistem u odbrani od poplava.

Odbrambene linije nasipa na desnim pritokama Dunava (Timok, Mlava, Pek) štite od poplava povratnog perioda 50 godina. Nasipi na Savi i na Velikoj Moravi su neravnomerni po stepenu izgrađenosti. Na Zapadnoj Moravi se nasipima uspešno štite od poplava gradovi Čačak, Kruševac i Trstenik, dok nasipi duž Južne Morave

uglavnom štite poljoprivredno zemljište i seoska naselja. Pored hidrosistema DTD, važnu ulogu u aktivnoj zaštiti od poplava u Srbiji ima i jedan broj akumulacija, kao što su Barje (Leskovac), Čelije (Kruševac, naselja u dolini Rasine) i dr.

Posle katastrofalne poplave maja 2014. godine, regulacija reka u Srbiji je usmerena u pravcu smanjenja rizika od ekstremno velikih voda putem mnoštva čeonih i bočnih retenzija. U toku je revizija stepena zaštite svih postojećih nasipa i po potrebi, projektovanje njihove rekonstrukcije i dogradnje.

7.2 Veliki hidrotehnički sistemi

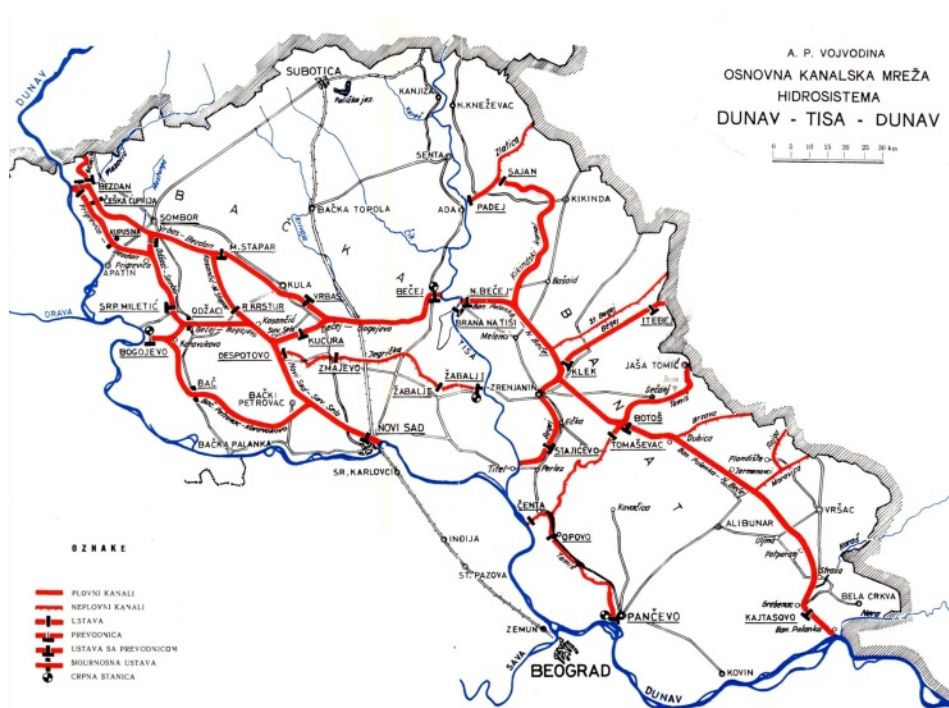
Srpsko gradjevinarstvo može biti ponosno na svoja dva kapitalna (i u evropskim razmerama značajna) hidrotehnička sistema: „Dunav-Tisa-Dunav” (DTD) i Hidroenergetski i plovidbeni sistem (HEPS) „Đerdap I” i „Đerdap II”, u čijoj realizaciji je regulacija reka imala veoma važnu ulogu. Ovi sistemi su naročito važni zbog zaštite od poplava.

Sistem „Dunav-Tisa-Dunav” (DTD). Ovaj hidrosistem se nalazi na području Bačke i Banata, kroz koje protiču velike reke – Dunav i Tisa, ali i niz manjih banatskih vodotoka: Zlatica, Stari i Plovni Begej, Tamiš, Brzava, Moravica, Rojga, Vršački Kanal, Karaš i Nera, koji odvođe vode iz područja zapadnih Karpata u Tisu i Dunav.

Sistem DTD se sastoji od kanalske mreže ukupne dužine od oko 930 km, sa 29 ustava i 6 crpnih stanica pomoću kojih se upravlja vodnim režimom (nivoima i protocima), u zavisnosti od hidroloških uslova. Vodni režim na datom području je takav da se u zimskom i proletnjem periodu javlja višak vode i potreba za odvodnjavanjem, a u periodu juli–septembar, manjak vode i potreba za navodnjavanjem. Ovaj problem je uočen davno, a uređenje voda u Vojvodini započeto je još pre 150 godina. Rad na projektovanju sistema DTD intenziviran je posle Drugog svetskog rata, a glavni radovi su trajali oko 20 godina (1957–1977). Prokopavanjem kanala DTD kroz Potporanjsku vododelnicu 1979. godine i završetkom deonice kanala Begej-Tamiš 1981. godine, postignuta je puna funkcionalnost celog hidrosistema [162].

Zadaci sistema DTD su: (i) zaštita od poplava; (ii) odvođenje suvišnih voda sa poljoprivrednih i urbanih površina u Dunav i Tisu; (iii) dovođenje vode iz Dunava i Tise za potrebe navodnjavanja; (iv) vodosnabdevanje (naselja, industrija, ribnjaci); (v) prijem i evakuacija otpadnih voda; (vi) plovidba; (vii) obezbeđenje protočnosti kanalske mreže u cilju poboljšanja kvaliteta vode i (viii) prateće delatnosti (ribarstvo, turizam, rekreacija).

Upravljački koncept sistema DTD zasniva se na povezivanju regulisanih prirodnih vodotoka sa kanalskom mrežom, da bi se putem ustava i crpnih stanica efikasno regulisao vodni režim. Bački deo sistema čini mreža kanala između Dunava i Tise, sa zahvatanjem vode iz Dunava na njegovom uzvodnom delu, a ispuštanjem vode



Slika 7.2: Mreža kanala sistema DTD sa upravljačkim objektima [172].

u Tisu i u Dunav na njegovom nizvodnom delu (Slika 7.2). U periodima povodnja, vodozahvati se zatvaraju, a vodoispusti otvaraju, tako da se suvišna voda iz kanala odvodi u Tisu i Dunav. U sušnim periodima, proces je obrnut – vodozahvati se otvaraju i voda se iz Dunava upušta u mrežu kanala. Moguće su razne kombinacije upuštanja i ispuštanja voda. Vodozahvati i vodoispusti su gravitacioni ili u vidu crpnih stanica (Slika 7.3).

Bački deo sistema sastoji se od magistralnog kanala koji se završava ulivom u Dunav kod Banatske Palanke (Slike 7.2 i 7.4). Ovaj kanal preseca sve banatske vodotoke i omogućava raspodelu protoka u zavisnosti od trenutnog hidrološkog stanja u ovim vodotocima i u njihovim recipijentima – Dunavu i Tisi. U periodima velikih voda banatskih vodotoka, koji po pravilu prethode povodnjima Tise u Dunava, sve ustave su otvorene i višak vode završava u Dunavu. Sa zalaskom povodnja na banatskim vodotocima, a pri nailasku velikih voda Tise, sukcesivno se zatvaraju ustave na Tisi kod Padeja, Novog Bečeja i Stajićevo, tako da se sve vode severnog i srednjeg Banata evakuišu preko Tamiša (Slika 7.2).

Snabdevanje vodom banatskog dela sistema DTD obezbeđeno je izgradnjom brane na Tisi (Slika 7.5), neposredno nizvodno od početka magistralnog kanala, sa ciljem usporavanja Tise do kote koja je potrebna da bi se voda mogla gravitaciono upuštati u magistralni kanal i dalje u banatski deo hidrosistema.



Slika 7.3: *Ustava Kajtasovo* [162].



Slika 7.4: *Magistralni kanal Novi Bečej – Banatska Palanka* [162].



Slika 7.5: *Brana na Tisi kod Novog Bečeja.*

Sistem ustava Pančevo–Opovo–Čenta na donjem Tamišu štiti ovo područje od uspora HE „Đerdap I” i unapređuje upravljanje vodnim režimom celog Banata. U Tabeli 7.2 dat je broj objekata u sistemu DTD.

Tabela 7.2: *Objekti u sistemu DTD [162].*

Deo sistema DTD	Ustave	Prevodnice	Crpne stanice
bački	16	9	5
banatski	13	7	1
ukupno	29	16	6

Tabela 7.3: *Vodoprivredni efekti sistema DTD [162].*

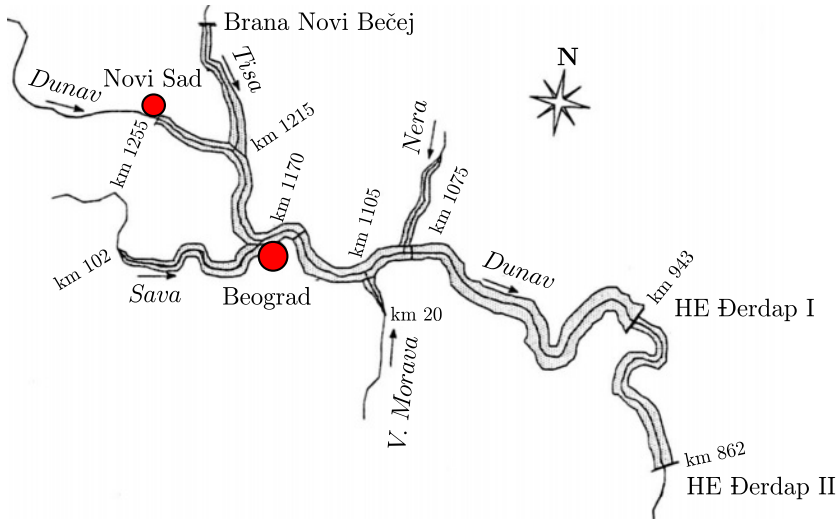
Obrana od poplava	Odvodnjavanje [ha]	Navodnjavanje	Plovidba [km] za plovila nosivosti		
			< 1000 t	< 500 t	< 200 t
1 290 000	1 076 000	510 000	377	3804	20

Imajući u vidu da je u Vojvodini poplavama potencijalno ugroženo oko 1,3 miliona ha, kao i brojna naselja, industrija i infrastruktura, značaj sistema DTD u zaštiti od plavljenja je ogroman. Skratio je dužinu odbrambenih linija u Bačkoj (ne računajući Dunav i Tisu) sa 156 km na 42 km, a u Banatu, sa 502 km na 446 km [162]. Trajanje odbrane od poplava je takođe značajno skraćeno. Evidentni su i drugi pozitivni vodoprivredni efekti sistema DTD (Tabela 7.3).

Sa ove istorijske distance, može se konstatovati da je sistem DTD u potpunosti ostvario sve projektom postavljene ciljeve u zaštiti od poplava, odvodnjavanju i snabdevanju vodom i da se njegova izgradnja višestruko isplatila. Nisu ostvareni stepen navodnjavanja poljoprivrednih površina i plovidbeni robni promet. Razlozi za to nisu tehničke, već finansijske prirode. Planira se i korišćenje hidroenergetskog potencijala kanalske mreže.

Hidroenergetski i plovidbeni sistem (HEPS) „Đerdap I-II”. Akumulacija HE „Đerdap I” formirana je na složenom rečnom sistemu koji čine Dunav i njegove pritoke. Površina sliva Dunava do profila brane je 577000 km². Na potezu akumulacije u Dunav se ulivaju reke Tisa (površina sliva 157200 km²), Sava (96400 km²) i Velika Morava (37400 km²), kao i nekoliko manjih pritoka čije su površine sliva manje od 2000 km². Značajna karakterisitka akumulacije je promenljiva veličina uspora, dužina prostiranja uspora i zapremina, u funkciji protoka i režima rada hidroelektrane. Pri velikim vodama, uspor na prifilu brane je oko 19 m i isključava do ušća Nere (km 1075). Pri malim vodama formira se uspor od 33 m na prifilu brane, a akumulacija ima dužinu od 310 km na Dunavu, 100 km na Savi i oko 60 km na Tisi (Slika 7.6). Prosečna zapremina akumulacije iznosi oko $3,5 \times 10^9$ m³.

Hidroelektarna „Đerdap I” radi kao protočna i vršna. Akumulacija ima mogućnost dnevnog, delimično i sedmičnog izravnjanja protoka. Time je omogućen varijabilni režim rada hidroelektrane, poboljšan je izgradnjom nizvodne stepenice – akumulacije HE „Đerdap II” na km 862 Dunava (završena 1985. godine).



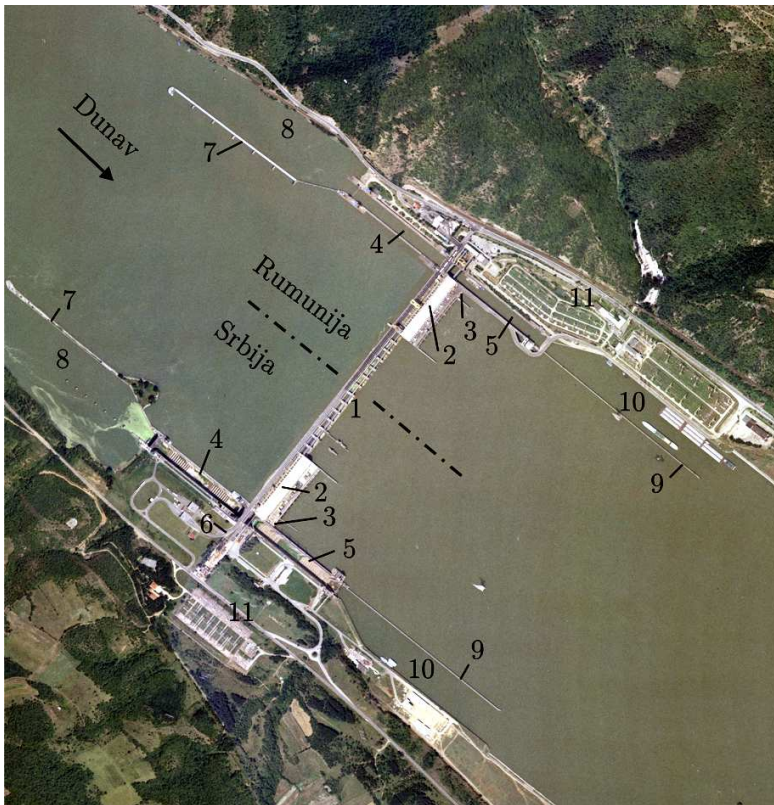
Slika 7.6: Shematski prikaz đerdapske akumulacije.

Karakteristike priobalnog terena bile su osnovni faktor pri utvrđivanju režima nivoa voda u akumulaciji „Đerdap I”. Naime, nizvodni deo akumulacije na Dunavu je u klisuri, tako da uspor nema uticaja na priobalje (osim na pojedinim lokalitetima), dok je uzvodni deo, kroz Vojvodinu, ograničen nasipima. Zbog karakteristika priobalja i položaja državne granice, merodavan za projektovanje i održavanje režima nivoa u akumulacije je profil kod ušća Nere (km 1075), dok se režim rada hidroelektrane prilagođava propisanoj koti nivoa u ovom profilu.

Neki od nepovoljnih efekata akumulacije na uslove odbrane od poplava (izmenjeni uslovi u predterenu nasipa, produženo naleganje visokih voda na oblogu, telo i podlogu nasipa, izdizanje nivoa podzemnih voda i produženo trajanje odbrane od poplava, učestalije pojave lokalnih nestabilnosti i povećani rizik od proboja nasipa) su u fazi projektovanja i izgradnje HEPS delimično ili potpuno otklonjeni.

U tu svrhu je izvedeno ili rekonstruisano preko 400 km odbrambenih nasipa, oko 30 km obaloutvrda, kao i drenažni sistemi na oko 110000 ha površine. S obzirom na složenost uticaja uspora na priobalje, uspostavljeno je sistematsko praćenje i obavljena je analiza ovih pojava, kao bi se omogućilo blagovremeno preduzimanje mera za otklanjanje negativnih efekata.

Glavni objekat, koji se nalazi na km 943 Dunava, je simetričan, sa prelivnom branom u sredini korita i po jednom elektranom, prevodnicom i neprelivnom branom sa svake strane (Slika 7.7). Ukupna dužina brane je 1278 m, od čega prelivni deo brane iznosi 441 m. Brana je gravitaciona, betonska, sa 14 prelivnih polja širine po 25 m. Prelivni deo brane obezbeđuje regulisanje nivoa gornje vode, kao i evakuaciju velikih voda i leda. Nivo gornje vode na brani zavisi od protoka Dunava i kreće se između kota na ušću Nere u Dunav 63,00 mnm (pri $Q > 13100 \text{ m}^3/\text{s}$) i 69,50 mnm



Slika 7.7: Brana „Đerdap I” i prateći objekti: 1 - prelivna polja (ukupno 14); 2 - mašinske zgrade sa po 6 agregata; 3 - temeljni ispusti; 4 - uzvodne komore brodskih prevodnica; 5 - nizvodne komore brodskih prevodnica; 6 - nasuta brana na obali, van rečnog korita; 7 - uzvodne usmeravajuće građevine; 8 - uzvodni prilazni kanali za brodove; 9 - nizvodne usmeravajuće građevine; 10 - nizvodni prilazni kanali za brodove; 11 - postrojenja za razvod električne energije [188].



Slika 7.8: Prelivna polja sa ustavama na brani „Đerdap I”

(pri $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$). Evakuacija velikih voda preko prelivnih polja vrši se po pravilu sa kotom gornje vode 63,00 mmm, spuštanjem gornjih sekcija zatvarača, podizanjem donjih sekcija zatvarača ili potpunim podizanjem celog zatvarača, zaviso od protoka koji treba evakuisati. Preko prelivnih polja se može propustiti protok 100-god. velike vode od $15400 \text{ m}^3/\text{s}$ (Slika 7.8). Protok od $19300 \text{ m}^3/\text{s}$, sa verovatnoćom pojave bar jednom u 1000 godina, evakuiše se preko 12 prelivnih polja i kroz 10 turbina (pretpostavlja se pri tome da su dva zatvarača na prelivnim poljima i dve turbine i obe prevodnice u remontu ili kvaru i da ne mogu propuštati vodu). Protok od $22300 \text{ m}^3/\text{s}$, sa verovatnoćom pojave bar jednom u 10000 godina, evakuiše se preko 14 prelivnih polja, kroz 11 turbina i jednu prevodnicu. Temeljni ispusti predstavljaju rezervu za evakuaciju katastrofalnih protoka.

Pitanja odbrane od velikih voda i leda su, pored svih ostalih značajnih pitanja vezanih za eksploataciju sistema, definisani u Konvenciji o eksploataciji i održavanju Hidroenergetskih i plovidbenih sistema „Đerdap I” i „Đerdap II”, koju su potpisale nekadašnja Jugoslavija i Rumunija. U cilju koordiniranih akcija u odbrani od poplava i leda, pomenute zemlje su formirale zajednički štab za zaštitu od poplava i leda i utvrdile generalni plan i način odbrane od polave i leda.

Konvencijom je predviđeno da se, u slučaju prognoze nailaska velikih voda, blagovremeno snize nivoi akumulacija. Predviđeno je koordinirano i podjednako pražnjenje akumulacija preko prelivnih brana i kroz hidroagregate, u skladu sa dnevnim planovima i generalnim planom odbrane. Štete u priobalju snosi ona strana koja nije ispoštovala dogovoreni plan evakuacije velikih voda. Na Slikama 7.9 i 7.10 prikazana je dispozicija HE „Đerdap II” sa pratećim objektima.

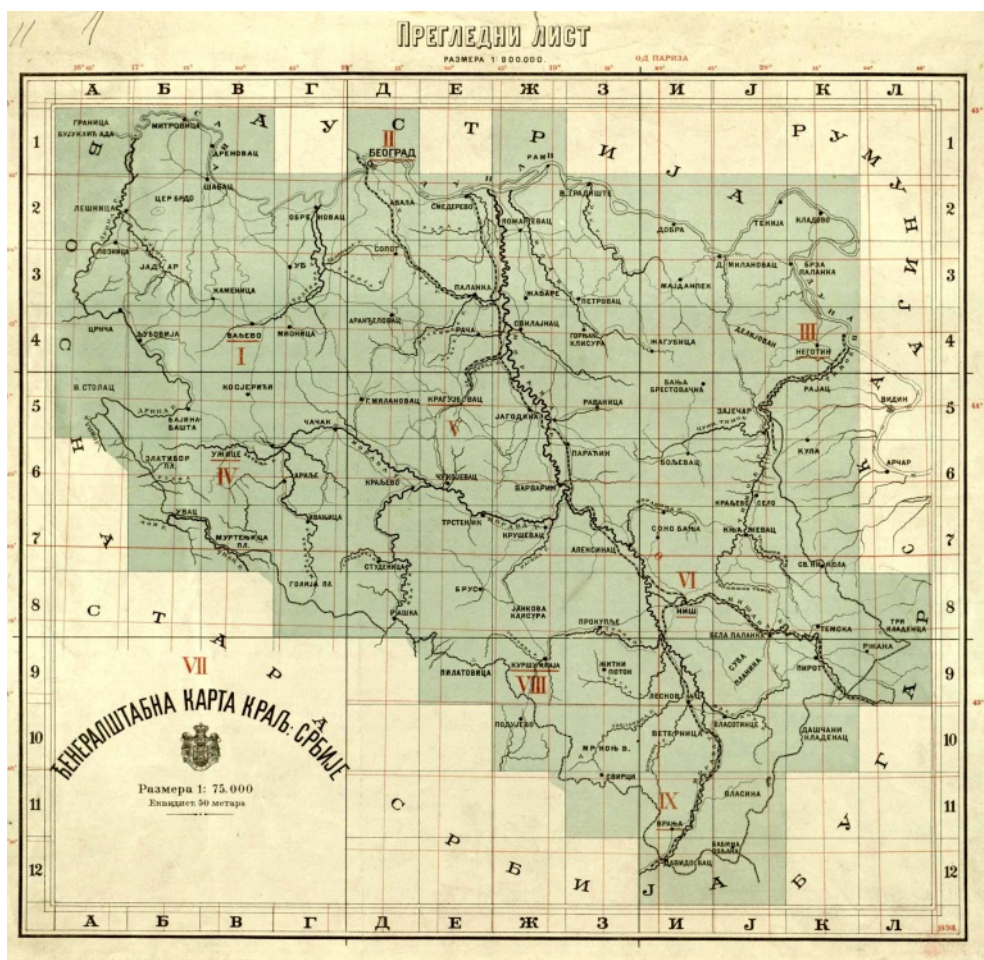


Slika 7.9: Hidrosistem „Đerdap II”: 1 – akumulacija; 2 – srpska elektrana; 3 – prelivna brana; 4 – neprelivna nasuta brana; 5 – srpska prevodnica; 6, 7 – neuklonjeni ostaci zagata; 8 – usmeravajuća građevina; 9 – prilazni kanal [188].

Sprečavanje štetnih posledica nagomilavanja leda u akumulacijama se vrši variranjem nivoa gornje vode na branama sistema, kada to može da doprinese razbijanju i evakuaciji leda ili intervencijama ledolomaca radi sprečavanja formiranja ledinih barijera. Zajednički štab za odbranu od leda donosi na osnovu generalnog plana, dnevne programe odbrane u kojima se bliže određuju zone dejstva rada ledolomaca, zavisno od stanja leda u akumulacijama. Predviđeno je da srpska strana interveniše ledolomcima na sektorima akumulacije HE „Đerdap I” uzvodno od ušća Nere, a rumuska, između HE „Đerdap I” i ušća Nere.



Slika 7.10: Brana „Đerdap II” sa pratećim objektima: 1 – srpska hidroelektrana; 2 – rumunska hidroelektrana; 3 – srpska prelivna brana (rumunska prelivna brana nalazi se na uzvodnom kraju rukavca Gogošu); 4 – neprelivna nasuta brana; 5 – srpska prevodnica; 6 – dodatna elektrana; 7 i 8 – velika i mala rumunska prevodnica; 9 – most; 10 i 11 – zaštitni nasipi; 12 – usmeravajuće građevine; 13 – prilazni kanali za brodove [188].



Iz arhive: Prikaz reka u Srbiji iz 1896. godine.

Bibliografija

- [1] Agostini, R., Bizzarri, A., Masetti, M., *Ouvrages flexibles pour les tronçons torrentiels et fluviaux*, Officine Maccaferri S.P.A., Bologna, 1982.
- [2] Agostini, R., Papetti, A., *Revêtements souples en matière de canaux et de curs d'eau canalisés*, Officine Maccaferri S.p.A., Bologna, 1982.
- [3] Agroskin i dr. *Hidraulika*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [4] Ang, A.H., Tang, W.H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*, Wiley & Sons, New York.
- [5] Arcement, G.J., Schneider, V.R., *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*, USGS, Paper 2339, 1989.
- [6] Armanini, A., Scotton, P., *Criteri di dimensionamento e di verifica delle stabilizzazioni di alveo e di sponda con massi sciolti e massi legati*, Univerzitet u Trentu, IDR 1/1995.
- [7] Apmann, R. P., Blineo, R. H. *Experiences with bed sills in stream stabilization*, Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 95, No. WW3, Aug. 1969.
- [8] Ashley, R. et al (ed.), *Advances in Urban Flood Management*, Taylor & Francis, Balkema, London, 2007.
- [9] Azinfar, H., Kells, J., *Flow resistance due to a single spur dike in an open channel*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 47, No 6, 2009.
- [10] Azinfar, H., Kells, J., *Drag force and associated backwater effect due to an open channel spur dike field*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 49, No 2, 2011.
- [11] Babić Mladenović, M., *Uređenje vodotoka*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2018.
- [12] Babić-Mladenović, M., Jovanović, M., Knežević, Z., *The Integrated Flood Management - The Karas River Case Study*, 3rd European Conference on River Restoration, Zagreb, 2004.
- [13] Baker, A.J. (1985) *Finite Element Computational Fluid Dynamics*, McGraw-Hill, New York.
- [14] Bedient, Ph.B., Huber, W.C., *Hydrology and Floodplain Analysis*, Addison-Wesley, New York, 1988.
- [15] Beltaos, S., *River Ice Jams: Theory, Case Studies, and Applications*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 10 (+ Discussion by Gerard, R.), 1983.
- [16] Benedict, S.T. *Evaluation of Abutment-Scour Equations from NCHRP Projects 24-15(2) and 24-20 Using Laboratory and Field Data*, Technical Report, NCHRP 24-20(2), Transportation Research Board, 2015.

- [17] Boc, S.J., Resio, D.T., Burg, E.C., *New techniques for the rapid repair of levee breaches*, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 133, 2010.
- [18] Briaud et al. *Realtime monitoring of bridge scour using remote Monitoring technology*, Texas Department of Transportation, Austin, 2010.
- [19] Bridge Scour Manual, Supplement to Austroads Guide to Bridge Technology, Part 8, Chapter 5: Bridge Scour (2018), 2019.
- [20] Bridge Scour Manual, Florida Department of Transportation, 2010.
- [21] Büchele, B., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A., Ihringer, J., Oberle, P., Merz, B., Nestmann, F., *Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 2006.
- [22] Bureau of Public Roads, *Hydraulics of Bridge Waterways*, U.S. Dept. of Commerce, Washington, 1960.
- [23] Carstensen, D., *Ice conditions and ice forces*, Ghinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Darmstadt, 2008.
- [24] Castilo Rodriguez, J.T., *The use of pile groynes to reduce sediment exchange between river and harbour*, MSc Thesis, TU Delft, 2008.
- [25] Celik, I., Rodi, W. (1988) *Modelling Suspended Sediment Transport in Non-Equilibrium Situations*, Journal of Hydraulic Eng. Vol. 114, No. 10.
- [26] Chang, H.H., *Fluvial Processes in River Engineering*, John Wiley & Sons, 1988.
- [27] Chang, H.H., Osmolski, Z., *Fluvial design of river bank protection*, Hydrossoft, Computational Mechanics Publications, Vol. 1, No. 2, 1988.
- [28] Chanson, H., *The Hydraulics of Open Channel Flow - An Introduction*, Arnold, London, 1999.
- [29] Chanson, H., Toombes, L. (2003) *Strong Interactions between Free-Surface Aeration and Turbulence in an Open Channel Flow*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, No. 5.
- [30] Chiew, Yee-Meng, *Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 9, 1995.
- [31] Chow, V.T., *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, International Student Edition, Tokyo, 1959.
- [32] Chung, T.J., *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 2002.
- [33] CIRIA, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, US Army Corps of Engineers, *The International Levee Handbook*, CIRIA C731, London, 2013.
- [34] Clarke, R.T. (1973). *Mathematical models in hydrology*, Irrigation and Drainage Paper 19, FAO, Rome.

- [35] Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A., *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman, 1980.
- [36] Dokumentacija opština u slivu reke Kolubare, pogođenih poplavom 2014. godine.
- [37] Doll, B.A. et al, *Stream Restoration - A natural Channel Design Handbook*, North Carolina Stream Restoration Institute, NC State University, 2016.
- [38] Đorđević, B., Dašić, T., *Ekologija vodoprivrednih sistema*, Građevinski fakultet Beograd, 2018.
- [39] Đorđević, D., *Prostorno tečenje na rečnim ušćima (uticajni činioci)*, Zadužbina Andrejević i Građevinski fakultet, Beograd, 2013.
- [40] Engineering in the Water Environment - Good Practice Guide, Intakes and outfalls, SEPA, 2019.
- [41] Engineering in the Water Environment - Good Practice Guide, Sediment Management, SEPA, 2010.
- [42] Escarameia, M., *River and channel revetments - A design manual*, Thomas Telford, 1998.
- [43] Farraday, R.V., Charlton, F.G., *Hydraulic factors in bridge design*, Hydraulics Research, Wallingford, 1983.
- [44] Farrance, I., Frenkel, R., *Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships*, The clinical Biochemist Reviews, PMC3387884, 33(2), 2012.
- [45] Federal Highway Administration, *Design of Riprap Revetment*, Publication No., FHWA-IP-89-016, 1989.
- [46] Federal Highway Administration, *Geosynthetic Design and Construction Guidelines*, FHWA-HI-95-028, 1998.
- [47] Federal Highway Administration, *Pier Scour in Clear-Water Conditions with Non-Uniform Bed Materials*, FHWA-HRT-12-022, 2012.
- [48] Federal Highway Administration, *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*, FHWA-NHI-060086, 2006.
- [49] Fotodokumentacija Direkcije za vodne puteve – Plovput Beograd.
- [50] Fotodokumentacija Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi”.
- [51] Fotodokumentacija JP HE Đerdap.
- [52] Franco, J.J., McKeller, C.D.Jr. *Navigation Conditions at Confluence of Arkansas, Verdigris, and Grand Rivers*, Technical Report H-73-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Hydraulics Laboratory, Vicksburg, 1973.

- [53] Froehlich, D., C., Benson, C., A., *Sizing Dumped Rock Riprap*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 7, July, 1996.
- [54] Froehlich, D.C., *Armor-Limiter Clear-Water Contraction Scour at Bridges*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 6, June, 1995.
- [55] Garde, R.J., Ranga Raju, K.G., *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, Wiley Eastern, 1977.
- [56] Generalni projekat unapređenja zaštite Sremske i Mačvanske Mitrovice od velikih voda Save, Hidrozavod DTD i Građevinski fakultet Beograd, Novi Sad, 2016.
- [57] Geo Studio 2018 R2, GEO-SLOPE International Ltd., 2015.
- [58] Ghani, A., Mohammadour, R., *Temporal variation of clear-water scour at compound abutments*, Ain Shams Engineering Journal, No. 7, 1045-1052, 2016.
- [59] Gill, M.A., *Erosion of sand beds around spur dikes*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 98(HY9), 1972.
- [60] Gjurović, M., *Regulacija reka*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- [61] Goldman, S.J., Jackson, K., Bursztynsky, T.A., *Erosion & Sediment Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [62] Graf, W.H., *Hydraulics of Sediement Transport*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 1984.
- [63] Grupa autora, *Izbor oblika riblje staze s vertikalnim otvorima na temelju primjene ABM modela*, Građevinar, 2021.
- [64] Grupa autora, *Studija unapređenja zaštite od voda u slivu reke Kolubare*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 2015.
- [65] Grupa autora, *I. faza regulacije reke Peštan i kontrole oticanja poplavnih voda*, Glavni projekat, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 2013.
- [66] Grupa autora, *Studija i Plan zaštite od poplava teritorije jedinice lokalne samouprave grada Čačka*, Ehting i Graevinski fakultet, Beograd, 2012.
- [67] Grupa autora, *Izveštaj o hidrauličkim modelskim ispitivanjima zaštite stubova S41 i S41' mosta na Dunavu kod Beške*, Glavni projekat osiguranja od erozije rečnog dna i priobalja u zoni mosta i temelja postojećeg i novog mosta - stubovi S41, S42, S43, Knjiga 8, Sveska 8.5, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 2009.
- [68] Grupa autora, *Glavni projekat sanacije mosta preko Dunava kod Beške*, Institut IMS, Beograd, 2005.
- [69] Grupa autora, *Zaštita od poplava u Srbiji*, Monografija, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 1998.

- [70] Grupa autora, *Dopunske hidrauličke analize varijantnih rešenja uređenja minor i major korita reke Tise za velike vode na potezu od brane kod Novog Bečeja (km 61+400) do državne granice km 160+980)* – Studija II, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, 1983.
- [71] Grupa autora *Istražni radovi na Dunavu na sektoru Apatin, km 1405 – km 1400*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 1980.
- [72] Grupa autora *Erozija, bujični tokovi i rečni nanos*, Jugoslovenski komitet za međunarodnu hidrološku deceniju, Beograd, 1970.
- [73] Grupa autora *Dunav i Sava kod Beograda - Hidrotehnički problemi i hidraulička proučavanja*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 1963.
- [74] Hajdin, G., *Mehanika fluida – knjiga prva: Osnove*, Građevinski fakultet, Beograd, 2001.
- [75] Hajdin, G., *Mehanika fluida – knjiga druga: Uvođenje u hidrauliku*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [76] Hajdin, G., *Mehanika fluida – knjiga treća: Dodatna poglavlja*, Građevinski fakultet, Beograd, 2009.
- [77] Hamill, L., *Bridge Hydraulics*, E&FN SPON, London 1999, Taylor&Francis e-Library, 2004.
- [78] Handbook for flood protection, anti erosion & river training works, Flood Management Organization, India, New Delhi, 2012.
- [79] Handbuch Wasserbau, Naturgemäße Gestaltung von Fließgewässern, Ministerium für umwelt, Baden-Württemberg, 1990.
- [80] Hanson et al. *Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments*, Transactions of the ASAE, Vol. 48, 5, 2005.
- [81] Hartung, F., Scheuerlein, H. (1970) *Design of Overflow Rockfill Dams*, Q. 36, R. 35, Dixième Congrès des Grands Barrages, ICOLD, Montréal, 1970.
- [82] Henderson, F.M., *Open Channel Flow*, Macmillan Publishing Co., New York, 1966.
- [83] Hervouet, J-M. (2007) *Hydrodynamics of Free Surface Flows – modelling with the finite element method*, Wiley, Chichester, England.
- [84] Hoffmans, G.J.C.M., Verheij, H.J.Jr., *Scour Manual*, A.A.Balkema, Rotterdam, 1997.
- [85] Hug, M. ed. *Mécanique des fluides Appliquée*, Eyrolles, Paris, 1975.
- [86] Hughes, I.G., Hase, T.P.A, *Measurements and their Uncertainties - A practical Guide to Modern Error Analysis*, Oxford University Press, 2010.

- [87] Huston, J., *Dredging Fundamentals*, Journal of the Waterways and Harbors Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 93, No. WW3, August, 1967.
- [88] IPPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *The Science of Climate, Third Assessment Report of WGI of IPCC*, Houghton et al. (ed.) Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- [89] Ishii, C., Asada, H., Kishi, T., *Shape of Separation Region Behind a Groyne of Non-Overflow Type in Rivers*, Proceedings of the XX. IAHR Congress, Vol. II, Moscow, 1983.
- [90] Izbash, S.V., Khaldre, Kh. Yu., *Hydraulics of River Channel Closure*, Butterworths, London, 1970.
- [91] Jahangirzadeh, A., et al., *Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Different Shapes of Collars on the Reduction of Scour around a Single Bridge Pier*, PLOS ONE, June 2014, Vol. 9, Issue 6, 2014.
- [92] Jansen, P.Ph. i dr. (ed.) *Principles of River Engineering*, Pitman, 1979.
- [93] Jamme, G., *Travaux Fluviaux*, Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 1974.
- [94] Jevđević, Vujica, *Analysis of Risks and Uncertainties in Flood Control*, Floods and Droughts, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1973.
- [95] Johnson, P.A., *Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 8, 1995.
- [96] Johnson, P.A., *Reliability-Based Pier Scour Engineering*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 10, 1992.
- [97] Johnson, P.A., *Modeling Uncertainty in Prediction of Pier Scour*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 2, 1996.
- [98] Johnson, P.A., Simon, A., *Effect of Channel Adjustment Processes on Reliability of Bridge Foundations*, Journal of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 123, No. 7, 1997.
- [99] Jovanović, M., *Hidraulički i morfološki efekti protočnih napera*, 19. Savetovanje SDHI i SDH, Beograd, 2021.
- [100] Jovanović, M., *Proračun lokalne deformacije rečnog korita u blizini protočnog napera*, Vodoprivreda, 0350-0519, Vol. 53(2021) No. 309-311 p., 2021.
- [101] Jovanović, M., *Tehnički rudarski projekat nadvišenja brane flotacijskog jalovišta rudnika Grot*, Knjiga VIII, Sveska VIII.1: Hidraulička analiza proboja brane jalovišta Grot i definisanje ugroženog područja, Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina i GEA d.o.o., Beograd, 2020.
- [102] Jovanović, M. i dr. *Zaštita od erozije obala reke Vrbas*, TG23 - Glavni projekti za zaštitu od poplava severnog dela Republike Srpske, IWA Consult d.o.o., Beograd, 2019.

- [103] Jovanović, M. i dr. *Zaštita od poplava Republike Srpske-Program hitne sanacije i sprečavanja poplava* (EIB NO: 2010-0479), TG23-Glavni projekti za zaštitu od poplava severnog dela Republike Srpske, Zaštita obala reke Vrbas na različitim lokacijama, IWA Consult, Beograd, 2019.
- [104] Jovanović, M. *Zašto je prosecanje rečnih krivina rizična regulaciona mera?*, Vodoprivreda, 0350-0519, Vol. 51(2019), No. 297-299 p., 2019.
- [105] Jovanović, M. i dr. *Revitalizacije kanala Borna u Gradiški*, TG23 - Glavni projekti za zaštitu od poplava severnog dela Republike Srpske, IWA Consult d.o.o., Beograd, 2019.
- [106] Jovanović, M., *Građevinsko uređenje vodotokova*, Srpska enciklopedija, Tom III, Knjiga 1, Matica Srpska, SANU, Zavod za izdavanje udžbenika, Novi Sad – Beograd, 2018.
- [107] Jovanović, M., *Jedan primer korišćenja savremenih numeričkih alata u projektovanju i održavanju rečnih regulacionih građevina*, Vodoprivreda, 0350-0519, Vol. 48(2016), No. 279-281, 2016.
- [108] Jovanović, M., *Snimanje i praćenje obaloutvrda i poprečne građevine na Moravi kod Markovačkog mosta* – Elaborat o obavljenim aktivnostima sa predlogom regulacionih radova, Građevinski fakultet Beograd, 2016.
- [109] Jovanović, M., Cvetković, D., *Uloga tržišta osiguranja u zaštiti od poplava*, Izgradnja, Br. 11-12, 2015.
- [110] Jovanović, M., *Hidraulički otpori izazvani sistemima naperi*, Vodoprivreda 0350-0519, Vol. 47(2015) No. 273-275, 2015.
- [111] Jovanović, M., Kapor, R., Đorđević, D., *Hidrauličko – morfološka studija Dunava na ušću Save*, Građevinski fakultet, Beograd, 2015.
- [112] Jovanović, M., *Numerička hidraulika u projektovanju regulacionih građevina – naperi sa krilima*, 16. Savetovanje SDHI i SDH, Donji Milanovac, 2012.
- [113] Jovanović, M., et al. *Studija efekata praga kod Markovačkog mosta na rad TE „Morava”, morfologiju korita Velike Morave i režim površinskih i podzemnih voda u periodu 2008-2012*, Građevinski fakultet Beograd, 2012.
- [114] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B., Rosić, N., *Studija hidrotehničkog uređenja ulaza u Čukarički zaliv u uslovima nastalim izgradnjom novog mosta na reci Savi*, Građevinski fakultet, Beograd, 2011.
- [115] Jovanović, M., Rosić, N., *Proračun preliivanja kamenog praga u rečnom koritu pri malim vodama*, Vodoprivreda, 0350-0519, Vol. 42(2010), No. 243-245, 2010.
- [116] Jovanović, M., Todorovic, A., Rodic, M., *Kartiranje rizika od poplava*, Vodoprivreda, Vol. 41(2009), No. 1-3, 2009.
- [117] Jovanović, M., *Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija*, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.

- [118] Jovanović, M., *Flood Risk Mapping*, Postgraduate Course in Water Resources and Environmental Management, Educate!, 2008.
- [119] Jovanović, M., *Role of Detention and Retention Basins in Stormwater Management and Environmental Protection*, Advances in Urban Flood Management, Ashley, R. et al. (ed.), Taylor & Francis, Balkema, London, 2007.
- [120] Jovanović, M., et al, *Hidraulička studija funkcionisanja vodozahvata „Makiš”*, Građevinski fakultet, Beograd, 2007.
- [121] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B. *Numerička simulacija koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog nanosa u maticu reke, „Vodoprivreda”*, 0350-0519, 39, 2007.
- [122] Jovanović, M., *Projekat hitnih intervencija u koritu Velike Morave nizvodno od Markovačkog mosta radi poboljšanja snabdevanja vodom TE „Morava”*, Građevinski fakultet Beograd, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 2007.
- [123] Jovanović, M., *Ocena rizika od erozije rečnog korita oko mostovskih stubova*, Vodoprivreda 0350-0519, 38(2006), 2006.
- [124] Jovanović, M., Komatina, D., Đorđević, D., *Hidrauličko-morfološka studija Dunava u zoni Beške*, Građevinski fakultet, Beograd, 2005.
- [125] Jovanović, M., Komatina, D., Đorđević, D., Maksimović, M., *Analiza strujnog polja i stabilnosti korita Dunava u zoni novog mosta kod Beške primenom modela ravanskog (2D) tečenja*, Građevinski fakultet, Beograd, 2005.
- [126] Jovanović, M., et al *Idejni projekat uređenja sliva Kumodražskog potoka u Beogradu - dimenzionisanje retenzionih bazena*, Građevinski fakultet, Beograd, 1999.
- [127] Jovanović, M., *Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova*, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [128] Jovanović, M., *Uticaj neizvesnosti koeficijenta trenja na rezultate proračuna neustaljenog tečenja u otvorenim tokovima*, Zbornik radova Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, Beograd, 1994.
- [129] Jovanović, M., Varga, S., *Studija mogućnosti formiranja retencija u priobalju Tise*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 1992.
- [130] Jovanović, M., *Modeling of Erosion of Earth Structures Exposed to Overflowing*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Beograd, 1987.
- [131] Jović, R., *Zaštita Sremskih Karlovaca od poplava*, Vode Vojvodine (8), 1980.
- [132] Julien, P.Y., *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press, Cambridge, NY, 1995.
- [133] Julien, P.Y., *River Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, NY, 2002.
- [134] Kapor, R., *Hidraulika*, Građevinski fakultet i Akademska misao, Beograd, 2015.

- [135] Katalog proizvođača ANALIT NETLON, Tvornica za preradu i proizvodnju plastičnih masa, Osijek.
- [136] Katalog proizvođača ARMATER, *Technical Product Data*, References AV20/10, AV25/10, AV30/10, 63600 AMBERT, France, 2010.
- [137] Katalozi proizvođača Maccaferri, *Opere fluviali - i problemi e le soluzioni*, Opere longitudinali, Opere transversali, Opere repellenti, Officine Maccaferri S.p.A., Bologna, 2000.
- [138] Katalog proizvođača Maccaferri, *Maccaferri Gabions for River works, Soil conservation, Retaining structures for roads, railways and property, Linings for canals and dams, Marine works, Rock fall netting*, Officine Maccaferri S.p.A., Bologna, 2000.
- [139] Katalog proizvođača Maccaferri - Macra2, Hydraulic Reference, 2008.
- [140] Katalog proizvođača Maccaferri, *Channelling Works*, Environmental Solutions, Maccaferri Australia Pty Ltd, 1997.
- [141] Katalog proizvođača OLTMANN-EROLAN, Kunststoffe GmbH, Nemačka.
- [142] Katalog proizvođača REHAU, program ARMAPAL.
- [143] Kinori, B.Z., Mevorach, J., *Manual of Surface Drainage Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 1984.
- [144] Knauss, J., *Computation of Maximum Discharge at Overflow Rockfill Dams*, Q. 50, R. 9, Treizième Congrès des Grands Barrages, ICOLD, New Delhi, 1979.
- [145] Knowledge series: Weather catastrophes and climate change - Is there still hope for us?, Munich Re Group, 2005.
- [146] Koerner, R., M., *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1986.
- [147] Komatina, D., Branislavljević, N., Jovanović, M., *Integrated Flood Risk Management*, Postgraduate Course in Water Resources and Environmental Management EUCATE, Građevinski fakultet, Beograd, 2007.
- [148] Komatina, D., *Sustainable Development of River Ecosystems*, Interna publikacija, Beograd 2001.
- [149] Kothyari et al., *Temporal variation of scour around circular bridge piers*, J. Hydraulic Eng. ASCE, 118(8), 1091-1106, 1992.
- [150] Kron, W., *Flood Damage Estimation and Flood Risk Mapping*, Chapter 10, Advances in Urban Flood Management, Ashley, R. et al (ed.), Taylor & Francis, London, 2007.
- [151] Kron, W., *Flood catastrophes: causes-losses-prevention from an international reinsurer's point of view*, Precautionary Flood Protection in Europe - International Workshop, Bonn, 2003.

- [152] Kron, W., Willems, W., *Flood Risk Zoning and Loss Accumulation Analysis for Germany*, Proc. Int. Conference on Flood Estimation, Berne, 2002.
- [153] Krzhizhanovskaya, V.V., et al., *Flood early warning system: design, implementation and computational modules*, Procedia Computer Science 4(2011) 106-115, Elsevier, 2011.
- [154] Lagasse, P.F. et al. *Risk-Based Approach for Bridge Scour Prediction*, Final Report, Transportation Research Board, 2013.
- [155] Lagasse, P.F. et al., *Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control*, HCHRP - National Cooperative Highway Research Program, Report 568, 2006.
- [156] Lança, R.M. et al., *Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers*, J. Hydraulic Eng. ASCE, 139(11), 1117-1125, 2013.
- [157] Lauchian, Ch.S., *Riprap Protection at Bridge Piers*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 5, May, 2001.
- [158] LAWA, German Working Group on Water Issues of the Federal States and the Federal Government, *Recommendations for the Establishment of Flood Hazard and Flood Risk Maps*, Dresden, 2010.
- [159] Lebreton, J.C. (1974) *Dynamique fluviale*, Eyrolles, Paris.
- [160] Lee, O., Sturm, W., *Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour*, ASCE, 135(10), 793-802, 2009.
- [161] *Levees and the National Flood Insurance Program: Improving Policies and Practices*, National Academies Press, 2001.
- [162] Likić, B., *Hidrosistem DTD*, Srpska enciklopedija, Matica Srpska, SANU, Zavod za izdavanje udžbenika, Novi Sad – Beograd.
- [163] Long, Y., *Manual of Operational Methods for the Measurement of Sediment Transport*, Operational Hydrology Report No 29, WMO No 686, 1989.
- [164] Marion, A. et al., *Sediment supply and local scouring at bed sills in high-gradient streams*, Water Resources Research, Vol. 42, W06416, 2006.
- [165] Marković, M., *Analiza režima leda na sektoru Dunava kod Apatina*, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd, 2006.
- [166] Mayerle, R., Toro, F.M., Wang, S.S.Y., (1995), *Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes*, Journal of hydraulic research, Vol. 33, No 2, pp. 243-255.
- [167] *Measurement of liquid flow in open channels - Methods for measurement of characteristics of suspended sediment*, International Standard ISO 4363, 2014.
- [168] Melville, B.W., *The physics of local scour at bridge piers*, Fourth International Conference on Scour and Erosion, Tokyo, 2008.

- [169] Melville, B.W., *Pier and Abutment Scour: Integrated approach*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 2, February, 1997.
- [170] Melville, B.W., *Design Method for Local Scour at Bridge Piers*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 10, October, 1988.
- [171] Miloradović, T., Jovanović, S., *Odbrambena linija u Novom Kneževcu*, Vode Vojvodine (8), 1980.
- [172] Milovanov, D. i dr., *Hidrosistem Dunav-Tisa-Dunav*, Novi Sad 1972.
- [173] Monti, R., *Flow visualizations of the horseshoe vortex around a bridge pier*, Journal Terr©A, Hydraulic Research Centre for the Environment, Politecnico di Milano, No. 5, 2001.
- [174] Muškatirović, D., *Regulacija reka*, Građevinski fakultet, Beograd, 1991.
- [175] Müller, G., Mach, R., Kauppert, K., *Mapping of bridge pier scour with projection moiré*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, 2001, No. 5, 2001.
- [176] Muzej nauke i tehnike, Galerija SANU, *Leonardo da Vinči – naučnik i pronalazač*, Zbornici i katalozi, ISBN 86-7025-226-0, Beograd, 1996.
- [177] National Engineering Handbook, Part 654, Technical Supplement 14B, Scour Calculations, USDA, 210-VI-NEH, 2007.
- [178] Nešić, M., *Regulisanje reka*, Građevinska knjiga, Beograd, 1966.
- [179] NSDW National SuDS Working Group, *Interim Code of Practice for Sustainable Drainage Systems*, ISBN 0-86017-904, 2004.
- [180] Odgaard, A.J., Špoljarić, A., *Sediment Control by Submerged Vanes*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 12, 1986.
- [181] Ohio Department of Transportation, ODOT Hydraulics Manual, 2005, 2011.
- [182] Orsborn, John, *New Concepts in Fish Ladder Design*, Volume I – IV, 1982-1984 Final Report, Project No. 198201400, 81 electronic pages, (BPA Report DOE/BP-36523-2)
- [183] Ouillon, S., Dartus, D. (1997) *Three-Dimensional Computation of Flow Around Groyne*, Journal of hydraulic engineering, Vol. 123, No. 11, 1997.
- [184] Parker, G., *1D Sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents*, St. Anthony Falls Laboratory, Minneapolis, 2004.
- [185] Pasche, E., *Flood Modelling in Urban Rivers – the State-of-the-Art and Where to Go*, Advances in Urban Flood Management, Ashley, R. et al (ed.), Taylor & Francis, Balkema, London, 2007.
- [186] Pasche, E. et al *Flood Damage Assessment and Risk Mapping*, Joint project Technical University Hamburg-Harburg and University of Belgrade, 2005.

- [187] Petersen, G., ed. *Managing Extreme Flood Events*, IHP, Koblenz, 2009.
- [188] Petrović, P., *Brane*, Srpska enciklopedija, Tom II, Knjiga 1, Matica Srpska, SANU, Zavod za izdavanje udžbenika, Novi Sad – Beograd, 2011.
- [189] PIANC, *Final report of the International Commission for the Study of Environmental Effects of Dredging and Disposal of Dredged Materials*, Annex to Bulletin No. 27 (Vol. II/1977), Brussels, 1997.
- [190] PIANC, *Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles in marine environment*, Brussels, 1992.
- [191] PIANC, *Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waters*, Supplement to Bulletin 57, *Risk consideration when determining bank protection requirements*, Supplement to Bulletin 58, Brussels, 1987.
- [192] Pilarczyk, K.W., *Dutch experience on design of dikes and revetments*, ASCE Proc. Coastal Engineering Practice'92, Long Beach, 1992.
- [193] Plate, E.J., *Flood risk and flood management*, Journal of Hydrology, 267, 2-11, 2002.
- [194] Plavšić, Jasna, *Inženjerska hidrologija*, Građevinski fakultet, Beograd, 2019.
- [195] Pleijster, E.J., van der Veecken, C., *Dutch Dikes*, LOLA Landscape Architects, naiOio publishers, Rotterdam, 2014.
- [196] Ponseti, M., et al *The Three Gorges Dam Project in China: history and consequences*, ORIENTATS-2006, Revista HMIC, número IV, 2006.
- [197] Potapov, V.M. *Metoda veštačke poprečne cirkulacije i njena primena u hidrotehnicí*, (na ruskom), A.H.SSSR, Moskva, 1947.
- [198] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, 1986.
- [199] Prodanović, D., *Mehanika fluida za studente Građevinskog fakulteta*, Građevinski fakultet, Beograd, 2013.
- [200] Przedwojski, B., Blazejewski, R., Pilarczyk, K.W., *River Training Techniques - Fundamentals, Design and Applications*, Balkema, Rotterdam, 1995.
- [201] Reznicek, K. *Izgradnja masivnih regulacionih rečnih građevina od sitnozrnog nanosa*, Vode Vojvodine, No. 8, 1980.
- [202] Reznicek, K., *Odbrana od poplava u ravničarskim predelima*, doktorska disertacija, Novi Sad, 1978.
- [203] Richardson, E.V., Stevens, M.A., Simons, D.B., *The Design of Spurs for River Training*, XV. Congress IAHR, Vol. 2., Sao Paolo, 1975.

- [204] Robinson, K.M., Rice, C.E., Kadavy, K.C., *Design of Rock Chutes*, Transactions of ASAE, Vol. 41(3), 1998.
- [205] Rocscience Inc., *Application of the Finite Element Method to Slope Stability*, Toronto, 2001-2004.
- [206] Rosić, N., Jovanović, M., *Stohastički pristup u određivanju šteta od poplava*, Vodoprivreda, 0350-0519, 40 (2008) 234-236, 2008.
- [207] Rozanov, N.P. *Hidrotehničke konstrukcije* (na ruskom), Moskva, 1978.
- [208] Rowney, A.C. et al, *Sustaining Urban Water Resources in the 21st Century*, Vol. 1 and 2, Conference Proceedings, Malmo Sweden, 1997.
- [209] Safarzadeh, A., et al. (2010) *Experimental study of head shape effects on shear stress distribution around a single groyne*, River flow 2010 – Dittrich, Koll, Aberle, Geisenhainer (eds), Bundesanstalt für Wasserbau, 2010.
- [210] Saldi-Caromile, K., et al *Stream Habitat Restoration Guidelines*, Washington Department of fish and Wildlife, 2004.
- [211] Savić, Lj., *Uvod u hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet, Beograd, 2003.
- [212] Scott, E., Morlock, *Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge*, US Geology Survey, Water-Resources Investigations REport 95-4218, 1996.
- [213] Scotton, P., *Regulation of small rivers and torrents – Sediment transport in gravel rivers: river morphology, longitudinal protections*, Faculty of Engineering - University of Trento, 1998.
- [214] SeungHo, H. (2005) *Interaction of bridge contraction scour and pier scour in a laboratory river model*, MS Thesis, Georgia Institute of Technology.
- [215] Siddhartha B., *Risk Accumulation – Perceptions, Challenges and Solutions*, TCS BaNCS Insurance, 2015.
- [216] Simons, D., Lee, *Design Manual for Engineering Analysis of Fluvial Systems*, Arizona Department of Water Resources, Project No. AZ-DWR-05, 1985.
- [217] Smith, C.D., *Hydraulic Structures*, University of Saskatchewan, 1995.
- [218] Standard SRPS EN ISO 22475-1:2017
- [219] Standard SRPS EN ISO 14688-2:2012
- [220] Standard SRPS EN 16907-1-6, Zemljani radovi
- [221] Stevens, M.A., Simons, D.B, Lewis, G.L., *Safety Factors for Riprap Protection*, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 102, No. HY5, May, 1976.
- [222] *Stream Corridor Restoration – Principles, Processes, and Practices*, The Federal Interagency Stream Restoration Working Group, USDA, 2000.

- [223] Suzuki, K. et al., *Local bed form around a series of spur dikes in alluvial channels*, XXII IAHR Congress, Lausanne, 1987.
- [224] Tamai, N., Matsuzaki, H., *Estimate of fish habitat for determination of ecological instream flow*, 27. IAHR Congress, San Francisco, 1997.
- [225] Tanasić, N., *Upravljanje armiranobetonskim mostovima u kontekstu njihove ugroženosti lokalnom erozijom rečnog dna*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, 2015.
- [226] Telemac Modelling System, Telemac2D and Telemac3D documentation, www.opentelemac.org.
- [227] Temple, D.M. et al *Stability design of grass-lined open channels*, US Dept. of Agriculture, Agriculture Handbook 667, 1987.
- [228] Temple, D.M., *Stability of grass-lined channels following mowing*, Transactions of the ASAE 18(3), 1985.
- [229] Thonon, I., *Deposition of sediment and associated heavy metals on floodplains*, Netherlands Geographical Studies 337, University Utrecht, 2006.
- [230] Thorne, C., R., Abt, S., R., *Velocity and Scour Prediction in River Bends*, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Report HL-93-1, 1993.
- [231] Todorović, A., *Kartiranje rizika od poplava u dolini Topčiderske reke*, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.
- [232] Tsujimoto, T., Horikawa, N., *Methodology of ecological fishway design*, 27. IAHR Congress, San Francisco, 1997.
- [233] US Department of the interior, Bureau of Reclamation, *Rock Ramp Design Guidelines*, Denver, 2007.
- [234] US Department of Agriculture, Part 633, National Engineering Handbook, Chapter 26, *Gradation Design of Sand and Gravel Filters*, 1994.
- [235] US Army Corps of Engineers, *Design and Construction of Levees*, Eng. Manual EM 1110-2-1913, 2000.
- [236] US Army Corps of Engineers, *Slope Stability*, Eng. Manual EM 1110-2-1902, 2003 + SCDOT *Geotechnical Design Manual*, Appendix B: *Slope Stability Design Charts*, 2010.
- [237] US Army Corps of Engineers, *River Hydraulics*, Eng. Manual EM 1110-2-1416, 1993.
- [238] US Army Corps of Engineers, *Channel Stability Assessment for flood Control Projects*, Eng. Manual EM 1110-2-1418, 1994.
- [239] US Army Corps of Engineers, *Hydraulic Design of Flood Control Channels*, Eng. Manual EM 1110-2-1601, 1994.

- [240] US Army Corps of Engineers, *National Economic Development Procedures Manual – Urban Flood Damage*, IWR Report 88-R-2, 1988.
- [241] US Army Corps of Engineers, *Uncertainty Estimates for Nonanalytic Frequency Curves*, ETL 1110-2-537, 1997.
- [242] US Army Corps of Engineers, *Hydrologic Engineering, Requirements for Flood Reduction Studies*, Eng. Manual EM 1110-2-1619, 1996.
- [243] US Army Corps of Engineers, *Ice Engineering*, Eng. Manual EM 1110-2-1612, 2002.
- [244] US Army Corps of Engineers, *Engineering and Design-Hydrologic Analysis of Interior Areas*, Eng. Manual EM 1110-2-1413, 1987.
- [245] US Army Corps of Engineers, *Hydrographic Surveying*, Eng. Manual EM 1110-2-1003, 1994.
- [246] US Army Corps of Engineers, *Dredging and Dredged Material Disposal*, Eng. Manual EM 1110-2-5025, 1983.
- [247] US Army Corps of Engineers, *Confined Disposal of Dredged Material*, Eng. Manual EM 1110-2-5027, 1987.
- [248] US Army Corps of Engineers, *Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs*, Eng. Manual EM 1110-2-4000, 1995.
- [249] US Army Corps of Engineers, *National Nonstructural/Flood Proofing Committee*, 2005.
- [250] US Army Corps of Engineers, *Seepage Analysis and Control for Dams*, Eng. Manual EM 1110-2-1901, 1993.
- [251] US Army Corps of Engineers, HEC-RAS - *River Analysis System*, User's Manual, 2019, 2022.
- [252] US Army Corps of Engineers, RMA2 WES, Users Guide, WexTech Systems, New York, 1997.
- [253] Van Rijn, L. C. (1984) *Sediment transport - Part I: bed load, Part II: suspended load*, Journal of Hydraulic Division, Proc. ASCE, Vol. 110, HY 10, HY 11.
- [254] Van Rijn, L., *Handbook: Sediment transport by currents and waves*, Report H 461, Delft Hydraulics, 1989.
- [255] Videler, J.J., Weihs, D., *Energetic advantages of burst-and-coast swimming of fish at high speeds*, Journal of exp. Biology, 97, 1982.
- [256] Vodoprivredna osnova Republike Srbije, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2001.
- [257] Vuković, M., Soro, A., *Dinamika podzemnih voda kroz rešene probleme - ustaljena strujanja*, Knjiga 25, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1984.

- [258] Vuković, M., Pušić, M., *Filtracione deformacije i stabilnost tla*, Knjižica 31, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd, 1986.
- [259] Wasp, E.J., Kenny, J.P., Gandhi, R.L., *Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*, Gulf Publishing Company, Book Division, Houston, London, Paris, Tokyo, 1997.
- [260] Weather catastrophies and climate change, Münchener Rück, Munich Re Group, 2005.
- [261] Wood, I.R., (1984) *Air Entrainment in High Speed Flows*, Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Technische Akademie Esslingen.
- [262] Zevenbergen, Ch. et al (ed.) *Urban Flood Management*, CRC Press, Balkema, 2010.
- [263] Zöllner, F., *Leonardo da Vinci*, The Complete Paintings and Drawings, Taschen, Köln, 2007.

Izvori sa interneta (do 2021)

- [264] http://academics.concord.edu/sckuehn/Sieve_Phi_Sizes.pdf
- [265] <http://www.geotechdata.info/parameter/permeability.html>
- [266] <http://www.iuhr.uiowa.edu/jodgaard/files/2013/09/Odgaard-Jacob.jpg>
- [267] <http://web.mit.edu/2.016/www/handouts/2005Reading4.pdf>
- [268] <http://www.mgsi.gov.rs/lat/odsek/zakon-o-planiranju-i-izgradnji>.
- [269] <http://envirohistorynz.com/2012/05/>
- [270] https://structx.com/Soil_Properties_007.html
- [271] https://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Tresca
- [272] <http://www.space.si/slovenija-iz-vesolja/analiza-poti-v-krajinskem-parku-rozniktivoli-in-sisenski-hrib/>
- [273] http://www.ingkomora.org.rs/materijalpo/download/2015/SAVREMENE_TEHNOLOGIJE_PRIKUPLJANJA_LOBRADE_PODATAKA_U_GEODEZIJI_UAV.pdf
- [274] http://www.evrogeomatika.co.rs/pdf/LaserskoAltimetrijskoSnimanje_GS.pdf
- [275] <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/99773800A886356BC1257EF800369BDB?OpenDocument>
- [276] http://www.theseusproject.eu/wiki/Measuring_instruments_for_sediment_transport
- [277] www.dredgebrokers.com

- [278] <https://cee.illinois.edu/news/research-helps-optimize-alaska-railroad-bridge>
- [279] https://www.123rf.com/photo_78153682_rows-of-poplar-trees-in-the-countryside-tuscany-italy.html
- [280] <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>
- [281] <http://www.fishbase.org/manual/English/>
- [282] <http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/>
- [283] <http://herkules.oulu.fi/isbn9514259777/html/index.html>
- [284] <https://sr.wikipedia.org/wiki/Ekologija>
- [285] <http://www.sciencedaily.com/terms/ecology.htm>
- [286] <http://www.caryinstitute.org/discover-ecology/definition-ecology>
- [287] https://ec.europa.eu/echo/files/civil_protection/civil/pdfdocs/pr98f04.pdf
- [288] <https://drvotehnika.info/media/images/>
- [289] <https://drvotehnika.info/clanci/tehnicka-svojtva-i-upotrebljivost-drvetica-paulovnije-paulownia>
- [290] <https://realnoevremya.com/articles/4308-lukoil-suggests-reducing-co2-emissions-through-forestry>
- [291] <https://www.vanschaiksalix.nl/en/portfolio-archive/fascine-mattresses/>
- [292] <https://www.buildsite.com/pdf/tensar/Triton-Filter-Mattress-System-Summary-Brochure-1603683.pdf>
- [293] <https://www.reddit.com/r/Damnthatinteresting/comments/a49zb3/>
- [294] <https://www.coursehero.com/file/17562001/SoilMech-Ch10-Flow-Nets/>
- [295] <https://www.kurir.rs/vesti/srbija/3485649/slike-kataklizme-u-ljuboviji>
- [296] <https://uwm.edu/engineering/wp-content/uploads/sites/57/2019/04/Economic-Equivalence-fe.pdf>
- [297] <https://akademik.adu.edu.tr/fakulte/muhendislik/personel/uploads/gbozturk/enr-301-lecture-1-1459249947.pdf>
- [298] <https://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/>
- [299] ASCSO Lessons Learned, damfailures@damsafety.com
- [300] <https://www.hydroplus.com>
- [301] <https://www.obnova.gov.rs/uploads/useruploads/Documents/Izvestaj-o-proceni-potreba-za-oporavak-i-obnovu-posledica-poplava.pdf>

- [302] <https://floodobservatory.colorado.edu/>
- [303] <https://www.winnipegfreepress.com/multimedia/pov/Flood-Fight-2011—Breezy-Point-119521429.html>
- [304] <https://www.cmilc.com/case-studies/redwood-shores-levee-upgrade>
- [305] <https://www.tradekorea.com/product/detail/P680415/Jute-Hessian-Bags-for-Flood-Control.html>
- [306] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-00268-8_16
- [307] <https://www.inero.se/en/barrier-h80>
- [308] <https://www.ibsengineeredproducts.co.uk/demountable-barriers/>
- [309] https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Sustainable_urban_drainage_systems_SUDS
- [310] <https://discourse.saylor.org/t/arth101-discussion-topic-11-gone-green/3019>
- [311] <https://www.greenroofs.com/projects/asla-headquarters/>
- [312] <https://www.greenroofs.com/projects/california-academy-of-sciences-cas-living-roof/>
- [313] <https://www.dezeen.com/tag/flood-prevention/>
- [314] <https://www.hurricanesshutterswholesale.com/quick-dam-flood-barrier>
- [315] <https://www.cresta.org/>
- [316] http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas
- [317] <http://www.ipcc.ch/>
- [318] <http://www.rdvode.gov.rs/lat/zakoni.php>
- [319] https://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/
- [320] <http://hdl.handle.net/11245/2.119258>
- [321] http://www.meted.ucar.edu/hazwarnsys/haz_fflood.php

Dodatak D1

Standardni otvori sita [263]

125 mm	5 in.	4,75 mm	No. 4
106 mm	4,24 in.	4,00 mm	No. 5
100 mm	4 in.	3,35 mm	No. 6
90 mm	3-1/2 in.	2,80 mm	No. 7
75 mm	3 in.	2,36 mm	No. 8
63 mm	2-1/2 in.	2,00 mm	No. 10
53 mm	2,12 in.	1,70 mm	No. 12
50 mm	2 in.	1,40 mm	No. 14
45 mm	1-3/4 in.	1,18 mm	No. 16
37,5 mm	1-1/2 in.	1,00 mm	No. 18
31,5 mm	1-1/4 in.	0,850 mm	No. 20
26,5 mm	1,06 in.	0,710 mm	No. 25
25,0 mm	1 in.	0,600 mm	No. 30
22,4 mm	7/8 in.	0,500 mm	No. 35
19,0 mm	3/4 in.	0,425 mm	No. 40
16,0 mm	5/8 in.	0,355 mm	No. 45
13,2 mm	0,53 in.	0,300 mm	No. 50
12,5 mm	1/2 in.	0,250 mm	No. 60
11,2 mm	7/16 in.	0,212 mm	No. 70
9,5 mm	3/8 in.	0,180 mm	No. 80
8,0 mm	5/16 in.	0,150 mm	No. 100
6,7 mm	0,265 in.	0,125 mm	No. 120
6,3 mm	1/4 in.	0,106 mm	No. 140
5,6 mm	No. 3-1/2	0,090 mm	No. 170
		0,075 mm	No. 200
		0,063 mm	No. 230
		0,053 mm	No. 270
		0,045 mm	No. 325
		0,038 mm	No. 400
		0,032 mm	No. 450
		0,025 mm	No. 500
		0,020 mm	No. 635

Dodatak D2

Svojstva nevezanog tla [132]

Meterijal	d_{50} [cm]	ϕ [°]	τ_c [N/m ²]	V_c [m/s]
Gromade				
Vrlo krupne	> 203,2	42	133,78	1,33
Krupne	> 101,6	42	91,30	0,94
Srednje	> 50,8	42	45,41	0,67
Male	> 25,4	42	22,95	0,47
Kamen				
Krupan	> 12,70	42	11,23	0,33
Sitan	> 6,35	41	5,37	0,23
Šljunak				
Vrlo krupan	> 3,30	40	2,64	0,16
Krupan	> 1,52	38	1,22	0,11
Srednji	> 0,76	36	0,59	0,07
Fini	> 0,41	35	0,29	0,05
Vrlo fini	> 0,20	33	0,15	0,04
Pesak				
Vrlo krupan	> 0,10	32	0,05	0,02
Krupan	> 0,05	31	0,03	0,02
Srednji	> 0,03	30	0,02	0,01
Fini	> 0,01	30	0,01	0,01
Vrlo fini	< 0,01	30	0,01	0,01

Dodatak D3

Svojstva vezanog tla

Kohezija c [kN/m²] [42]

Glina						
vrlo tvrda	tvrda	čvrsta do tvrda	čvrsta	meka do čvrsta	meka	vrlo meka
>150	100÷150	75÷100	50÷75	40÷50	20÷40	<20

Kritična brzina toka za eroziju korita V_c [m/s] [2]

Materijal	Bez koloidnih primesa	Koloidna suspenzija
Fini pesak	0,45	0,75
Glinoviti pesak	0,55	0,75
Glinoviti mulj	0,60	0,90
Muljevito tlo	0,75	1,05
Sitan šljunak	0,75	1,50
Kompaktna glina	1,15	1,50
Krupan šljunak	1,20	1,85
Kameni komadi	1,50	1,70
Glinoviti škriljci	1,85	1,85

Kritični tangencijalni napon za eroziju korita [Pa] [154]

Poroznost	2,0÷1,2	1,2÷0,6	0,6÷0,3	0,3÷0,2
Gustina u suvom [kg/m ³]	880÷1220	1220÷1650	1650÷2030	2030÷2210
Gustina zasićen. [kg/m ³]	1550÷1740	1740÷2030	2030÷2270	2270÷2370
Vrsta tla	Kritični tangencijalni napon [Pa]			
Peščana glina	1,9	7,5	15,7	30,2
Tvrda glina	1,5	6,7	14,6	27,0
Glina	1,2	5,9	13,5	25,4
Ilovča	1,0	4,6	10,2	16,8

Dodatak D4

Vrednosti koeficijenta filtracije [264]

Vrsta tla	K [m/s]
Dobro graduisan šljunak, peskoviti šljunak	$5 \times 10^{-4} \div 5 \times 10^{-2}$
Loše graduisan šljunak, peskoviti šljunak	$5 \times 10^{-4} \div 5 \times 10^{-2}$
Šljunak sa prašinstim i peskovitim materijalom	$5 \times 10^{-8} \div 5 \times 10^{-6}$
Aluvijalni pesak i šljunak	$4 \times 10^{-4} \div 4 \times 10^{-3}$
Šljunak sa glinovitim i peskovitim materijalom	$5 \times 10^{-9} \div 5 \times 10^{-6}$
Dobro graduisan pesak, peskoviti šljunak	$1 \times 10^{-8} \div 5 \times 10^{-6}$
Vrlo sitan, dobro graduisan pesak	$8,4 \times 10^{-5}$
Pesak srednje krupnoće, dobro graduisan	$2,2 \times 10^{-3}$
Krupan, dobro graduisan pesak	$3,7 \times 10^{-1}$
Loše graduisani peskovi, šljunkoviti peskovi	$2,5 \times 10^{-5} \div 5,3 \times 10^{-4}$
Čisti pesak dobrih akvifera	$1 \times 10^{-5} \div 1 \times 10^{-2}$
Pesak i šljunak uniformne krupnoće	$4 \times 10^{-3} \div 4 \times 10^{-1}$
Dobro graduisan pesak i šljunak bez sitneži	$4 \times 10^{-5} \div 4 \times 10^{-3}$
Prašinsti peskovi	$1 \times 10^{-8} \div 5 \times 10^{-6}$
Glinoviti peskovi	$5,5 \times 10^{-9} \div 5,5 \times 10^{-6}$
Malo plastični prašinsti i glinoviti peskovi	$5 \times 10^{-9} \div 1 \times 10^{-6}$
Prašinsti materijali bez organskih primesa	$5 \times 10^{-9} \div 1 \times 10^{-6}$
Malo plastična prašina i prašinsti glina	$5 \times 10^{-9} \div 1 \times 10^{-7}$
Prašina i prašinsti glina sa organskim primesama	$5 \times 10^{-9} \div 1 \times 10^{-7}$
Visoko plastična prašina bez organskih primesa	$1 \times 10^{-10} \div 5 \times 10^{-8}$
Visoko plastična glina bez organskih primesa	$1 \times 10^{-10} \div 1 \times 10^{-7}$
Zbijena prašina	$7 \times 10^{-10} \div 7 \times 10^{-8}$
Zbijena glina	1×10^{-9}
Visoko plastična glina sa organskim primesama	$5 \times 10^{-10} \div 1 \times 10^{-7}$

Dodatak D5

Vrednosti Maningovog koeficijenta za inundacije [31]

Vrsta vegetacije	Min	Srednji	Max
Pašnjaci, bez gustog žbunja			
1. Niska trava	0,025	0,030	0,035
2. Visoka trava	0,030	0,035	0,050
Obradivo zemljište			
1. Bez useva	0,020	0,030	0,040
2. Zreli usevi po redovima	0,025	0,035	0,045
3. Zreli poljski usevi	0,030	0,040	0,050
Gusto žbunje			
1. Rasuto žbunje, mnogo jakog korova	0,035	0,050	0,070
2. Lako žbunje i stabla, zimi	0,035	0,050	0,060
3. Lako žbunje i stabla, leti	0,040	0,060	0,080
4. Srednje do gusto žbunje, zimi	0,045	0,070	0,110
5. Srednje do gusto žbunje, leti	0,070	0,100	0,160
Drveće			
1. Gust zasad vrbe, leti	0,110	0,150	0,200
2. Čistina sa panjevima, bez mladica (izdanaka)	0,030	0,040	0,050
3. Isto kao prethodno, sa mnogo mladica	0,050	0,060	0,080
4. Šuma, malo šiblja, nivo ispod krošnji	0,080	0,100	0,120
5. Isto kao prethodno, nivo doseže krošnje	0,100	0,120	0,160

Dodatak D6

Karakteristike gabiona [42]

Kutijasti gabioni

Dužina×širina×visina [m]	Broj dijafragmi	Zapremina [m ³]	Otvor okca × prečnik žice [mm]
1,0 × 1,0 × 0,5	0	0,50	
1,0 × 1,0 × 1,0	0	1,00	
1,5 × 1,0 × 0,5	1	0,75	75×75×3
1,5 × 1,0 × 1,0	1	1,50	ili
2,0 × 1,0 × 0,5	1	1,00	75×75×4
2,0 × 1,0 × 1,0	1	2,00	ili
3,0 × 1,0 × 0,5	2	1,50	75×75×5
3,0 × 1,0 × 1,0	2	3,00	
4,0 × 1,0 × 0,5	3	2,00	
4,0 × 1,0 × 1,0	3	4,00	

Reno madraci

Debljina [m]	Krupnoća kamena [mm]	d_{50} [m]
0,15÷0,17	70 ÷ 100	0,085
	70 ÷ 150	0,110
0,23÷0,25	70 ÷ 100	0,085
	70 ÷ 150	0,120
0,30	70 ÷ 120	0,100
	100 ÷ 150	0,125

Dodatak D7

Svojstva geotekstila [146]

Fizička svojstva	
Relativna (specifična) gustina	0,9 ÷ 1,4
Masa po jedinici površine	135 ÷ 675 gr/m ²
Debljina	0,25 ÷ 7,6 mm
Mehanička svojstva	
Posložnost sabijanju	veoma različita
Čvrstoća na zatezanje	8,75 ÷ 175 KN/m
Izduženje pri kidanju usled zatezanja	20 ÷ 100 %
Otpornost na zamor (ponovljeno opterećenje)	50 ÷ 100% čvrstoće na zatezanje
Čvrstoća na cepanje	0,9 ÷ 1,3 kN
Čvrstoća na probijanje	0,045 ÷ 0,33 kN
Čvrstoća na izvlačenje (tegljenje)	50 ÷ 100 % jačine materijala
Hidraulička svojstva	
Poroznost netkanih geotekstila	50 ÷ 95 %
POA tkanih geotekstila	1 ÷ 36 %
Veličina otvora	0,075 ÷ 2 mm
Propusnost kroz ravan geotekstila	0,01 ÷ 5 cm/s
Propusnost u ravni geotekstila	0 ÷ 2 cm/s
Izdržljivost	
Otpornost na puzanje	zadovoljava za <50% čvrstoće
Otpornost na abraziju	zadovoljava ako nema vibracija kamena
Otpornost na dugotrajnu filtraciju	ne zadovoljava kod jako neuniformnog tla
Otpornost na hidrauličke gradijente	1 ÷ 20
Ekološka svojstva	
Otpornost na hemijske uticaje	zadovoljava, izuzev vodouglenika
Otpornost na termičke uticaje	generalno zadovoljava
Otpornost na svetlost i vremenske uticaje	problematična
Otpornost na uticaj bakterija	generalno zadovoljava
Otpornost na truljenje	generalno zadovoljava

Dodatak D8

Neizvesnosti u merenju fizičkih veličina [86, 44]

Statistički parametri. Uzorak od N vrednosti diskretne promenljive x , statistički karakterišu dva osnovna parametra: *srednja vrednost* \bar{x} i *standardna devijacija* s_x :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; \quad s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 / N}{N-1}}. \quad (\text{VIII.1})$$

Izvedene veličine su: *varijansa*, $\text{Var}(x) = s_x^2$; *koeficijent varijacije*, $\text{CV} = s_x / \bar{x}$.

Standardna devijacija srednje vrednosti

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{N}} \quad (\text{VIII.2})$$

zove se i „standardna greška uzorka” (SE) i predstavlja meru varijabilnosti raspodele uzorkovanja. Relativna standardna greška: $\text{RSE} = \text{SE} / \bar{x} \times 100$ (%) pokazuje kolika je greška uzorkovanja, tj. koliko su rezultati merenja „statistički značajni”. Vrednosti $\text{RSE} > 25\%$ ukazuju na veliku grešku uzorkovanja. Rezultat merenja je statistički značajniji ukoliko je bliži srednjoj vrednosti.

Za funkciju dve promenljive $f(x, y)$ uzimaju se u obzir obe standardne devijacije:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 / N}{N-1}}; \quad s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2 / N}{N-1}}. \quad (\text{VIII.3})$$

Ako su promenljive x i y još međusobno *zavisne* (korelisane), u analizama neizvesnosti merenja koriste se *kovarijansa* $\text{Cov}(x, y)$ i *koeficijent korelacije* r :

$$\text{Cov}(x, y) \equiv s_{xy}^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i\right) / N}{N-1}}; \quad r = \frac{\text{Cov}(x, y)}{s_x \cdot s_y}. \quad (\text{VIII.4})$$

Sistematske i slučajne greške (neizvesnosti). Merna veličina ima dve komponente: (i) brojnu vrednost (matematičko očekivanje) i (ii) *grešku merenja*, kao ocenu neizvesnosti.

Veličina greške merenja zavisi od stepena rasipanja (disperzije) izmerenih vrednosti oko njihove srednje vrednosti. Greške merenja mogu biti *sistematske* i *slučajne*.

Sistematska greška („pristrasnost”, eng. *bias*) kvantifikuje *tačnost* merenja – odstupanje izmerene od stvarne (tačne) vrednosti. Slučajna greška kvantifikuje *preciznost* merenja – promenljivost izmerenih vrednosti pri ponovljenim merenjima.

Sistematska greška („bias”) se *ne procenjuje* statistički i može se eliminisati korekcijom mernog uređaja. Jedina neizvesnost je neizvesnost same korekcije (popravke). S druge strane, slučajna greška je posledica spoljašnjih uticaja na postupak merenja i analizira se statističkim metodama.

Ukupna neizvesnost (U) se sastoji od neizvesnosti usled slučajnih grešaka i neizvesnost usled korekcije sistematskih grešaka. Može biti iskazana na više načina, kao:

- *standardna neizvesnost*, koja je jednaka standardnoj devijaciji: $U(x) = s_x$;
- *kombinovana standardna neizvesnost* obuhvata više mernih veličina i definiše se pomoću njihovih težinski kombinovanih varijansi ili kovarijansi;
- *proširena neizvesnost*, koja se odnosi na interval u kome se nalazi najveći deo raspodele merne veličine.

Primeri izraza za standardnu neizvesnost čestih funkcionalnih zavisnosti $f(x_1, x_2)$ u slučaju *međusobno nezavisnih* promenljivih x_1, x_2 :

$$f = x_1 \pm x_2: \quad U^2(f) = U^2(x_1) + U^2(x_2)$$

$$f = x_1 \cdot x_2: \quad [U(f)/f]^2 = [U(x_1)/x_1]^2 + [U(x_2)/x_2]^2$$

$$f = x_1/x_2: \quad [U(f)/f]^2 = [U(x_1)/x_1]^2 + [U(x_2)/x_2]^2$$

$$f = x^A: \quad [U(f)/f] = |A| [U(x)/x]$$

Prenošenje neizvesnosti. Kada neka veličina zavisi od *niza* mernih veličina x_1, x_2, \dots , njihove pojedinačne neizvesnosti se prenose na neizvesnost razmatrane veličine.

Merenja veličine x se moraju ponavljati da bi se sračunale njihove srednje vrednosti i standardne devijacije, a zatim se obavlja kombinovanje standardnih devijacija shodno sledećim pravilima:

- međusobno korelisane merne veličine:

$$\begin{aligned}
 U^2(f) = & \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 U^2(x_2) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 U^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} \right)^2 U^2(x_N) + \\
 & + 2r_{1,2} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial f}{\partial x_2} \right) U(x_1) U(x_2) + \\
 & + 2r_{1,3} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial f}{\partial x_3} \right) U(x_1) U(x_3) + \\
 & + 2r_{2,3} \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{\partial f}{\partial x_3} \right) U(x_2) U(x_3) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{VIII.5}$$

- međusobno nezavisne (nekorelisane) merne veličine:

$$U^2(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 U^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 U^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N}\right)^2 U^2(x_N) \quad (\text{VIII.6})$$

Upoređenjem izraza (VIII.6) i (VIII.5) može se konstatovati da kombinovana neizvesnost korelisanih veličina sadrži dodatne članove kovarijansi (koeficijenta korelacije). Kvadrat kombinovane standardne neizvesnosti je linearna kombinacija kvadrata standardnih neizvesnosti $U^2(x_i)$ ($i = 1, \dots, N$) i kvadrata parcijalnih izvoda koji imaju ulogu težinskih faktora.

Ako je funkcija proizvod samo dve *zavisne* slučajne veličine: $f = x_1 x_2$, opšti izraz (VIII.5) se svodi na ovaj oblik:

$$U^2(f) = x_2^2 U^2(x_1) + x_1^2 U^2(x_2) + 2r_{1,2} x_1 x_2 U(x_1) U(x_2). \quad (\text{VIII.7})$$

Dodatak D9

Ocena grešaka u merenju suspendovanog nanosa [166]

Izrazi za proračun sistematskih i slučajnih grešaka (neizvesnosti) navode se u tabeli na sledećoj strani, pri čemu su oznake:

- $i = 1, \dots, N$ – broj merenja;
- $j = 1, \dots, M$ – broj mernih vertikalala;
- $k = 1, \dots, L$ – broj tačaka duž jedne vertikale.

- C^* – lokalna koncentracija merena standardnim hvatačem USP61;
- \bar{C} – vremenski osrednjena koncentracija zbog turbulentnih fluktuacija;
- $\tilde{C}_{L,j}$ – srednja koncentracija iz L tačaka na vertikali j ;
- $\tilde{C}_{7,j}$ – srednja koncentracija iz 7 tačaka na vertikali j ;
- $\tilde{\tilde{C}}_{M,i}$ – srednja profilska koncentracija iz M vertikalala u merenju i ;
- $\tilde{\tilde{C}}_i$ – srednja profilska koncentracija Q_s/Q u merenju i ;
- K_W – težinski koeficijent za lokalne koncentracije

Napomena: koncentracije C^* , $\tilde{C}_{7,j}$ i $\tilde{\tilde{C}}$ koriste se, u statističkom smislu, kao referentne („tačne”) vrednosti.

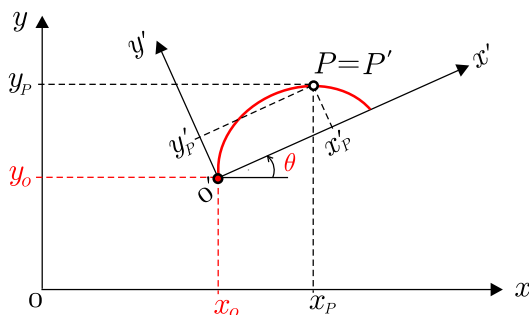
Greške u konvencionalnom merenju suspendovanog nanosa (prema ISO 4363)

I. Greške osrednjavanja koncentracije po vertikali			
Uzrok greške	Relativna greška merenja	Sistematska greška = srednja relativna greška	Slučajna greška = standardna devijacija
Merni uređaj – hvatač	$E_{c,i} = \frac{C_i - C_i^*}{C_i^*}$	$\bar{E}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{c,i} \equiv e_{s,c}$	$s_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{c,i} - \bar{E}_c)^2}{N - 1}} \equiv e_{r,c}$
Fluktuacije brzine	$E_{e,i} = \frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}}$	-	$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_{e,i}^2}{N - 1}}; e_{r,e} = \sqrt{\sum_{k=1}^L K_{W,k}^2 \cdot s_e^2}$
Ograničen broj tačaka L	$E_{p,L,j} = \frac{\tilde{C}_{L,j} - \tilde{C}_{7,j}}{\tilde{C}_{7,j}}$	$\bar{E}_{p,L} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_{p,L,j} \equiv e_{s,p}$	$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (E_{p,L,j} - \bar{E}_{p,L})^2}{M - 1}} \equiv e_{r,p}$
II. Greška osrednjavanja koncentracije po poprečnom preseku			
Ogranične broj vertikala M	$E_{v,M,i} = \frac{\tilde{\tilde{C}}_{M,i} - \tilde{\tilde{C}}_i}{\tilde{\tilde{C}}_i}$	$\bar{E}_{v,M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{v,M,i} \equiv e_{s,v}$	$s_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{v,M,i} - \bar{E}_{v,M})^2}{N - 1}} \equiv e_{r,v}$

Dodatak D10

Transformacija koordinatnog sistema

Na slici je prikazana je skica lokalnog koordinatnog sistema ($x'o'y'$) i državnog koordinatnog sistema (xoy). Koordinate tačaka regulacione linije (ili trase) računaju se u lokalnom koordinatnom sistemu (LKS). Potrebno je koordinate tih tačaka definisati u državnom koordinatnom sistemu (DKS). Prelaz iz jednog sistema u drugi moguć je ako se, kao ulazni podaci, zadaju koordinate tačke O' u DKS (x_o, y_o), kao i ugao rotacije θ (rad).



Transformacija koordinatnih sistema sastoji se od translacije i rotacije

Koordinate bilo koje tačke u DKS (P) računaju se pomoću izraza:

$$\begin{aligned}x_P &= x_o + x'_P \cos \theta - y'_P \sin \theta \\y_P &= y_o + x'_P \sin \theta + y'_P \cos \theta\end{aligned}$$

Primer. Regulaciona linija u krivini definisana je kružnim lukom. Ulazni podaci: poluprečnik 200 m, dužina tangente 491,82 m, ugao između tangenti: $44,26^\circ$ (0,772 rad), dužina sečice 370,53 m. Sračunati koordinate tačaka kružnog luka u lokalnom i državnom koordinatnom sistemu, ako nulta tačka lokalnog sistema ima koordinate: $x_o=6457147$, $y_o=4987005$, a ugao rotacije iznosi: $\theta=58^\circ$ (1,01229 rad).

Rešenje:

x' (m)	0	20	40	60	...	140	160	180
y' (m)	0,00	37,30	62,13	80,57	...	119,47	123,06	124,59
x (m)	6457147,00	6457125,97	6457115,51	6457110,47	...	6457119,87	6457127,43	6457136,73
y (m)	4987005,00	4987041,72	4987071,84	4987098,58	...	4987187,04	4987205,90	4987223,67
x' (m)	200	220	240	260	...	340	360	370,53
y' (m)	124,12	121,62	117,03	110,17	...	51,38	21,97	0,01
x (m)	6457147,73	6457160,44	6457174,94	6457191,35	...	6457283,60	6457319,14	6457343,34
y (m)	4987240,38	4987256,02	4987270,55	4987283,88	...	4987320,56	4987321,94	4987319,23

Dodatak D11

Spisak računskih primera

Oznaka	Sadržaj	Str.
Projektovanje		
Primer 2.1	Proračun protoka vode, pronosa i srednje koncentracije suspendovanog nanosa u profilu	28
Primer 2.2	Proračun kombinovane neizvesnosti (slučajnih grešaka) u merenju koncentracije suspendovanog nanosa	33
Primer 2.3	Određivanje ravnotežnog uzdužnog nagiba dna i karaktera opšte deformacije rečnog korita	44
Primer 2.4	Prognoza širine korita u ravnotežnim uslovima	48
Primer 2.5	Trasiranje regulisanog korita hipotetičke rečne deonice sa prikazom položaja regulacionih građevina i obrazloženjem njihove namene	54
Primer 2.6	Proračun koordinata kružnog luka koji opisuje krivinu	59
Primer 2.7	Proračun koordinata složene kružne krivine	61
Primer 2.8	Proračun koordinata krivine sa paraboličnim prelaznicama	62
Primer 2.9	Proračun koordinata krivine u obliku sinusoide	63
Primer 2.10	Optimizacija analitičkog oblika krivina na deonici V. Morave	63
Primer 2.11	Analiza pokretanja vučenog nanosa pri prolasku poplavnog talasa	67
Primer 2.12	Analiza opšte deformacije korita pri prolasku poplavnog talasa	69
Primer 2.13	Proračun projektne erozione dubine u krivini	70
Primer 2.14	Određivanje krupnoće peska na fizičkom modelu sa pokretnim dnom u kvazi Frudovoj sličnosti	83
Regulacione građevine		
Primer 3.1	Proračun srednje krupnoće kamenog nabačaja na osnovu delujućih sila i zahtevanog koeficijenta sigurnosti	107
Primer 3.2	Proračun srednje krupnoće kamena obaloutvrde na osnovu kritične brzine toka – metoda Escarameie i Meja	110
Primer 3.3	Proračun srednje krupnoće kamena obaloutvrde na osnovu kritične brzine toka – metoda Majnorda i dr.	111
Primer 3.4	Određivanje granulometrijske krive kamenog nabačaja	113
Primer 3.5	Stohastička metoda dimenzionisanja kamenog nabačaja	116
Primer 3.6	Proračun granulometrijskog sastava peščanog filtra	120
Primer 3.7	Proračun granulometrijskog sastava peščanog filtra	122
Primer 3.8	Proračun filtra od geotekstila za obaloutvrdu od kamenog nabačaja (kategorija osnovnog tla: 3)	127
Primer 3.9	Proračun filtra od geotekstila za obaloutvrdu od kamenog nabačaja (kategorija osnovnog tla: 2)	128

Oznaka	Sadržaj	Str.
Primer 3.10	Provera filtra od geotekstila na brzo sniženje nivoa u reci	128
Primer 3.11	Dimenzionisanje nožice obaloutvrde od kamenog nabačaja	131
Primer 3.12	Proračun gabionskih Reno madraca	141
Primer 3.13	Proračun nožice obaloutvrde od gabiona	143
Primer 3.14	Izbor filtra od geotekstila u sklopu zaštite obale gabionima	146
Primer 3.15	Proračun visine talasa usled vetra	155
Primer 3.16	Proračun visine izdizanja nivoa uz obaloutvrdu usled vetra	158
Primer 3.17	Proračun sile udara ledenih santi na obaloutvrdu	162
Primer 3.18	Određivanje krupnoće kamena za telo napera	174
Primer 3.19	Proračun uspora uzvodno od sistema napera	181
Primer 3.20	Proračun eroziona dubine oko napera	184
Primer 3.21	Analiza efekata protočnih napera	190
Primer 3.22	Hidraulički proračun pregrade od gabiona sa slapištem	195
Primer 3.23	Hidraulički proračun pregrade od gabiona sa bučnicom	197
Primer 3.24	Određivanje visine i ramaka kaskada	199
Primer 3.25	Hidraulički proračun kaskada od gabiona	203
Primer 3.26	Dimenzionisanje betonske kaskade tipa SAF	206
Primer 3.27	Hidraulička analiza preliivanja preko praga (reka V. Morava)	213
Primer 3.28	Određivanje potrebnog broja površinskih skretača	218
Primer 3.29	Proračun filtracije kroz nasip od homogenog materijala	233
Primer 3.30	Proračun filtracije kroz nasip sa drenažom	235
Primer 3.31	Provera opasnosti od sufozije na osnovu vrednosti koeficijenta neuniformnosti materijala u telu nasipa	239
Primer 3.32	Uprošćena provera stabilnosti kosine od nevezanog tla	247
Primer 3.33	Provera opasnosti od sufozije na osnovu granulometrijskog sastava	250
Regulacioni radovi		
Primer 4.1	Određivanje vrednosti Maningovog koeficijenta za inundacije sa stabilima datog srednjeg prečnika i rasporeda	271
Primer 4.2	Hidraulički proračun prosecanja krivine (reka Vrbas)	284
Primer 4.3	Određivanje rizika preliivanja zagata	294
Primer 4.4	Određivanje potrebne krupnoće kamena za pregrađivanje reke	295
Primer 4.5	Proračun eroziona dubine u suženju korita	303
Primer 4.6	Proračun eroziona dubine oko mostovskog stuba	308
Primer 4.7	Integralni model proračuna eroziona dubine oko mostovskih stubova i oporaca	314
Primer 4.8	Stohastički model određivanja referentne kote dna korita za proračun lokalne erozije oko mostovskih stubova (Dunav-Beška)	315
Primer 4.9	Stohastički model erozije oko mostovskog stuba (Dunav-Beška)	319

Oznaka	Sadržaj	Str.
Primer 4.10	Zaštita rečnog dna oko mostovskog stuba	323
Primer 4.11	Zaštita nožice mostovskog oporca	324
Primer 4.12	Proračun dimenzija eroziona jame nizvodno od propusta u slučaju nevezanog tla	326
Primer 4.13	Proračun dimenzija eroziona jame nizvodno od propusta u slučaju vezanog tla	327
Primer 4.14	Zaštita od erozije nizvodno od cevastog propusta	328
Primer 4.15	Dimenzionisanje bazena za umirenje toka nizvodno od propusta	330
Primer 4.16	Dimenzionisanje taložnika za zadržavanje nanosa	331
Primer 4.17	Proračun snage pumpe za hidraulički transport bagerovanog materijala	337
	Naturalno uređenje vodotoka	
Primer 5.1	Proračun rampe sa nevezanim i vezanim kamenim blokovima	361
Primer 5.2	Proračun riblje staze	367
Primer 5.3	Proračun kamenog praga shodno naturalnoj regulaciji vodotoka	371
	Zaštita od poplava	
Primer 6.1	Verovatnoća prevazilaženja velike vode u datom periodu	386
Primer 6.2	Određivanje stepena pouzdanosti u toku eksploatacije nasipa	386
Primer 6.3	Hidrološki rizik od pojave 10-god. i 100-god. velike vode	386
Primer 6.4	Dužina eksploatacionog veka nasipa i rizik od preliivanja	387
Primer 6.5	Procena stepena temperaturne promene usled klimatskih promena	388
Primer 6.6	Proračun očekivane godišnje štete za propust	400
Primer 6.7	Proračun godišnjih troškova odbrambenog sistema	405
Primer 6.8	Određivanje ekonomski optimalne kote krune nasipa	407
Primer 6.9	Kartiranje šteta i rizika od poplava (Topčiderska reka)	443
Primer 6.10	Kartiranje šteta i rizika od poplava (opština Čačak)	448

Registar pojmova

- ADCP, 22
- Bagerovanje
 - odlaganje materijala, 338
 - oprema, 332
 - pripremi radovi, 331
- Deformacija korita
 - lokalna, 70
 - opšta, 68
- Gabioni, 98, 138, 141, 144
- Geotekstil, 95, 123
- Fizički modeli, 80
 - efekti razmere, 83
 - hidraulička sličnost, 80
 - kvazi sličnosti, 82
 - psamološka sličnost, 82
- Hidrosistem DjerdapI-II, 469
- Hidrosistem DTD, 466
- Inundacije
 - ekološka obnova, 379
 - geobiohemijski procesi, 375
- Kaskade
 - betonske, 204
 - gabionske, 200
 - izgradnja, 262
 - poplave, 427
 - proračun, 200
 - prosecanje krivina, 286
 - stepenaste, 206
 - visina i broj, 198
- Klasifikacija tla, 38
- Kvalitet vode (parametri), 39
- Led na rekama, 159
 - mehanička svojstva, 159
 - poplave, 427
 - sile na obaloutvdu, 160
- Lokalna erozija
 - integralni model Melvila, 309
 - mostovska suženja, 302
 - mostovski oporci, 308
 - mostovski stubovi, 303, 305, 315
 - propusti, 325
 - stohastički pristup, 315
 - zaštita mostova, 321
- Maningov koeficijent, 79
- Naperi
 - deformacija korita, 182
 - dimenzije, 169
 - izgradnja, 261
 - oblika T, 185
 - od gabiona, 176
 - od kamena, 173
 - protočni, 187
 - sa krilima, 172
 - tipovi, 167
 - usporavanje toka, 178
- Nasipi
 - drenažni sistemi, 241
 - efekti izgradnje, 393
 - erozija spoljašnja, 248
 - erozija unutrašnja, 249
 - filtracija, 228, 239
 - izgradnja, 264

- konstruktivni elementi, 224
- optimalna visina, 407
- prolom, 410
- razmak, 222
- rekonstrukcija, 267
- sanacija, 267
- seizmički uticaji, 252
- sleganje, 247
- stabilnost kosina, 243
- tipovi, 220
- Naturalno uredjenje vodotoka
 - inundacije, 373
 - kamene rampe, 359
 - nagib dna, 356
 - osnovna načela, 351
 - rečni ekosistemi, 342
 - režim voda, 349
 - riblje staze, 361
 - zaštita obala, 355
- Numerički modeli, 76
- Obaloutvrde, 101
 - filtri od geotekstila, 123
 - filtri peščani, 117
 - izgradnja, 256
 - kameni nabačaj, 104
 - konstruktivni elementi, 103
 - naturalno uredjenje, 355
 - nožica, 129, 143
 - od betonskih blokova, 148
 - od čeličnih talpi, 151
 - od gabiona, 138
 - od geoelemenata, 150
 - održavanje, 136
 - ukorenjenje, 134
 - uticaj leda, 159
 - uticaj talasa, 152
 - završni venac, 134
- Podloge, 12
 - ekološke, 39
 - ekonomske, 41
 - hidrauličke, 22
 - hidrološke, 12
 - kulturno-istorijske, 41
 - meteorološke, 40
 - psamološke, 24
 - sociološke, 41
 - topografske, 14
 - geološko-geomehaničke, 36
- Pragovi
 - izgradnja, 262
 - konstruktivni elementi, 209
 - lokalna erozija, 215
 - naturalno uredjenje, 357, 369
 - proračun, 210
 - zasipanje proloka, 215
- Prave paralelne gradjevine, 165
 - izgradnja, 260
- Pregrade
 - izgradnja, 262
 - konstruktivni elementi, 192
 - proračun, 192
- Projektna dokumentacija, 83
 - tehnički uslovi, 86
 - zaštita životne sredine, 85
- Projektovanje
 - fizički modeli, 80
 - kontrolni parametri trasiranja, 58
 - krivine (analitički oblici), 58
 - merodavni protoci/nivoi, 42
 - načela trasiranja, 53
 - niži (početni) nivo, 71
 - numerički modeli, 76
 - poprečni profil, 47
 - projektna dokumentacija, 83
 - ravnotežni nagib dna, 44
 - regulacione građevine, 48
 - regulacioni elementi, 42
 - stabilnost korita, 66
 - standardni nivo, 73
 - uzdužni profil, 43
 - višefazni pristup, 71
 - viši nivo, 76
- Prosecanje krivina, 275
- Ravnotežni nagib dna, 44
- Regulacija reka

- integralni pristup, 4
- motivi, 1
- neizvesnosti, 4
- planiranje, 6
- pravci razvoja, 7
- Regulacione građevine, 89, 101
 - kaskade, 52, 198
 - materijali, 90-101
 - naperi, 49, 167
 - nasipi, 220
 - obaloutvrde, 49
 - podela, 48
 - pragovi, 52, 208
 - prave paralelne, 49
 - pregrade, 52, 192
 - skretači, 216
- Regulacioni radovi
 - bagerovanje, 331
 - beotehnički, 268
 - izgradnja građevina, 256
 - pregradjivanje vodotoka, 293
 - prosecanje krivina, 275
 - skretanje vodotoka, 293
 - u Srbiji, 463
 - uredjenje ušća, 297
 - zaštita saobraćajnica, 301
- Skretači, 217, 358
- Stabilnost obala, 101
- Suspendovani nanos
 - merenje, 27
 - taložnici, 330
- Talasi izazvani plovidbom, 159
- Talasi izazvani vetrom, 152
- Topografske podloge
 - batimetrija, 20
 - LiDAR, 17
 - poprečni profili, 14
 - rečno korito, 20
 - situacioni planovi, 17
- Vučeni nanos
 - merenje, 24
 - pokretanje, 66
 - taložnici, 330
- Zaštita od poplava
 - aktivna, 416
 - akumulacije, 416
 - analiza šteta, 399
 - ekonomska opravdanost, 403
 - funkcije šteta, 439
 - hidrološke neizvesnosti, 383
 - investicione mere, 393
 - karte rizika, 436
 - karte ugroženosti, 433
 - kartiranje rizika, 431
 - klimatske promene, 388
 - ledene poplave, 427
 - neinvesticione mere, 430
 - osiguranje, 453
 - pasivna, 393
 - povratni periodi, 383-388
 - preventivne mere, 413
 - projektna dokumentacija, 460
 - prolom nasipa, 410
 - proračun štete, 441
 - rana najava, 449
 - rasteretni kanali, 422
 - retenzije, 417
 - tipologija poplava, 390
 - unutrašnje vode, 395
 - upravljanje rizikom, 457
 - urbana područja, 423
 - vrednost imovine, 438



Beleška o autoru. Dr Miodrag Jovanović je redovni profesor Građevinskog fakulteta u Beogradu u penziji. Autor je velikog broja naučnih i stručnih radova. Član je Akademije inženjerskih nauka Srbije i niza nacionalnih i međunarodnih profesionalnih udruženja.

<http://www.grf.bg.ac.rs/~mjovanovic/>



978-7518-216-0