UREĐENJE VODOTOKA

Dr Marina Babić Mladenović

INSTITUT ZA VODOPRIVREDU
„JAROSLAV ČERNI"

UREĐENJE VODOTOKA

Dr Marina Babić Mladenović

2018.

UREĐENJE VODOTOKA

Autor:

Marina Babić Mladenović

Recenzenti:

Prof. dr Stevan Prohaska
Prof. dr Slobodan Petković
Prof. dr Miodrag Jovanović

Izdavač:

Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd

Za izdavača:

Prof. dr Dejan Divac

ISBN 978-86-82565-51-2

Štampa:

Štamparija Radunić, Beograd

Korice, dizajn, prelom:

Miljan Truc

Tiraž:

300

Godina izdavanja:

2018.

Sva prava zadržana. Ni jedan deo ove knjige ne može biti reprodukovan, snimljen ili emitovan na bilo koji način: elektronski, mehanički, fotokopiranjem ili drugim vidom, bez pisane dozvole priređivača.

SADRŽAJ

1	**UVOD**	**1**
2	**PRIRODNI TOKOVI**	**5**
2.1	**Rečni sliv**	**5**
2.2	**Rečna dolina**	**6**
2.3	**Rečni tok**	**6**
3	**REČNA MORFOLOGIJA**	**9**
3.1	**Uticaji pod kojima se formira rečno korito**	**9**
3.1.1	Strujanje vode	9
3.1.2	Karakteristike materijala u rečnom koritu	11
3.1.3	Ostali uticaji	11
3.2	**Oblik rečnog korita**	**12**
3.2.1	Podužni profil	12
3.2.2	Rečna trasa	13
3.2.3	Poprečni profil	15
3.2.4	Morfološke analize	18
3.3	**Konfiguracija rečnog dna**	**19**
4	**MOTIVI UREĐENJA PRIRODNIH VODOTOKA**	**23**
4.1	**Zaštita od štetnog dejstva voda**	**23**
4.1.1	Stabilizacija i povećanje propusne sposobnosti osnovnog korita vodotoka	27
4.1.2	Zaštita od poplava	30
4.1.3.	Zaštita saobraćajne i druge infrastrukture	34
4.1.4	Obezbeđenje uslova za odvodnjavanje	34
4.1.5	Zaštita od erozije i bujica	35
4.1.6	Zaštita od leda	36
4.2	**Obezbeđenje uslova za racionalno korišćenje voda**	**38**
4.2.1	Vodozahvati	38
4.2.2	Brane i akumulacije	39
4.2.3.	Plovidba	40
4.2.4	Sport, kupanje, rekreacija	42
5	**PODLOGE ZA PROJEKTOVANJE UREĐENJA VODOTOKA**	**43**
5.1	**Uvodne napomene**	**43**
5.2	**Topografske i morfološke podloge**	**43**
5.2.1	Snimanje korita vodotoka	43

5.2.1.1 Snimanje suvih delova major korita 44
5.2.1.2 Snimanje delova korita pod vodom 45
5.2.2 Prikaz rečnog korita 47
5.2.2.1 Situacioni plan 47
5.2.2.2 Poprečni profil 48
5.2.2.3 Podužni profil 49
5.3 Hidrološke podloge 50
5.3.1 Hidrološki izučeni i neizučeni vodotoci 50
5.3.2 Merenje nivoa vode 51
5.3.3 Merenje protoka vode 53
5.3.4 Kriva protoka 55
5.3.5 Analiza i prikaz hidroloških podataka 56
5.4 Podaci o režimu leda 59
5.5 Hidrauličke podloge 61
5.6 Podaci o režimu nanosa (psamološke podloge) 62
5.7 Geološko-geomehaničke podloge 62
5.8 Meteorološke podloge 63
5.9 Biološke podloge 64
5.10 Ekonomske podloge 64
5.11 Ostale podloge 64

6 REČNA HIDRAULIKA 65

6.1 Hidrauličke karakteristike prirodnih tokova 66
6.1.1 Prostorna dimenzija 66
6.1.2 Vremenska dimenzija 68
6.1.3 Uticaji na rečni tok 68
6.1.3.1 Uticaj gravitacije 68
6.1.3.2 Turbulencija 69
6.1.3.3 Efekat kontura toka 70
6.2 Hidrauličko modeliranje prirodnih tokova 72
6.2.1 Metode hidrauličke analize 72
6.2.2 Podaci za hidrauličko modeliranje 73
6.2.3 Kalibracija i verifikacija hidrauličkog modela 74
6.2.4 Preporuke 74
6.3 Linijski modeli 76
6.3.1 Osnovne jednačine 76
6.3.2 Ustaljeno jednoliko tečenje 76
6.3.3 Ustaljeno nejednoliko tečenje 77
6.3.4 Neustaljeno tečenje 79
6.3.5 Linijski otpori 80

6.3.6 Primeri 1D hidrauličkih proračuna 84
6.3.6.1 1D hidraulički proračun ustaljenog tečenja u softveru HEC-RAS 84
6.3.6.2 1D hidraulički proračun neustaljenog tečenja u softveru HEC-RAS 85
6.3.6.3 1D hidraulički proračun neustaljenog tečenja u softveru MIKE 11 86
6.4 Ravanski i prostorni modeli 89
6.4.1 Ravanski numerički modeli 89
6.4.2 Prostorni numerički modeli 91
6.5 Fizički modeli 91

7 REČNI NANOS 93

7.1 Uvodne napomene 93
7.2 Nastanak rečnog nanosa 93
7.3 Fizička svojstva rečnog nanosa 96
7.3.1 Fizička svojstva pojedinačnog zrna 96
7.3.2 Fizička svojstva mešavine nanosa 97
7.4 Podela rečnog nanosa 98
7.5 Koncentracija i pronos rečnog nanosa 100
7.6 Merenja i analize nanosa 101
7.6.1 Nanos iz dna 101
7.6.1.1 Zahvatanje uzoraka nanosa iz dna 101
7.6.1.2 Određivanje krupnoće nanosa 102
7.6.2 Suspendovani nanos 103
7.6.2.1 Zahvatanje uzoraka suspendovanog nanosa 104
7.6.2.2 Laboratorijska analiza suspendovanog nanosa 105
7.6.2.3 Terensko merenje pronosa suspendovanog nanosa 105
7.6.2.4 Monitoring suspendovanog nanosa 107
7.6.3 Vučeni nanos 108
7.6.4 Analiza podataka merenja nanosa 110
7.7 Pokretanje rečnog nanosa 111
7.7.1 Parametri koji utiču na kretanje rečnog nanosa 111
7.7.2 Početak kretanja vučenog nanosa 112
7.7.2.1 Kritična brzina 112
7.7.2.2 Kritični tangencijalni napon 113
7.7.3 Početak kretanja nanosa u suspenziji 115
7.8 Proračun pronosa nanosa 115
7.8.1 Pronos vučenog nanosa 115
7.8.2 Pronos suspendovanog nanosa 117
7.8.3 Pronos ukupnog koritoformirajućeg nanosa 117
7.8.4 Preporuke 118

8 DEFORMACIJA REČNOG KORITA 121

8.1 Dinamička ravnoteža aluvijalnog vodotoka 121

8.2 Opšta deformacija rečnog korita 121

8.2.1 Opšta deformacija rečnog korita na potezu akumulacije 122

8.2.2 Opšta deformacija rečnog korita u zoni mostovskog suženja 123

8.2.3 Drugi vidovi opšte erozije 125

8.2.3.1 Erozija korita tokom prolaska poplavnih talasa 125

8.2.3.2 Erozija rečnog korita nizvodno od brane 125

8.2.3.3 Erozija izazvana regulacionim radovima 126

8.2.3.4 Erozija izazvana bagerskim radovima 126

8.2.3.5 Erozija izazvana promenama u rečnom slivu 126

8.2.4 Moguće mere za kontrolu procesa opšte deformacije rečnog korita 127

8.3 Lokalna deformacija rečnog korita 128

8.3.1 Lokalna deformacija rečnog korita u zoni mostovskih stubova 128

8.3.2 Lokalna deformacija rečnog korita u zoni poprečnih građevina 131

8.3.3 Erozija nizvodno od poprečnih objekata 132

9 REGULACIONE GRAĐEVINE 133

9.1 Podela i osnovni pojmovi 133

9.2 Raspored regulacionih građevina u rečnom koritu 134

9.2.1 Izbor regulacionih elemenata 134

9.2.1.1 Korišćenje hidrauličke analize za izbor regulacionih elemenata 135

9.2.1.2 Korišćenje morfološke analize za izbor regulacionih elemenata 135

9.2.2 Primeri dobre prakse 136

9.2.2.1 Trasa regulisanog korita 136

9.2.2.2 Širina regulisanog korita 136

9.2.2.3 Tip i raspored regulacionih građevina 137

9.3 Preporuke za projektovanje regulacionih građevina 138

9.4 Materijali za izvođenje regulacionih građevina 141

9.4.1 Prirodni materijali 141

9.4.1.1 Kamen 141

9.4.1.2 Šljunak i pesak 141

9.4.1.3 Glina, ilovača, humus i drugi zemljani materijali 142

9.4.1.4 Drvo 142

9.4.1.5 Biljni materijal 143

9.4.2 Veštački materijali 143

9.4.2.1 Beton 143

9.4.2.2 Čelik 143

9.4.2.3 Sintetički materijali 144

9.4.2.4 Biotekstil 146
9.4.3 Prefabrikati 146
9.4.3.1 Prefabrikati od prirodnih materijala 146
9.4.3.2 Gabioni 149

10 NASIPI I DRUGI OBJEKTI VAN REČNOG KORITA 151

10.1 Nasip 151
10.1.1 Podela i osnovne karakteristike nasipa 151
10.1.2 Projekat nasipa 152
10.1.2.1 Trasa nasipa 152
10.1.2.2 Dimenzije tela nasipa 153
10.1.2.3 Materijali u telu nasipa 154
10.1.2.4 Mere zaštite nasipa od nepovoljnih uticaja velike vode 155
10.1.2.5 Proračuni filtracione i statičke stabilnosti nasipa 157
10.1.3 Održavanje nasipa 158
10.2 Zaštitni zid 159
10.3 Kamena deponija 159
10.4 Usmeravajući nasip 159

11 REGULACIONE GRAĐEVINE U REČNOM KORITU 161

11.1 Obaloutvrda 161
11.1.1 Tipovi obaloutvrda 161
11.1.2 Izbor tipa kose obaloutvrde 162
11.1.3 Konstrukcija kose obaloutvrde 164
11.1.3.1 Nožica obaloutvrde 164
11.1.3.2 Podloga nožice obaloutvrde 164
11.1.3.3 Filtarski sloj 164
11.1.3.4 Obloga od kamena 166
11.1.3.5 Obloga od betona 168
11.1.3.6 Druge vrste obloge 169
11.1.3.7 Nagibi obloge i prelazne deonice 170
11.1.4 Projektovanje i izgradnja obaloutvrde 171
11.1.5 Održavanje obaloutvrde 172
11.2 Kejski zid 174
11.3 Prava paralelna građevina 175
11.4 Usmeravajuća ili strujna građevina 176
11.5 Naperi 176
11.6 Kratki naperi 179
11.7 Potopljeni naperi 179
11.8 Ševroni 179

11.9 Pregrade 180
11.10 Pragovi 181
11.10.1 Pragovi u funkciji kontrole podužnog pada vodotoka 181
11.10.2 Pragovi za zasipanje dubokih delova aluvijalnog korita 182

12 REGULACIONI RADOVI 183
12.1 Prosek rečne krivine 183
12.2 Uređenje rečnih ušća 184
12.3 Bagerovanje nanosa 185
12.3.1 Ciljevi bagerovanja 185
12.3.2 Tehnologija bagerovanja 186
12.3.3 Tipovi bagera 187
12.3.3.1 Mehanički bageri 187
12.3.3.2 Hidraulički bageri 189
12.3.3.3 Specijalne tehnike bagerovanja 191
12.3.4 Odlaganje izbagerovanog materijala 192
12.3.5 Uticaj bagerovanja i deponovanja nanosa na životnu sredinu 193
12.3.6 Preporuke za bagerovanje 193

13 IZVOĐENJE I ZAŠTITA PRELAZA PREKO VODOTOKA 195
13.1 Propusti 195
13.2 Mostovi 196
13.2.1 Položaj donje ivice konstrukcije mosta 197
13.2.2 Zaštita mostovskih stubova 200
13.2.3 Zaštita oporaca mosta 202
13.3 Cevovodi 202
13.3.1 Izvođenje prelaza provlačenjem cevovoda ispod korita 202
13.3.2 Izvođenje prelaza klasičnom tehnologijom 203

14 REGULACIJA VODNOG REŽIMA 205
14.1 Uređenje sliva 205
14.1.1 Protiverozioni radovi i mere 205
14.1.1.1 Tehnički protiverozioni radovi 205
14.1.1.2 Biotehnički i biološki protiverozioni radovi 207
14.1.2 Druge mere za uređenje sliva 207
14.2 Uređenje korita vodotoka 209
14.3 Objekti za prihvat i transformaciju talasa velikih voda 211
14.3.1 Akumulacije 211
14.3.2 Retenzije 212
14.3.2.1 Čeone retenzije 212

14.3.2.2 Bočne (nizijske) retenzije 214
14.4 Rasteretni i obodni kanali 215
14.4.1 Rasteretni kanal 215
14.4.2 Obodni kanal 215
14.5 Objekti za kontrolu nivoa vode 216

15 UPRAVLJANJE RIZIKOM OD POPLAVA 217
15.1 Uzroci nastanka i karakteristike velikih voda 217
15.1.1 Uzroci nastanka velikih voda 217
15.1.2 Osnovne karakteristike velikih voda 219
15.1.3 Specifičnosti velikih voda na bujičnim tokovima 221
15.2 Štete od poplava 223
15.2.1 Uslovi od kojih zavisi visina šteta od poplava 223
15.2.2 Kategorije šteta od poplava 224
15.3 Rizik od poplava 226
15.3.1 Komponente rizika od poplava 226
15.3.2 Mere za smanjenje ugroženosti od poplava 229
15.3.3 Mere za smanjenje izloženosti poplavama 230
15.3.4 Mere za smanjenje osetljivosti na poplave 230
15.3.5 Cikličnost upravljanja rizikom od poplava 231
15.3.6 Strategije za smanjenje rizika od poplava 231
15.4 Zoniranje plavnih područja 233
15.4.1 Potreba za zoniranjem plavnih područja 233
15.4.2 Realne i potencijalne plavne zone 234
15.4.3 Izrada i korišćenje karata plavnih zona 236
15.4.3.1 Karta ugroženosti od poplava 237
15.4.3.2 Karta rizika od poplava 238

16 ODBRANA OD POPLAVA 239
16.1 Organizacija i faze odbrane od poplava 239
16.1.1 Služba za odbranu od poplava 239
16.1.2 Faze odbrane od poplava 240
16.2 Redovno održavanje objekata 241
16.2.1 Redovno održavanje nasipa 242
16.2.2 Redovno održavanje korita vodotoka 243
16.2.3 Redovno održavanje objekata za zaštitu od bujica i erozije 243
16.2.4 Redovno održavanje brana, akumulacija i retenzija 244
16.3 Negativne pojave na nasipima i primena interventnih mera 244
16.3.1 Identifikacija slabih mesta na nasipima 244
16.3.2 Zaštita nasipa od prelivanja 246

16.3.2.1 Zaštita od prelivanja na većim dužinama 247
16.3.2.2 Zaštita od prelivanja na pojedinim lokalitetima 250
16.3.2.3 Zaštita od prelivanja savremenijim sredstvima 251
16.3.3 Zaštita obala minor korita od erozije 252
16.3.4 Zaštita nebranjene kosine nasipa od erozije 253
16.3.5 Zaštita od prodora vode kroz telo nasipa 253
16.3.5.1 Prokvašenja i procurenja nasipa 253
16.3.5.2 Intervencije na nebranjenoj kosini nasipa 254
16.3.5.3 Intervencije na branjenoj kosini nasipa 255
16.3.6 Zaštita od negativnih pojava u tlu sa branjene strane nasipa 255
16.3.7 Negativne pojave u zoni objekata u telu nasipa 258
16.3.7.1 Objekti i njihov uticaj na nasipe 258
16.3.7.2 Negativne pojave i mere u zonama ustava i crpnih stanica 258
16.3.8 Zaštita gradilišta na odbrambenim nasipima 260
16.4 Vanredne mere 261
16.4.1 Zatvaranje proboja nasipa 262
16.4.2 Izgradnja lokalizacionih nasipa 262
16.4.3 Evakuacija vode iz poplavljenog područja 264
16.4.4 Sanacija proboja i ispusta 264

17 KONTROLA LEDA 265
17.1 Preventivne mere kontrole leda 265
17.2 Operativne metode kontrole leda 266
17.2.1 Primena ledolomaca 266
17.2.2 Miniranje leda 268
17.2.3 Ostale metode kontrole leda 268

18 UREĐENJE VODOTOKA U SVETLU ZAŠTITE KVALITETA VODA 269
18.1 Kvalitet rečne vode 269
18.2 Hidromorfološke promene 270
18.3 Razlike između klasične i “naturalne” regulacije vodotoka 273
18.4 Radovi na poboljšanju ekološkog statusa površinskih voda 274
18.4.1 Renaturalizacija korita 274
18.4.1.1 Mere renaturalizacije minor korita 274
18.4.1.2 Mere renaturalizacije major korita (obnavljanja plavnih područja) 275
18.4.2 Riblje staze 276
18.4.2.1 Tehničke riblje staze 276
18.4.2.2 Prirodne riblje staze 277

19 PROJEKAT UREĐENJA VODOTOKA 279

19.1 Faze projekta uređenja vodotoka 279
19.1.1 Predlog projekta 279
19.1.2 Projektovanje 279
19.1.3 Izvođenje 280
19.1.4 Operativna faza projekta 280
19.2 Integralno sagledavanje problema 280

20 KONTROLA ZASIPANJA AKUMULACIJA 285

20.1 Nastanak i raspored nanosnih naslaga u akumulaciji 285
20.2 Posledice zasipanja akumulacija 286
20.3 Faze procesa zasipanja akumulacije 288
20.4 Istraživanje procesa zasipanja akumulacije 289
20.4.1 Prethodna analiza zasipanja akumulacije 293
20.4.2 Prognoza zasipanja akumulacije 297
20.4.3 Praćenje procesa zasipanja akumulacije 299
20.5 Koncept održivog razvoja i upravljanja akumulacijama 300
20.6 Mere kontrole zasipanja akumulacija 301
20.6.1 Mere za smanjenje ulaza nanosa u akumulaciju 302
20.6.1.1 Protiverozione mere i radovi 302
20.6.1.2 Skretanje nanosa 304
20.6.2 Mere za sprečavanje istaložavanja nanosa u akumulaciji 305
20.6.2.1 Ispuštanje vode opterećene nanosom 305
20.6.2.2 Ispuštanje mutnih struja 307
20.6.3 Mere za uklanjanje nanosnih naslaga 308
20.6.3.1 Ispiranje nanosa 308
20.6.3.2 Iskop - bagerovanje istaloženog nanosa 313
20.6.3.3 Hidro-aspirator ili sifon 314
20.6.4 Mere za kompenzaciju izgubljene zapremine 315
20.6.4.1 Nadvišenje brane 315
20.6.4.2 Dovođenje vode iz susednog sliva 315
20.7 Primena principa upravljanja nanosom u planiranju vodoprivrednih objekata 315
20.7.1 Izbor lokacije za branu 315
20.7.2 Izbor strategije za kontrolu zasipanja akumulacije 316

LITERATURA 317

1 UVOD

Režim prirodnog vodotoka je kompleksan i dinamičan i obuhvata sve promene koje se dešavaju tokom vremena, pod uticajem promene meteoroloških uslova (padavine, temperature, evapotranspiracija) i uslova u samom slivu (vegetacija, zasićenost zemljišta vlagom itd.). Ovaj termin obuhvata sve promene kvantiteta i kvaliteta površinskih voda u prostoru i vremenu, kao i promene drugih povezanih parametara, kao što su količine i karakteristike nanosa i leda.

Režimi prirodnih vodotoka se bitno razlikuju, jer zavise od njihovog geografskog položaja, veličine sliva, klimatsko-meteoroloških, topografskih, geoloških, pedoloških i drugih karakteristika sliva, kao i od načina korišćenja zemljišta.

Od povremenih tokova u pustinjskim predelima do reka koje nastaju topljenjem lednika, svaka reka ima svoje specifičnosti. Takođe, bitno se razlikuje režim voda u urbanizovanim slivovima i slivovima na kojima su veće površine pokrivene vegetacijom.

U svim područjima sveta razvoj urbanih, privrednih i infrastrukturnih sistema se oduvek odvijao u rečnim dolinama, zbog prednosti koje takvom razvoju pružaju vodotoci.

Ljudi su radili na uređenju vodotoka od početka istorije, da bi koristili vodne resurse, zaštitili se od poplava ili obezbedili kretanje duž ili preko rečnog toka [79]. Zaštita od poplava i uređenje vodotokova su vremenom postajali sve kompleksniji i složeniji poduhvati, jer su se, s jedne strane, postavljali sve oštriji kriterijumi za zaštitu sve većeg broja ljudi i sve vrednijih materijalnih dobara na ugroženim područjima, dok su se, s druge strane, postavljali sve raznovrsniji uslovi i kriterijumi za korišćenje, ali i za zaštitu voda i samih vodotoka.

Pod **uređenjem prirodnog vodotoka** podrazumeva se proces primene planskih aktivnosti na izmeni trase, karakteristika rečnog korita ili režima toka kojima se:

- planski smanjuju štete od poplava i drugih nepovoljnih procesa na vodotoku,
- obezbeđuju uslovi za racionalno korišćenje vodotoka za plovidbu, vodosnabdevanje, hidroenergetiku, hidromelioracije, rekreaciju i druge potrebe,
- štiti i unapređuje životna sredina.

U današnje vreme se rečni tok posmatra kao ekosistem sa nekoliko podsistema: fizički podsistem (definišu ga rečna morfologija, hidrološki i hidraulički parametri, kvalitet vode), biološki podsistem (biljni i životinjski svet, biološki faktori i procesi) i "humani" podsistem (uticaj čoveka). Stoga pristup planiranju uređenja vodotoka mora biti integralan, "održiv" i multidisciplinaran [80].

Specifičnost uređenja (ili regulacije) prirodnih vodotoka kao hidrotehničke discipline je u tome što posle izvođenja radova sledi odgovor prirode, koga nije lako, a često nije ni moguće predvideti. Narušavanje prirodnog režima vodotoka, radovima u koritu ili izmenom režima voda i nanosa ima za posledicu niz kratkoročnih ili dugoročnih morfoloških procesa koji vode ka uspostavljanju novog ravnotežnog stanja.

Rešavanje problema u ovoj oblasti hidrotehnike zahteva znanje, iskustvo, sposobnost sinteze, inženjersku intuiciju, a obavezno je korišćenje prethodno stečenih znanja iz brojnih naučnih disciplina kao što su: mehanika fluida, statistika, hidraulika, hidrologija, geologija, geodezija i mehanika tla.

Inženjerski pristup u oblasti uređenja vodotoka podrazumeva:

- izučavanje prirodnih (fizičkih) uslova,
- kvantitativnu ocenu parametara fizičkih procesa,
- postizanje dovoljno dobre tačnosti (ne zahteva se "apsolutna tačnost" već približna rešenja),
- uvođenje većeg faktora sigurnosti radi kompenzacije neizvesnosti,
- prilagođavanje obima i nivoa inženjerske analize vrednosti objekata ili radova,
- prilagođavanje rešenja prirodnim uslovima vodotoka, kako bi se postigla što veća sigurnost i ekonomičnost, uz što manji uticaj na životnu sredinu.

Iako je fokus ove knjige na prirodnim votokovima, treba reći da se regulacioni radovi primenjuju i na veštačkim vodotokovima - kanalima koji se koriste za plovidbu, odvodnjavanje, navodnjavanje ili druge namene. Osnovna razlika između prirodnih i veštačkih vodotoka leži u tome što kanale odlikuju manje promene geometrije, nivoa vode i uslova tečenja. Međutim, kako je većina kanala usečena u prirodno ili u sabijeno, prethodno nasuto tlo i ovde postoji potreba da se stabilizuju dno i obale korita, tako da nema promena trase i šteta na okolnoj infrastrukturi. Radovi na zaštiti dna i obala kanala su potrebni u zonama objekata koji izazivaju lokalno povećanje brzine i turbulencije (mostovi, ustave, prevodnice), na potezima gde obale imaju nepovoljne geotehničke karakteristike, a erozija nije dozvoljena zbog blizine različitih infrastrukturnih objekata. Takođe, radovi na zaštiti su potrebni i na plovnim kanalima jer plovila izazivaju dopunsko strujanje i talase.

Ova knjiga se sastoji od 20 poglavlja.

Poglavlje **2. Prirodni tokovi** daje osnovne pojmove, kao što su rečni sliv i rečna dolina i prikazuje osnovne karakteristike rečnog toka, od izvora do ušća. U sledećem poglavlju **3. Rečna morfologija** opisani su uticaji pod kojima se formira rečno korito, karakteristike rečnog korita u 3 dimenzije (podužni profil, trasa i poprečni profil) i konfiguracija rečnog dna, sa kratkim prikazom nanosnih formi u rečnom koritu.

Poglavlje **4. Motivi uređenja prirodnih vodotoka** je izuzetno važno, jer čitaocu prikazuje spektar radova koji se preduzimaju na rekama u cilju zaštite od štetnog dejstva voda (stabilizacija i povećanje propusne sposobnosti osnovnog korita vodotoka, zaštita od poplava, zaštita saobraćajne i druge infrastrukture, obezbeđenje uslova za odvodnjavanje, zaštita od erozije i bujica i zaštita od leda), ali i obezbeđenja uslova za racionalno korišćenje voda.

U poglavlju **5. Podloge za projektovanje uređenja vodotoka** dat je pregled terenskih istražnih radova i analiza koje treba izvršiti da bi se pripremile podloge za projekat. Vrsta, tip i detaljnost podloga zavise od cilja i faze projekta i mnogih drugih faktora. Prikazane su metode za pripremu topografskih i morfoloških podloga, a posebno za snimanja korita vodotoka, s obzirom da su ona specifična i rade se samo u okviru projekata uređenja vodotoka. Prikazane su i hidrološke podloge, u obimu koji je potreban za razumevanje širokog dijapazona zadataka koji se javljaju u okviru projekata uređenja vodotoka. Takođe je u ovom poglavlju dat prikaz podataka o režimu leda, kao i ostalih podloga koje su značajne za projekte uređenja vodotoka, osim hidrauličkih i psamoloških kojima su posvećena posebna poglavlja.

U poglavlju **6. Rečna hidraulika** opisane su hidrauličke karakteristike prirodnih tokova i date osnovne jednačine i primeri hidrauličke analize, primenom numeričkih modela (linijskih, ravanskih ili prostornih) ili fizičkih modela.

Poglavlje **7. Rečni nanos** objašnjava kako nastaje nanos koji se kreće u vodotocima. Opisuje osnovne karakteristike nanosa, kao i metode merenja i analize različitih komponenti rečnog nanosa. Takođe, objašnjeno je kako dolazi do pokretanja rečnog nanosa i date neke od raspoloživih formula za proračun pronosa nanosa, uz određene preporuke za projektanta.

U poglavlju **8. Deformacija rečnog korita** opisano je zašto dolazi do poremećaja dinamičke ravnoteže aluvijalnog vodotoka i pojava opšte i lokalne deformacije rečnog korita.

U poglavlju **9. Regulacione građevine** data je njihova podela i osnovni pojmovi i uputstva za izbor regulacionih elemenata. Takođe, pobrojani su prirodni, veštački materijali i prefabrikati koji se koriste za izvođenje regulacionih građevina.

Poglavlje **10. Nasipi i drugi objekti van rečnog korita** daje podelu i osnovne karakteristike ove klase objekata (nasip, zaštitni zid i usmeravajući nasip), elemente konstrukcije i druge preporuke.

U poglavlju **11. Regulacione građevine u rečnom koritu** prikazane su najčešće korišćeni tipovi ovih građevina: obaloutvrda, kejski zid, prava paralelna građevina, usmeravajuća građevina, naperi, kratki naperi, potopljeni naperi, ševroni, pregrade i pragovi.

U poglavlju **12. Regulacioni radovi** opisani su principi izvođenja proseka rečnih krivina i uređenja rečnih ušća, kao i ciljevi, tehnologija i drugi elementi od značaja za bagerovanje nanosa iz rečnih korita.

Poglavlje **13. Izvođenje i zaštita prelaza preko vodotoka** opisuje principe projektovanja i zaštite propusta i mostova, kao i izvođenja i zaštite cevovoda koji prelaze preko rečnih korita.

U poglavlju **14. Regulacija vodnog režima** opisani su radovi na uređenju rečnih slivova, rečnih korita, objekti za prihvat i transformaciju talasa velikih voda (akumulacij, retenzije, rasteretni i obodni kanali), kao i objekti za kontrolu nivoa vode.

U poglavlju **15. Upravljanje rizikom od poplava** opisani su uzroci nastanka i karakteristike velikih voda, štete od poplava, kao i komponente i mere za smanjenje rizika od poplava. Takođe, istaknut je značaj zoniranja plavnih područja i dat prikaz primera karata plavnih zona.

Poglavlje **16. Odbrana od poplava** opisuje organizaciju i faze odbrane od poplava. Takođe, opisane su mere redovnog održavanja objekata, kao osnovnog preduslova za uspešnu odbranu od poplava. Prikazane su negativne pojave na nasipima i interventne mere koje se primenjuju u različitim slučajevima.

U poglavlju **17. Kontrola leda** prikazane su preventivne i operativne mere koje se primenjuju u ovoj oblasti zaštite od štetnog dejstva voda.

U poglavlju **18. Uređenje vodotoka u svetlu zaštite kvaliteta voda** opisane su hidromorfološke promene kvaliteta i date preporuke za primenu klasične ili "naturalne" regulacije rečnih korita. Takođe, opisani su radovi koji se u svetu preduzimaju radi poboljšanja ekološkog statusa površinskih voda, kao što je „renaturalizacija" korita, rehabilitacija plavnih područja i izvođenje ribljih staza.

U poglavlju **19. Projekat uređenja vodotoka** opisane su faze projekta, od predloga, preko projektovanja i izvođenja do operativne faze.

Poglavlje **20. Kontrola zasipanja akumulacija** prikazuje koncept održivog razvoja i upravljanja akumulacijama, mere kontrole (smanjenje ulaza nanosa u akumulaciju, sprečavanje istaložavanja nanosa u akumulaciji, uklanjanje nanosnih naslaga, kompenzacija izgubljene zapremine) i druge elemente za uspešno upravljanje nanosom.

Za pisanje ove knjige korišćeni su primeri iz brojnih projekata koji su urađeni u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (IJČ) u poslednjih 30 godina, ali i literatura koja je danas dostupna i na internetu.

Preporučuje se čitaocu da, korišćenjem linkova koji su dati u spisku literature ili u naslovima slika, uđe u svet međunarodne zajednice inženjera koji se bave izučavanjem i projektovanjem uređenja vodotoka i detaljnije izuči specifične probleme.

2 PRIRODNI TOKOVI

2.1 Rečni sliv

Prirodni tokovi najčešće nastaju kao posledica oticanja vode koja na zemljinu površinu dospeva iz atmosfere u vidu padavina (kiše ili snega) ili isticanjem iz podzemlja ("vrelo"), a mogu nastati i isticanjem iz jezera ili topljenjem glečera. Pod dejstvom gravitacije, voda se sliva sa područja na višoj nadmorskoj visini u niža područja, uglavnom kroz mrežu otvorenih prirodnih tokova (potoka, rečica i reka).

Teritorija sa koje se površinske vode slivaju u prirodni vodotok se naziva **rečni sliv**. Svaki sliv odlikuje specifičan **režim vode i nanosa**, odnosno posebne karakteristike formiranja i promena protoka vode i pronosa nanosa tokom vremena. Od oblika sliva zavisi i dinamika formiranja oticaja, a naročito velikih voda.

Mreža otvorenih prirodnih tokova u određenom rečnom slivu se naziva **hidrografska mreža**, a od susednog sliva odvaja je vododelnica - linija koja ide najvišim tačkama terena između dva sliva.

Paralelno sa oticajem površinom terena, formira se oticaj kroz podzemlje. Zato je bitno razlikovati **rečni (orografski) sliv** (slika 2.1) odnosno teritoriju sa koje se sve površinske vode slivaju u jednu tačku (ušće) i **geološki sliv** (slika 2.2), koji pored površinskih, obuhvata i podzemne vode koje prihranjuju vodotok tokom sušnog perioda godine. U karstnim područjima se rečni i geološki sliv mogu bitno razlikovati jer podzemne vode mogu da prelaze iz rečnog jednog sliva u drugi.

Svaki prirodni vodotok ima dve značajne tačke: izvor i ušće.

Slika 2.1: Rečni sliv
(Izvor: igeogers.weebly.com)

Slika 2.2: Geološki sliv
(Izvor: h2ohero.org)

Svaki prirodni vodotok ima dve značajne tačke: izvor i ušće u drugi (veći) vodotok, jezero ili more.

Brojne reke izviru iz podzemlja (na primer reka Bosna), a postoje reke koje ističu iz jezera (primer je reka Lim koja ističe iz Plavskog jezera u Crnoj Gori). Reka može da nastane spajanjem dva manja vodotoka, kao što reka Drina nastaje spajanjem Pive i Tare u Crnoj Gori, reka Sava spajanjem Save Dolinke i Save Bohinjke u Sloveniji, a Velika Morava spajanjem Južne i Zapadne Morave. U visokim planinama reke nastaju topljenjem glečera.

Dužina prirodnog vodotoka, odnosno rastojanje od izvora do ušća, može biti od nekoliko stotina metara (primer je reka Vrelo, desna pritoka Drine, duga 365 m) do više hiljada kilometara (reka Nil je duga 6650 km, reka Amazon 6400 km itd.).

Reke ponornice su specifičnost karstnih područja, jer se poniru u jamu i nastavljaju tok kroz podzemlje. Najpoznatija ponornica na Balkanu je reka Trebišnjica u Hercegovini.

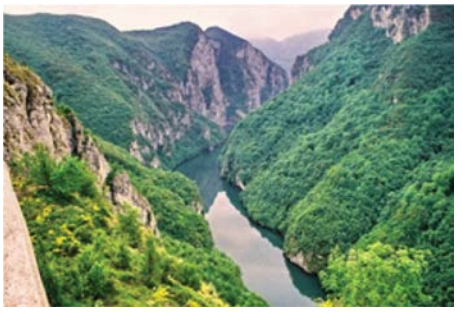
2.2 Rečna dolina

Rečna dolina je prirodna kotlina duž koje se pruža rečni tok. Nastaje kao posledica erozije izazvane tokom vode (fluvijalna erozija). Rečnu dolinu odlikuje postojanje **rečnih terasa** (slika 2.3), pomoću kojih se može pratiti njen razvoj. Naime, svaka rečna terasa označava jedan period geomorfološkog razvoja korita u kome je ono bilo u stanju privremene ravnoteže.

Slika 2.3: Šematski prikaz rečne doline sa rečnim terasama (Izvor: www4.uwsp.edu/geo/faculty/lemke/geomorphology)

Rečna dolina usečena u aluvijalne slojeve ima oblik slova „U“. Kada reke probijaju put kroz planine, nastaju specifične rečne doline oblika slova „V“. To su klisure (sa dubinom koja je približno jednaka polovini rastojanja između vrhova strana i nagibom strana oko 45° - primer je Sićevačka klisura na slici 2.4) i kanjoni (veoma duboke rečne doline, sa nagibom strana oko 60° - primer je kanjon Vrbasa na slici 2.5).

Slika 2.4: Sićevaćka klisura (Srbija) (Izvor: juznasrbija.info)

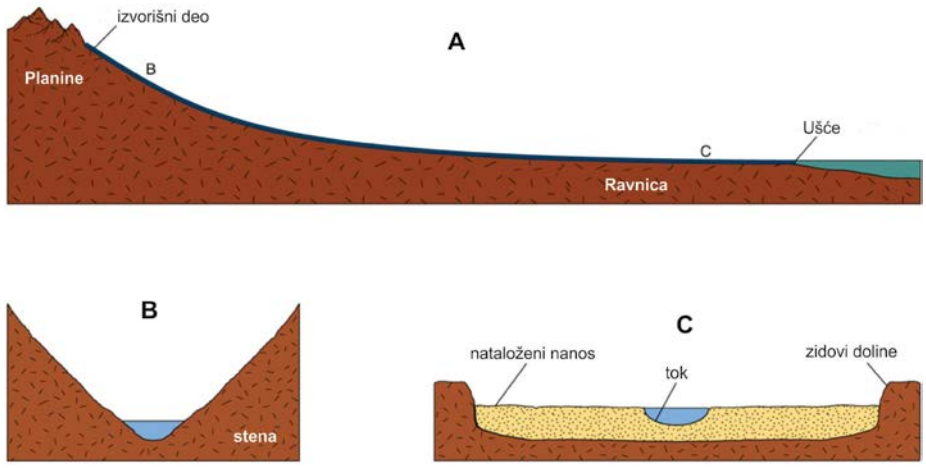


Slika 2.5: Kanjon Vrbasa (BiH) (Izvor: banjaluka.net)

2.3 Rečni tok

Generalno se tok jedne reke od izvora do ušća (slika 2.6) može podeliti na tri dela: gornji, srednji i donji tok.

Gornji tok karakterišu veliki uzdužni pad dna korita (iznad 1%), nagle promene hidroloških i hidrauličkih parametara toka i velika energija toka (buran režim tečenja). Odlikuje ga intenzivna dubinska erozija, u kojoj nastaje uska dolina sa strmim bokovima (karakterističan “V” profil). Kako je ovo zona produkcije nanosa (erozije ili degradacije korita), u dnu se kreće veoma krupan rečni nanos. Rečna trasa vrlo malo krivuda. Reke se u gornjem toku najčešće koriste samo za hidroenergetsku proizvodnju.



Slika 2.6: Podužni profil i tipični poprečni profili reke: A – podužni profil reke, B – tipičan poprečni profil u izvorišnom delu, C – tipičan poprečni profil u donjem toku reke (Izvor: www.geocaching.com)

Srednji tok reke odlikuje manji uzdužni pad dna (0,5 do 5 ‰) i umerenije promene hidroloških i hidrauličkih parametara. Korito je često razuđeno (sa više rukavaca i ada), a sa smanjenjem uzdužnog pada javlja se sve veća tendencija krivudanja. Rečni nanos je sitniji nego u gornjem toku, a prisutni su i erozija i zasipanje korita. Posmatrano u dužem vremenskom periodu, korito je stabilno jer postoji ravnoteža između energije toka i količina nanosa koji pristiže sa gornjeg toka. Rečna dolina ima veću širinu i blaže nagibe kosina. U srednjem toku postoji više mogućnosti za korišćenje rečnih voda.

Donji tok počinje ulaskom reke u ravnicu, pa ga odlikuje mali uzdužni pad (manji od 1 ‰). Ovo je zona zasipanja (izdizanja ili agradacije korita), u kojoj se zadržava nanos prispeo sa sliva. U donjem toku reka teče kroz sopstveni nanos (aluvijum), otuda izrazi „aluvijalno korito“ i „aluvijalni vodotok“. Rečno korito formirano u relativno sitnom nanosu je nestabilno, sa izraženom bočnom erozijom i meandrima, a rečna dolina je široka, sa veoma blagim nagibom kosina. U donjem toku moguće je kompleksno korišćenje voda, uključujući i plovidbu (na većim rekama).

Pored prethodno prikazane, postoji i podela prirodnih tokova prema geomorfološkim i hidrološkim karakteristikama. U njoj se razlikuju sledeće kategorije:

(a) Stalni ili povremeni **bujični tokovi**, koje odlikuju velike varijacije protoka, kao i nagle i kratkotrajne poplave, u kojima se pokreće velika količina nanosa;

(b) **Brdsko-planinski tokovi** u višim delovima sliva, koje odlikuje veliki uzdužni nagib korita, silovit režim tečenja i krupan nanos u dnu i

(c) **Ravničarski tokov**i u nižim delovima sliva, sa malim uzdužnim nagibom dna korita, mirnim režimom tečenja i sitnim nanosom.

Ova podela je uslovna jer ista reka u gornjem toku može imati bujični, a u donjem toku ravničarski karakter. Na slikama 2.7 i 2.8 prikazan je primer reke Drine, koja u gornjem toku ima karakteristike brdsko-planinskog toka, dok je u donjem toku tipičan ravničarski vodotok.

Slika 2.7: Gornji tok reke Drine (Izvor: tara-raft.com)

Slika 2.8: Donji tok reke Drine (Izvor: IJČ)

3 REČNA MORFOLOGIJA

Rečna morfologija je nauka koja se bavi proučavanjem oblika rečnog korita (poprečnih preseka, uzdužnog profila, trase rečnog toka), kao i zavisnosti između morfoloških karakteristika vodotoka i osnovnih prirodnih faktora koji na njih utiču (hidroloških, hidrauličkih, psamoloških i drugih).

Morfološke analize posebno su značajne u slučaju **aluvijalnih tokova** odnosno rečnih tokova čije je korito usečeno u sopstveni, vrlo pokretan nanos, jer predstavljaju osnov za projektovanje uređenja vodotoka.

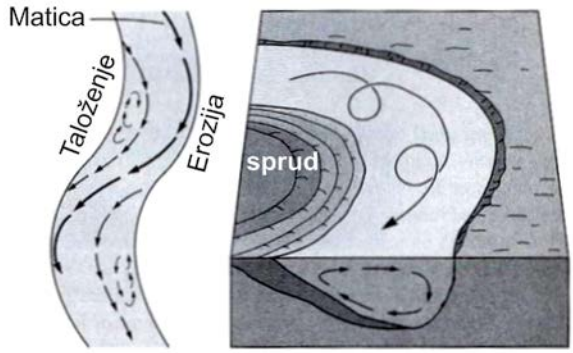
Osnovne morfološke karakteristike aluvijalnih tokova (dimenzije poprečnog profila, uzdužni profil, karakteristike trase) su međusobno zavisne. Međutim, treba voditi računa da morfološki oblici predstavljaju rezultat ne samo prirodnih zakonitosti, već sve češće i uticaja čoveka na rečni tok (izgradnja brana, regulacionih građevina, mostova i drugih objekata).

3.1 Uticaji pod kojima se formira rečno korito

3.1.1 Strujanje vode

Pored osnovnog strujanja vode u reci, koje se odvija pod uticajem gravitacije, u prirodnim tokovima postoje i sekundarna strujanja. Najznačajnija su centrifugalno, frikciono i vrtložno strujanje.

Centrifugalno strujanje se javlja u rečnim krivinama kao posledica neravnomernog rasporeda brzina osnovnog toka u poprečnom preseku, kao i neravnomernosti količine kretanja po širini i dubini toka. Strujanje je poprečno u odnosu na osnovni tok, tako da sa podužnim stvara **zavojno (helikoidalno) strujanje** (slika 3.1). Ovo strujanje ima primarnu ulogu u stvaranju meandera i njihovom kretanju nizvodno. Pri dnu je brzina ovog strujanja 1,5 veća od brzine podužnog strujanja, a pri površini je znatno manja (oko 15% brzine podužnog strujanja).



Slika 3.1: Helikoidalno strujanje u rečnoj krivini (Izvor: thebritishgeographer.weebly.com)

Površinske strujnice u krivini poniru duž konkavne obale, a izbijaju na površinu u zoni konveksne obale. Na taj način se iz korita izvlači nanos i na konveksnoj obali formira sprud. Ova pojava je i uzrok poprečnog nagiba vodnog ogledala u rečnoj krivini, pri čemu je nivo

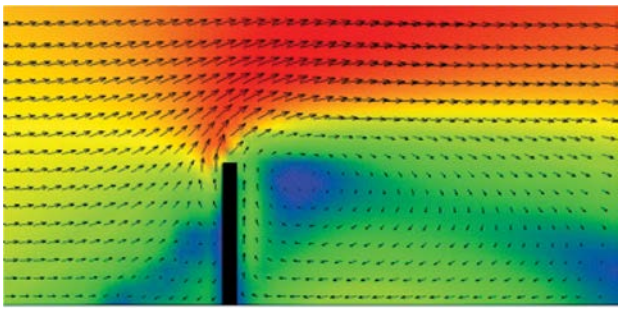
vode viši uz konkavnu, a niži uz konveksnu obalu. U približnim analizama se za određivanje poprečnog nagiba vodnog ogledala u krivini (Δh) koristi izraz:

$$\Delta h = \frac{V^2 \cdot B}{g \cdot R_{ko}} \qquad (3\text{-}1)$$

gde je: Δh - poprečni nagib vodnog ogledala u krivini (m), R_{ko} - poluprečnik krivine konveksne obale (m), V - srednja profilska brzina (m/s), B - širina korita (m), g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2).

Frikciono strujanje je povratno strujanje, koje se javlja na mestima naglog proširenja rečnog toka, iza naglih preloma u podužnom padu ili nizvodno od objekata (pragovi, brane itd.). Vrtlog može biti sa horizontalnom osovinom (hidraulički skok) ili sa vertikalnom osovinom. Brzina ovog strujanja dostiže 30 - 50% brzine osnovnog strujanja, tako da i ono ima veoma značajnu ulogu u formiranju rečnog korita.

Vrtložno strujanje je posledica frikcionog strujanja, a javlja se duž osovine vertikalnog vrtloga, od dna ka površini. Ovo strujanje izvlači vodu sa nanosom na površinu toka i bitno utiče na kretanje rečnog nanosa u zonama regulacionih građevina (slika 3.2) i mostovskih stubova. Brzina vrtložnog strujanja je istog reda veličine kao brzina osnovnog toka, a može biti i veća.



Slika 3.2: Vrtložno strujanje pri opstrujavanju poprečnog objekta (Izvor: folk.ntnu.no/nilsol/cases/scourpro)

Strujanje Bera (von Baer) je posledica nejednakog Koriolisovog ubrzanja u različitim tačkama rečnog toka. Zakon Bera glasi: "Sve reke severne hemisfere intenzivnije erodiraju desnu obalu, a južne hemisfere levu obalu, bez obzira da li teku u pravcu severa ili juga". Na primer, korito reke Drine na najnizvodnijih 30 km se za jedan vek pomerilo par kilometara, stalno erodirajući desnu obalu.

Kompenzaciono strujanje je reakcija na sva ostala strujanja koja narušavaju hidrostatički raspored pritisaka. Ono teži da uguši strujanje koje je uzrok poremećaja.

Strujanje izazvano različitom gustinom vode se javlja u većim vodenim masama, kao što su jezera i akumulacije. Nastaje usled različitog zagrevanja vodenih masa, neravnomernog isparavanja, različite koncentracije nanosa itd. Brzina strujanja je vrlo mala (do 0,03 m/s), ali je ono vrlo značajno za ekosistem jezera.

Strujanje pod uticajem vetra javlja se na površini vode i ima isti smer kao smer vetra. Brzina ovog strujanja pri površini može dostići 1% brzine vetra. Ukoliko je smer vetra isti kao smer rečnog toka, rezultujuća brzina na površini može biti tako velika da utiče i na brzinu pri dnu reke.

Strujanje usled talasa od vetra ili talasa od plovila je značajno samo na akumulacijama ili na tokovima sa velikom širinom vodnog ogledala. Strujanje je usmereno u pravcu propagacije talasa.

3.1.2 Karakteristike materijala u rečnom koritu

Geomehanički i geološki sastav materijala u kome je formirano rečno korito bitno utiče na njegov razvoj i morfološke oblike koji se javljaju. Stoga su geomehaničke i geološke podloge, koje se dobijaju odgovarajućim istraživanjima, veoma važne za izradu projekta uređenja vodotoka.

Obično je rečni nanos u kome je formirano aluvijalno korito nevezan, lako pokretan i relativno uniformnog granulometrijskog sastava. Međutim, dešava se da je aluvijum „cementiran" ilovačom ili ilovačom sa primesama jedinjenja gvožđa ili aluminijuma, tako da je rečno korito postojano na eroziju i stabilno. Potezi rečnih obala ovakvih geomehaničkih karakteristika su uočeni na Savi i Velikoj Moravi [32].

Slika 3.3: Nestabilna obala na donjem toku Kolubare (Izvor: IJČ)

Veoma često su, međutim, rečne obale nepovoljnog geomehaničkog sastava i to uslovljava njihovo brzo rušenje. U takvim slučajevima se ispod površinskog sloja gline nalaze slojevi peska i sitnog šljunka. Iznošenje sitnog materijala se odvija i pri manjim vodama, a zatim se ceo vertikalni odsek urušava. Deonice sa nepovoljnim geomehaničkim sastavom i intenzivnim rušenjem obala su uočene na Drini, Kolubari (slika 3.3), Velikoj Moravi i drugim vodotokovima.

U gornjem toku rečno korito je najčešće formirano u steni, pa ima dubok i uzak profil. Stenovite formacije se, međutim, mogu naći i u donjem toku, gde predstavljaju prirodne „pragove" u dnu koji kontrolišu podužni pad toka i sprečavaju pojavu dubinske erozije. Prirodni pragovi u koritu uslovljeni proslojcima stena se mogu naći kod Bagrdana na Velikoj Moravi [32].

Fenomen „samopopločavanja" dna rečnog korita je takođe značajan za njegovu stabilnost. Ovaj fenomen nastaje kada se iz gornjeg sloja nanosa u dnu vodotoka isperu sitne čestice i ostanu samo krupne frakcije, koje se ne mogu pokrenuti pod uticajem rečnog toka. Najčešće je samopopločavanje prisutno nizvodno od brana i pragova u koritu.

3.1.3 Ostali uticaji

Brojni **prirodni uticaji** su značajni za fomiranje rečnog korita. U ovu grupu spadaju plivajući predmeti (najčešće stabla drveća), koji mogu se zaustave u koritu i izazovu vrloženje, lokalno istaložavanje nanosa i rušenje obala (slika 3.4).

Vrlo je bitan i stepen obraslosti obala vegetacijom, posebno na malim vodotocima. Iako previše razvijena vegetacija smanjuje proticajni profil vodotoka i povećava otpore tečenju, njen koren ima ulogu „bioarmature" - povezuje nekoherentni materijal u obalama i povećava njihovu stabilnost. Posebno treba obratiti pažnju da se pri radovima na čišćenju korita ne uklanja koren vegetacije na konkavnim obalama, koje su izloženije rušenju.

Slika 3.4: Uticaj vegetacije na formiranje rečnog korita (Izvor: IJČ)

Veštački uticaji nastaju zbog postojanja različitih objekata u rečnom koritu. Stalni plivajući objekti (splavovi), vodozahvati i ispusti, mostovske konstrukcije i prelazi cevovoda lokalno menjaju strujnu sliku i režim nanosa, izazivajući promene morfologije korita (rušenje obala, istaložavanje nanosa itd.). Najčešći problem prave neadekvatno projektovani i izvedeni mostovski stubovi, koji izazivaju eroziju u samoj zoni mosta i stvaranje sprudova od pokrenutog nanosa neposredno nizvodno.

Svi negativni prirodni i veštački uticaji se mogu otkloniti blagovremenim merama održavanja korita ili primenom adekvatnih mera zaštite.

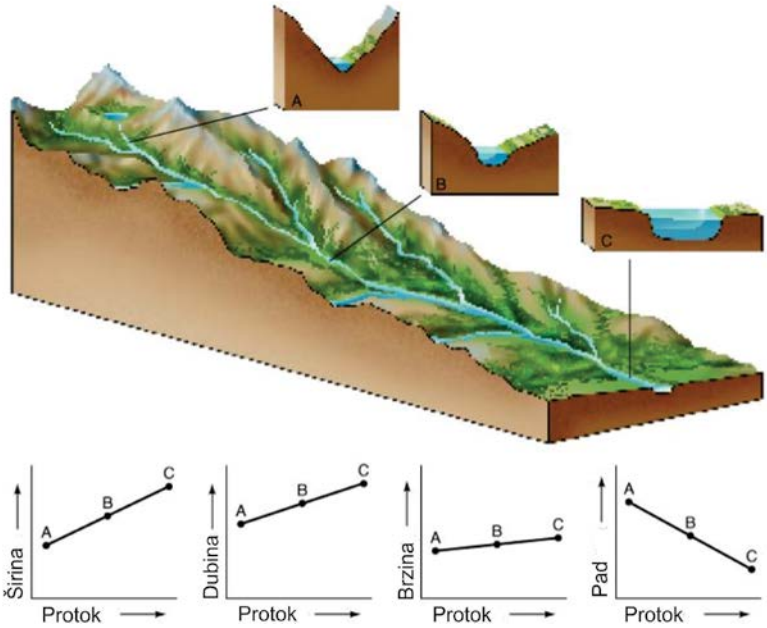
3.2 Oblik rečnog korita

Oblik rečnog korita prirodnih vodotoka, posmatran u sve tri dimenzije (u planu, kao podužni ili poprečni profil) zavisi od režima vode i nanosa. Dimenzije i oblici rečnog korita menjaju se tokom vremena, prilagođavajući se hidrauličkim uticajima na dno i obale korita. Trajne promene u poprečnom profilu nastaju usled izmene režima voda i nanosa u slivu ili izvođenja regulacionih radova.

3.2.1 Podužni profil

Podužni pad dna prirodnog vodotoka zavisi od protoka, pronosa nanosa i krupnoće nanosa. Podužni pad se smanjuje u nizvodnom smeru (slika 3.5), pre svega zbog smanjenja krupnoće materijala od koga je formirano korito (usled procesa segregacije i abrazije). Smanjenjem krupnoće zrna duž vodotoka, sve više nanosa se kreće u vidu suspenzije, pa je vodotoku dovoljan manji podužni pad. U donjem toku se odvija proces taloženja nanosa i izdizanja korita.

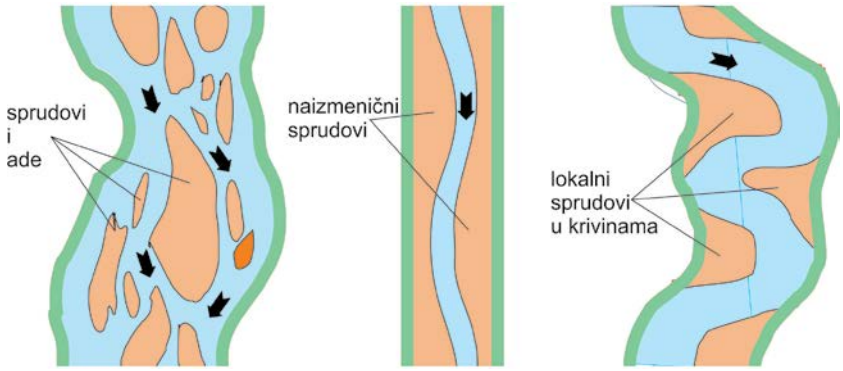
Na slici 3.5 ilustrovane su karakteristike reke u gornjem (A), srednjem (B) i donjem toku (C). Na istoj slici su dati i dijagrami koji prikazuju promenu (a) širine korita, (b) dubine, (v) brzine toka i (g) podužnog pada sa povećanjem protoka vode od izvora ka ušću.



Slika 3.5: Promena karakteristika rečnog toka od izvora ka ušću (Izvor: thebritishgeographer.weebly.com)

3.2.2 Rečna trasa

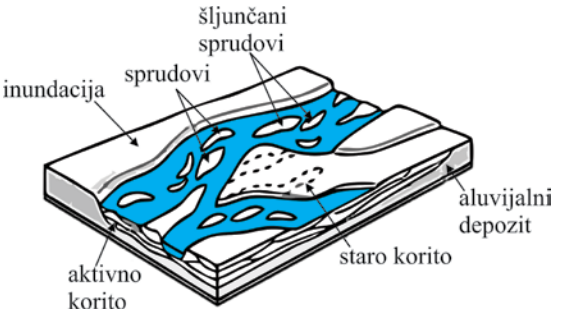
Rečna trasa je prikaz korita u horizontalnoj projekciji (planu). Prema izgledu korita u planu (slika 3.6) aluvijalni tokovi se dele na: razuđene, pravolinijske i meandrirajuće.



Slika 3.6: Trasa razuđenog, pravolinijskog i meandrirajućeg vodotoka [26]

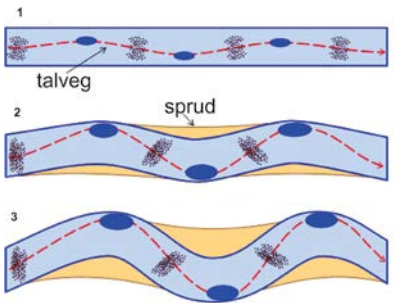
Razuđeni tokovi imaju dva ili više korita, mnoštvo sprudova i ada (slike 3.7 i 3.8). Formiraju se u slučaju velikog dotoka nanosa (što izaziva zasipanje korita i formiranje sprudova) odnosno nevezanog ili slabo vezanog materijala u kome je usečeno korito, tako da u periodu velikih voda dolazi do prosecanja novih korita, koja se pri malim vodama zasipaju. Izgradnja mostova preko razuđenih tokova predstavlja problem, zbog velike dužine profila i nestabilnosti korita.

Slika 3.7: Razuđeni rečni tok
(Izvor: IJČ)

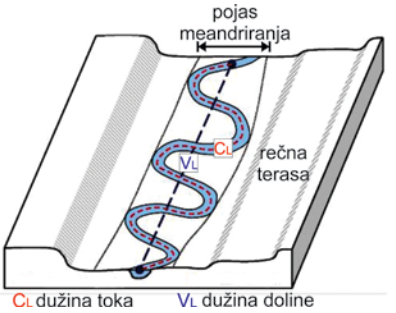


Slika 3.8: Delovi razuđenog rečnog toka
(Izvor: thebritishgeographer.weebly.com)

Pravolinijski tokovi su retki u prirodi, gde najčešće postoje usled specifičnih geoloških uslova. Pravolinijska deonica se može formirati izvođenjem regulacionih radova, ali pritom treba voditi računa da najveća dužina stabilne pravolinijske deonice iznosi oko 10 širina punog korita. Duži pravolinijski potezi nisu stabilni (slika 3.9), jer na njima talveg (linija najvećih dubina) ima krivolinijski izgled (naizmenično se približava obema obalama, obilazeći sprudove koji imaju šahovski raspored) pa se obe obale moraju zaštititi obaloutvrdama ili drugim regulacionim građevinama.



Slika 3.9: Postepene promene korita na pravolinijskoj deonici
(Izvor: slideshare.net/srishtianejaaneja)



Slika 3.10: Trasa meandrirajućeg vodotoka
(Izvor: austintexas.gov/faq/geomorphic-analysis)

Trasa **meandrirajućih (krivudavih) tokova** se sastoji od niza naizmeničnih krivina (meandera). Reke obično meandriraju (krivudaju) u svom donjem toku, u okviru šireg prostora koji se naziva „pojas meandriranja“ (slika 3.10).

Oblik vodotoka u planu (slika 3.10) opisuje se parametrom S (stepen sinusoidnosti), koji predstavlja odnos dužine osnovnog korita vodotoka (C_L) i dužine rečne doline (V_L). Trasa meandrirajućeg toka može imati nizak (S = 1 – 1,3), umeren (S = 1,3 – 2,0) ili visok stepen sinusoidnosti (S>2,0) [26].

Zavisno od karakteristika rečne doline, meandrirajući vodotoci se mogu podeliti na one koji imaju korito ograničeno aluvijalnim terasama (slike 3.11 a i b) i korito čiji razvoj nije ograničen širinom doline (slika 3.11 c).

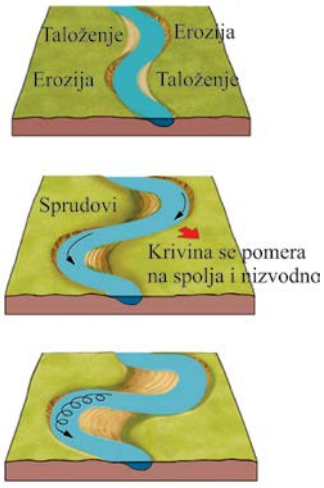
Meandrirajući tok odlikuju promenljiv oblik poprečnog profila (smenjivanje plićaka na prelaznim deonicama i dubljih delova u krivinama), talveg koji stalno prelazi sa jedne na drugu obalu (slika 3.12) i naizmenični sprudovi na konveksnim obalama (slika 3.13). Kratke prelazne deonice između krivina (“infleksije”) imaju malu dubinu, usled istaložavanja nanosa.

Slika 3.11: Trasa meandrirajućeg vodotoka (a) niskog, (b) umerenog i (c) visokog stepena sinusoidnosti

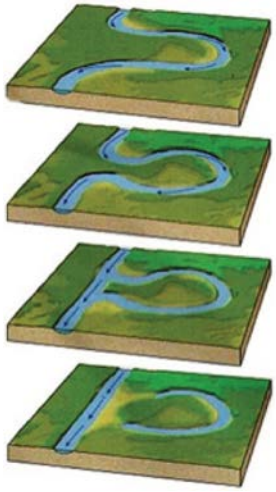
Slika 3.12: Poprečni preseci rečnog korita u meanderu (Izvor: slideshare.net/ SitiMutiahAliUmar/combined-effects-of-erosion-deposition)

Slika 3.13: Naizmenični sprudovi na konveksnim obalama (Izvor: Drina - M. Blagojević, grupa autora)

Razvoj meandera (slika 3.14) se ne može predvideti ni po veličini ni po vremenu. Na njegovo formiranje i brzinu pomeranja u nizvodnom smeru, pored uzdužnog nagiba dna, utiču režim protoka (posebno velike vode), krupnoća nanosa, vrsta materijala od koga su formirane obale i stepen obraslosti obala vegetacijom.



Slika 3.14: Pomeranje meandra (Izvor: slideshare.net/jeanielacob)



Slika 3.15: Razvoj i samoprosecanje meandra (Izvor: nps.gov)

Prema jednoj od teorija, sekundarna (poprečna) strujanja, koja su posledica centrifugalne sile u krivini, izazivaju neravnomerni raspored brzine i pritiska u poprečnom preseku, kao i pojavu poprečnog nagiba linije nivoa. Time se stvaraju uslovi za eroziju konkavne obale

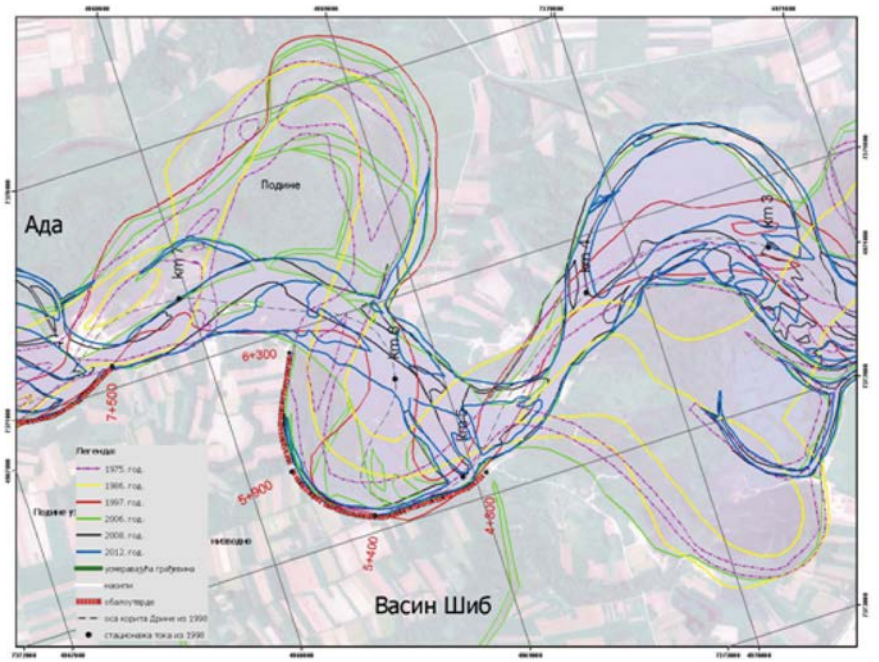
u krivini i produženje meandra. U toku dužeg vremenskog perioda rečna krivina postaje sve oštrija, dužina toka sve veća, a energija toka sve manja. U nekom trenutku vrlo razvijen meander predstavlja takvu prepreku tečenju da dolazi do njegovog samoprosecanja (slika 3.15). Napušteno korito ("starača") se postepeno zasipa rečnim nanosom, a u njenom temenu ostaje depresija u kojoj nastaje malo jezero.

Ukoliko nije bitno poremećen režim nanosa vodotoka, ukupna dužina meandrirajućih vodotokova u dužem vremenskom periodu malo se menja jer se skraćenje trase na jednom mestu nadoknađuje postepenim produženjem ostalih krivina.

Pojas meandriranja aluvijalnih vodotokova može biti veoma širok. Na primer, pojas meandriranja Velike Morave ili donjeg toka Drine širok je 2 do 3 km (slika 3.16), dok je širina osnovnog korita vodotoka 100 do 200 m.

Analiza procesa meandriranja je veoma važna kada je potrebno trasirati puteve ili nasipe u dolini nekog vodotoka (poželjno je da se trasa objekta nalazi izvan pojasa meandriranja) ili izabrati lokaciju novog mosta.

Primer: Donji tok reke Drine ima odlike i razuđenog i meandrirajućeg vodotoka, jer je rečno korito nestabilno, sa brojnim meandrima, napuštenim rukavcima (staračama), adama i sprudovima. Na slici 3.16 dat je prikaz izuzetno dinamičnih promena trase reke Drine na jednoj od karakterističnih nestabilnih deonica u njenom donjem toku.



Slika 3.16: Promene rečne trase na sektoru „Vasin Šib", 1975-2012. godine (Izvor: IJČ)

Izuzetna nestabilnost i neregularnost razvoja korita donje Drine je posledica neravnomernosti hidrološko - hidrauličkih karakteristika toka, geološkog sastava i geomehaničkih karakteristika terena, režima nanosa koji je izmenjen izgradnjom brane HE Zvornik, stihijske eksploatacije peska i šljunka iz korita i raznih objekata u rečnom toku

kojima se stvara nepovoljna strujna slika. Razvoj korita je veoma nepravilan i dinamičan, a posebno intenzivne promene se javljaju pri velikim vodama Drine. Kako relativno plitko, razgranato i vijugavo korito nema dovoljnu propusnu moć za velike vode, u poplavnim talasima dolazi do prosecanja novih rukavaca, premeštanja sprudova duž toka, rušenja obala, odnošenja i degradacije poljoprivrednih površina, pa i do ugrožavanja stambenih objekata i komunikacija. Česta je promena raspodele protoka Drine na glavni tok i rukavce, a „razrada" pojedinih rukavaca dovodi i do potpune promene toka Drine, kada rukavci preuzimaju ulogu glavnog toka.

3.2.3 Poprečni profil

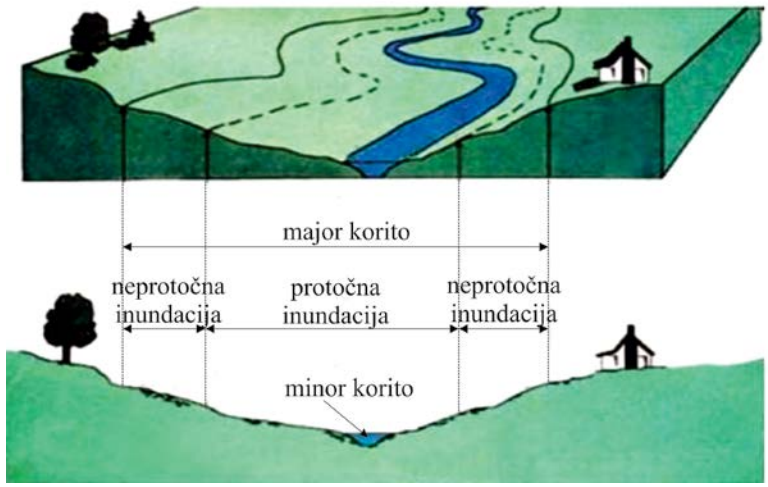
Kao što je već rečeno, u gornjem toku vodotoka je korito najčešće usečeno u stene i ima karakterističan "V" oblik (slika 2.6). U donjem toku je paraboličnog ili pravougaonog oblika, a njegove dimenzije zavise od režima oticaja vode, produkcije nanosa u slivu i sastava nanosa. U srednjem i donjem toku se dešavaju periodične promene oblika poprečnog profila – smenjuju se faze erozije (pri velikim vodama) i deponovanja nanosa (pri malim vodama).

Rečno korito ima različit oblik u krivini i na pravcu (slika 3.12). U krivini je oblik trougaoni, sa produbljenim koritom uz spoljašnju – konkavnu obalu ("proloke") i sprudom duž unutrašnje – konveksne obale. Na pravolinijskoj deonici je oblik poprečnog profila približno pravougaoni.

Kada se pri nailasku velike vode napuni osnovno korito vodotoka, voda se izliva u inundacije koje mogu biti ograničene visokim terenom ili nasipima. Inundacije su najčešće obrasle vegetacijom. Pritom se razlikuju ravničarski i brdsko-planinski vodotoci. Kod ravničarskih tokova uvek postoje dva dela korita (slika 3.17):

- korito za srednju veliku vodu (**osnovno, minor ili glavno korito**) i
- korito za veliku vodu (**major korito**) koje čini glavno korito i inundacije.

Kod planinskih tokova osnovno korito često prihvata i vode veće od srednje velike vode, a inundacije mogu, ali ne moraju da postoje.



Slika 3.17: Poprečni profil korita za veliku vodu (Izvor: waterresources.saccounty.net)

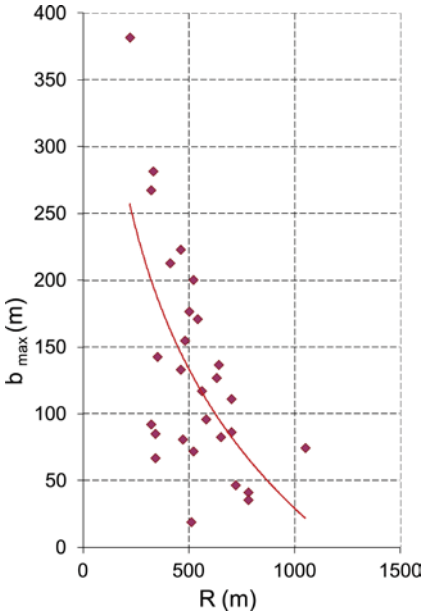
3.2.4 Morfološke analize

Brojni autori bavili su se analizom odnosa između geometrijskih karakteristika aluvijalnog rečnog korita i parametara režima voda i nanosa. Najčešće se težilo uspostavljanju empirijske relacije između karakterističnih dimenzija meandera (na pr. dužine meandera odnosno rastojanja između temena susednih krivina), protoka koji puni osnovno korito vodotoka (Q) i karakterističnog prečnika nanosa (d). Međutim, ni jedna od ovih relacija nema univerzalnu vrednost, tako da se pre planiranja uređenja vodotoka mora uraditi morfološka analiza, koja se zasniva na podacima snimanja projektne deonice.

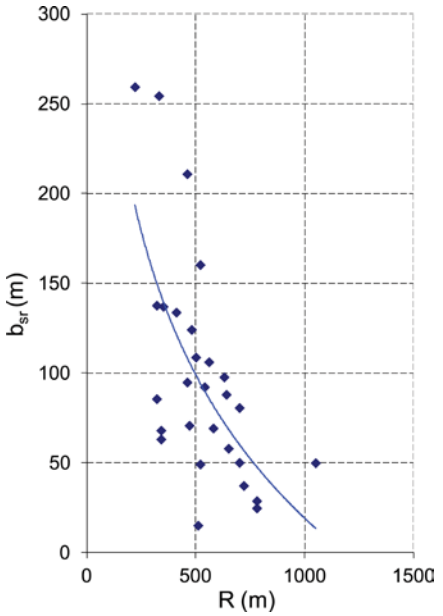
Cilj morfoloških analiza može biti: (1) klasifikacija deonica koje su povoljne ili nepovoljne sa aspekta postavljenih ciljeva projekta uređenja; (2) određivanje takvih dimenzija regulisanog korita koje će obezbediti njegovu dugoročnu stabilnost ili (3) utvrđivanje potrebnog obima regulacionih radova.

U projektima uređenja vodotoka morfološke analize imaju isti značaj kao hidrološke i hidrauličke analize. One se moraju bazirati na kvalitetnim podlogama, koje se prikupljaju na način opisan u poglavlju 5.

Primer: Urađena je morfološka analiza u cilju identifikacije uzroka rušenja konkavnih obala Velike Morave. Analizirane su rečne trase snimljene 1985. i 2006. godine i konstatovano da je u tom periodu maksimalna translacija konkavnih obala u meanderima (bmax) iznosila 20 do 380 m, a srednja vrednost na potezu ruševne obale (b_{sr}) 15 do 260 m. Uspostavljene su zavisnosti intenziteta rušenja konkavnih obala i radijusa zakrivljenosti rečne trase (R), koje su prikazane na slikama 3.18 i 3.19. Konstatovana je logična inverzna proporcionalnost ovih parametara: što je krivina oštrija, odnosno njen radijus manji, utoliko je intenzivnije rušenje konkavne obale. Dijagrami pokazuju da se samo u dijapazonu R < 600 m pojavljuju vrednosti b_{sr} > 150 m, a vrednosti b_{max} prelaze i 350 m. S druge strane, kod blagih krivina (R > 600 m), vrednosti b_{sr} su manje od 100 m, a b_{max} od 140 m.



Slika 3.18: Korelacija b_{max} – R (Izvor: IJČ)



Slika 3.19: Korelacija b_{sr} – R (Izvor: IJČ)

3.3 Konfiguracija rečnog dna

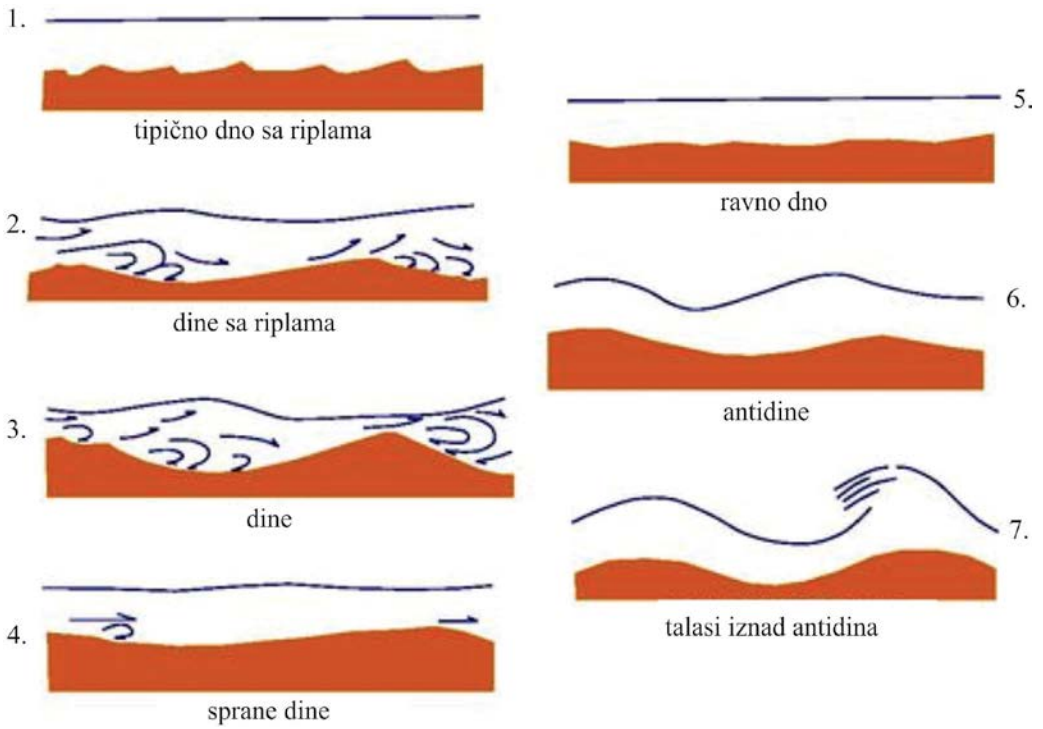
Konfiguracija rečnog dna aluvijalnih vodotoka određena je nanosnim formacijama. Veličina i tip nanosnih formacija zavise od hidrološko-hidrauličkih karakteristika toka (pre svega brzine i dubine) i karakteristika rečnog nanosa. Prema veličini nanosne formacije se dele na makro forme (sprudovi), mezo forme (dine) i mikro forme (nabori ili riple).

Sprudovi su nanosne formacije velikih dimenzija (dužina uporediva sa širinom korita, a visina sa dubinom toka), koje se pri niskim vodostajima vide iznad vodene površine. Postoji nekoliko specifičnih vrsta sprudova.

- **Lokalni sprudovi** (slika 3.13) su deponije peščanog ili šljunčanog materijala na konveksnim obalama rečnih krivina, koji nastaju kao posledica su karakterističnog strujanja u krivini, ne kreću se i ne menjaju mnogo oblik u zavisnosti od protoka.
- **Naizmenični sprudovi** su karakteristični za relativno pravolinijske deonice, imaju naizmeničan (šahovski) raspored u odnosu na obale, širina im je manja od širine korita, sporo se pomeraju nizvodno. Prelaz između susednih sprudova ovog tipa karakteriše plićak, koji na plovnim rekama može da ometa plovidbu u periodu malih voda.
- **Poprečni sprudovi** zauzimaju skoro u potpunosti širinu korita, javljaju se ili kao usamljeni sprudovi ili u vidu periodičnih nanosnih formacija, a kreću se nizvodno.
- **Sprudovi koje formiraju pritoke** javljaju se neposredno nizvodno od ušća, usled istaložavanja krupnijeg nanosa iz pritoke, koji matična reka ne može da odnese (slika 3.20).

Slika 3.20: Sprud nizvodno od ušća pritoke Južne Morave (Izvor: IJČ)

Po samom rečnom dnu se nanos kreće u vidu različitih **mezo i mikro nanosnih formacija** (slika 3.21), čija pojava zavisi od režima tečenja.



Slika 3.21: Vrste nanosnih formacija u rečnom dnu
(Izvor: wikivisually.com/wiki/Antidune)

U mirnom režimu tečenja se u dnu javljaju nabori i dine. Mala količina nanosa se kreće sa prekidima (zrna peska se kotrljaju preko vrha riple ili dine, a zatim u podnožju miruju neko vreme). **Nabori ("riple")** su nanosni oblici malih dimenzija, talasna dužina je 15-30 cm, visina 1-3 cm, oblik u uzdužnom profilu može biti trougaoni (sa nizvodnom kosinom pod uglom unutrašnjeg trenja) ili sinusoidni (slika 3.21/1 i 3.22). **Dine sa riplama** su prelazni oblik između nabora i dina (slika 3.21/2). **Dine** se kreću nizvodno, oblik u uzdužnom profilu je trougaoni ili sinusoidni (slika 3.21/3 i slika 3.23).

U prelaznom režimu između burnog i mirnog režima tečenja se javljaju **sprane dine**, manje visine nego dine (slika 3.21/4).

U burnom režimu tečenja je velika količina nanosa u neprekidnom pokretu i tada se javlja ravno dno (slika 3.21/5) i antidine (slika 3.21/6). **Antidine** su fazno neusaglašene sa talasima na površini (slika 3.21/7), a amplituda im je manja. Mogu biti nepokretne ili se kreću uzvodno. U uzdužnom profilu, oblik im je trougaoni ili sinusoidni.

Toku vode se suprostavlja sila otpora tečenju usled postojanja nanosnih formacija u rečnom dnu (**aluvijalni otpor**). To je otpor oblika koji nastaje usled razlike u pritisku uzvodno i nizvodno od nabora ili dine. Za razliku od **otpora trenja** (otpora usled krupnoće zrna), aluvijalni otpor se smanjuje sa povećanjem brzine toka.

Procena vrste i proračun dimenzija mezo i mikro nanosnih formacija vrši se na osnovu dijagrama (dobijenih uglavnom na bazi laboratorijskih istraživanja) ili primenom empirijskih izraza. U literaturi [26] se navode rezultati istraživanja:

- Sajmonsa i Ričardsona (Simons, Richardson, 1961), izvedeni na osnovu 400 merenja u laboratorijskim kanalima i merenja na nekoliko reka. Prema ovim autorima, vrsta nanosnih formacija zavisi od srednjeg prečnika zrna nanosa i jedinične snage toka (τV);
- Znamenskaje (1969), koja tip i dimenzije nanosnih formacija koreliše sa odnosom V/W (gde je: V - srednja profilska brzina, W – brzina tonjenja zrna) i vrednošću Frudovog broja;
- van Rejna (van Rijn, 1984), koji je koristio laboratorijska merenja i merenja na više reka širom sveta i zaključio da konfiguracija rečnog dna zavisi od režima vučenog nanosa. Na osnovu njegovog dijagrama mogu se odrediti tipovi nanosnih formacija u mirnom i prelaznom režimu, na osnovu bezdimenzionih brojeva T i D*.

Slika 3.22: Riple (nabori)
(Izvor: pitt.edu)

Slika 3.23: Ispitivanje kretanja dina u laboratorijskom kanalu
(Izvor: www.baw.de)

Empirijski izrazi se koriste za određivanje talasne dužine dina (λ). Prema istraživanjima više autora (Laursen, Yalin, van Rijn), λ je 4 do 7,3 puta veće od dubine vode.

U dnu vodotoka sa većim uzdužnim padom dna i značajnijim pronosom krupnijeg nanosa smenjuju se **brzaci** (strme deonice sa burnim režimom tečenja) i **tišaci** (deonice sa manje burnim ili mirnim režimom tečenja – slika 3.24).

Slika 3.24: Brzaci i tišaci (Izvor: learnnc.org)

4 MOTIVI UREĐENJA PRIRODNIH VODOTOKA

Uređenje vodotoka je skup radova i mera kojima se menjaju prirodne osobine vodotoka i njegovog sliva radi zaštite od štetnog dejstva voda i obezbeđenja uslova za racionalno korišćenje voda.

4.1 Zaštita od štetnog dejstva voda

Pod zaštitom od **štetnih dejstava voda** podrazumeva se realizacija niza radova, objekata, mera i drugih aktivnosti kojima se na racionalan način štite ljudi, prirodna i radom stvorena materijalna dobra i resursi od poplava i vodne erozije. S obzirom na poreklo voda i karakter nepovoljnih dejstava, uobičajeno je da se ova oblast vodoprivrede deli na tri osnovna dela:

- zaštitu od poplava koje nastaju pri izlivanju voda iz korita većih - stalnih vodotoka,
- zaštitu od suvišnih atmosferskih, otpadnih i podzemnih voda,
- zaštitu od svih vidova vodne erozije i bujica,
- zaštitu od leda.

Često se zaštita od poplava naziva i ″zaštita od spoljnih voda″, a zaštita od atmosferskih i podzemnih voda ″zaštita od unutrašnjih voda″, odnosno ″odvodnjavanje″. Iako će u okviru ove knjige biti razmatrana samo problematika zaštite od spoljnih voda, treba naglasiti da je ovo uslovna podela jer pojedina područja mogu biti istovremeno, ili povremeno izložena vodama različitog porekla. U takvim slučajevima i zaštita od štetnih dejstava voda mora biti kombinovana, odnosno kompleksna.

Štetna dejstva voda ne ispoljavaju se samo velikim vodama. Naime, procesi deformacije rečnih korita odvijaju se praktično pri svim protocima, iako dominantno pri velikim vodama. Posledica stvaranja nanosnih naslaga može biti značajno smanjenje propusne moći rečnog korita za vodu, te se u narednom periodu poplave mogu javiti i pri protocima koji se ranije nisu izlivali iz korita. Bočna erozija korita (posebno na konkavnim obalama), koja se odvija i pri protocima unutar osnovnog korita, može da uzgrozi stabilnost i pouzdanost bliskih priobalnih nasipa i prouzrokuje poplave. S obzirom na napred navedeno, sasvim je logično da se zaštita od poplava najčešće razmatra i rešava zajedno sa problematikom uređenja rečnih korita.

Najčešće zaštita od štetnog dejstva voda ima dve komponente, koje se mogu izvoditi odvojeno ili zajedno:

(a) stabilizacija odnosno sprečavanje nekontrolisane deformacije rečnog korita i

(b) obezbeđenje zaštite od plavljenja vrednih sadržaja u rečnoj dolini (naselja, industrije, saobraćajnica, poljoprivrednih površina).

Prvi radovi na zaštiti od štetnih dejstava voda započeti u periodu formiranja stalnih naselja i početka razvoja zemljoradnje u rečnim dolinama. Međutim, sa povećanjem priobalnih naselja, poljoprivrednih površina i drugih dobara u rečnim dolinama, povećavale su se i štete od poplava i štete od drugih negativnih nepovoljnih dejstava reka. U takvim uslovima, ljudi su počeli da preduzimaju prvo lokalne i primitivne, a zatim sve obimnije i složenije radove na zaštiti od štetnog dejstva voda. Ako su, i pored preduzetih zaštitnih mera, štete od poplava bivale učestalije i veće, onda su ljudi svoja naselja i dobra premeštali na više terene do kojih velike vode nisu dopirale. Ipak, u najvećem broju slučajeva, naselja u rečnim

dolinama su se vrlo brzo razvijala, uz stalno povećanje vrednosti dobara na područjima ugroženim poplavama i uz sve veće napore da se nasipima i drugim objektima, radovima i merama smanjuju nepovoljna dejstva reka, a povećavaju koristi od reka. To je bio, ustvari, početak organizovanih akcija na uređenju i korišćenju vodnih tokova. Ovakav odnos između ljudi i vodnih tokova je svakako bio racionalan, ali je postepeno vodio i do nepovoljnih promena hidroloških režima vodnih tokova. Naime, izgradnjom nasipa "osvajane" su sve veće i veće poplavne površine, što je izazvalo znatno povećanje protoka i nivoa vode u rekama, te je bilo neophodno da se izgrađeni nasipi povremeno nadvišavaju. Istovremeno se, zbog krčenja šuma i drugih privrednih aktivnosti na slivnim površinama, intenzitet oticanja voda postepeno povećavao, pa su se i ukupne količine i brzine doticanja voda u rečna korita povećavale. Pomenuti nepovoljni antropogeni uticaji su na mnogim rekama bitno povećali frekvenciju pojave velikih voda i poplava, te su sistemi za zaštitu od poplava i drugih nepovoljnih uticaja vodnih tokova morali da se dograđuju, a na nekim rekama su građeni i novi zaštitni sistemi. U novim uslovima su, pored nasipa za zaštitu od poplava, građene i akumulacije i retenzije za zadržavanje, odnosno smanjenje talasa velikih voda. No, i pored toga, podaci pokazuju da praktično u svim zemljama sveta i dalje dolazi do povremenih poplava i drugih nepovoljnih dejstava voda [59].

Primer: Istorijat izgradnje i rekonstrukcije nasipa duž reke Save dug je više od jednog veka. Velike vode Save su oduvek ugrožavale velike priobalne površine, na kojima su se podizala mnoga manja i veća naselja i intenzivno razvijala poljoprivreda. Stoga ovaj odbrambeni sistem ima prvorazredni značaj.

Početak izgradnje odbrambenog sistema datira iz vremena Rimljana, kada su prokopani kanali Progarska i Jaračka Jarčina.

Najčuvenija poplava u slivu Save dogodila se u novembru 1896. godine, kao posledica jakih i dugotrajnih padavina u slivu Drine. Prema kasnijim procenama, povratni period ovog događaja je bio 10.000 godina. Ova katastrofalna poplava je inicirala izgradnju sistema za zaštitu od poplava duž Save.

U XX veku registrovano je više talasa velikih voda na Savi (1915, 1924, 1932, 1940, 1944, 1952, 1962, 1970, 1974. i 1981), uz stalno povećanje zapremine talasa i povišenje maksimalnih nivoa (u Sremskoj Mitrovici maksimalni opaženi nivo je povišen oko 1,0 m za 100 godina). Poplavni talas u oktobru 1974. godine nastao je usled koincidencije velikih voda Drine i srednje Save. U proleće 1981. godine, priobalje Save bilo je ugroženo usled nailaska poplavnog talasa Save na visoke nivoe na ušću u Dunav. Najnoviji događaj je bio u proleće 2014. godine, kada je sistem za zaštitu od poplava na nekim deonicama doveden do granice izdržljivosti.

Odbrambeni sistem duž leve obale Save u Srbiji se generalno može podeliti u tri dela: Novi Beograd, Donji Srem i Gornji Srem. Priobalno područje Donji Srem nije zaštićeno, izuzev kratkih poteza kod Klenka i Hrtkovaca. Na desnoj obali Save zaštićeno je područje Beograda, sve do visokog terena uzvodno od Obrenovca, i područje Mačve.

U sklopu radova koje je preduzela "Zadruga za isušenje jugoistočnog Srema", izgrađen je 1905. godine nasip od železničkog mosta na Savi kod Beograda do Boljevaca (dužine 32 km). U isto vreme povećana je dužina kanal Galovica sa 27 na 51 km, izgrađeni nasipi duž njegovog donjeg toka i sagrađena ustava u odbrambenom nasipu. Nasip od Boljevaca do Progara (dužine 13 km) završen je 1912. godine. Navedeni nasipi na levoj obali Save rekonstruisani u sklopu izgradnje sistema za zaštitu od uspora akumulacije HE Đerdap 1.

Ovaj sistem danas štiti oko 13000 ha poljoprivrednog zemljišta, 1300 ha gradskog zemljišta (delovi Zemuna, Novog Beograda, Bežanije i Surčina), kao i seoska naselja Jakovo, Boljevci, Progar i Kupinovo. Industrijski objekti su locirani uglavnom na novobeogradskom području. Ovaj prostor je ispresecan mrežom odvodnih kanala, čiji se magistralni kanali završavaju crpnim stanicama, lociranim uz odbrambenu liniju. Magistralne saobraćajnice se u branjenom području protežu uglavnom upravno na odbrambenu liniju i dele branjeno područje na nekoliko kaseta.

Na području Gornjeg Srema kontinualna odbrambena linija je izgrađena od Sremske Mitrovice do granice sa Hrvatskom. Nasipi štite oko 48.000 ha plodnog poljoprivrednog zemljišta i šuma, naselja: Sremska Mitrovica, Laćarak, Martinci, Kuzmin, Bosut, Višnjićevo, Sremska Rača, Morović, Adaševci, Vašica, Batrovci, Ilinci i Jamena, više desetina kilometara železničke pruge i puteva, znatan broj manjih i većih industrijskih objekata. I na ovom području je izgrađena gusta mreža odvodnih kanala, kojima se suvišne vode odvode u Savu, bilo gravitaciono (kanali "Jarčina", "Kudoš", "Čikas" i Istočno obodni kanal), bilo preko crpnih stanica. Branjenim područjem teku i prirodni vodotoci (Bosut, Studva i Smogva).

Izgradnja nasipa na deonici Sremska Mitrovica - Županja započela je posle katastrofalne poplave 1924. godine, kada je osnovana "Vodna zadruga za odbranu od poplava Save i isušivanje bosutskog područja". Do 1936. godine izgrađeno je 172 km odbrambenog nasipa i 490 km kanala za odvodnjavanje, sa sedam crpnih stanica. Levoobalni nasipi reke Save na ovom području rekonstruisani su u periodu 1972-1988. godina.

Nasipska linija na desnoj obali reke Save takođe ima tri specifične deonice.

Od ušća Save u Dunav do Skele odbrambenu liniju prekidaju brojne manje i veće pritoke. Branjeno područje je stoga podeljeno u nekoliko kaseta koje štite savski nasipi i usporni nasipi duž pritoka. Nizvodno od ušća Kolubare postoje četiri kasete, sa urbanim i prigradskim delovima Beograda, industrijom itd. Kejski zidovi i nasipi u centralnoj zoni Beograda ni danas ne obezbeđuju adekvatan stepen zaštite gradskog područja. Objekti uzvodno od ušća reke Kolubare štite 12000 ha poljoprivrednog zemljišta, brojna naselja i deo Obrenovca, industrijske objekte i infrastrukturu.

Između Skele do Šapca su izgrađeni samo kratki nasipi radi zaštite poljoprivrednog zemljišta i manjih naselja.

Između Šapca i ušća Drine 70 km duga kontinualna odbrambena linija štiti područje Mačve. Nasip se nastavlja uz desnu obalu Drine do Badovinaca. Mnogobrojne ustave i crpne stanice su slabe tačke na nasipu. U zaštićenom području je grad Šabac i brojna manja naselja, 30.000 ha poljoprivrednog zemljišta, industrijski i infrastrukturni objekti, kao i sistemi za odvodnjavanje.

Izgradnja nasipa za zaštitu Mačve, inicirana posledicama katastrofalne poplave iz 1896. godine, započeta je 1901. godine. Izgrađeni su nasipi od Crnobarskog salaša do Crne Bare, od Bogatića od Crne Bare, oko Crne Bare, Crna Bara - Ravnje, Zasavica - Mačvanska Mitrovica - Sabac i Sabac - Dumača. Ovi nasipi su građeni sa nadvišenjem oko lm iznad do tada najviše opažene vode. Nasipi su građeni od materijala uzimanog iz pozajmišta sa obe strane trase nasipa, koji nije imao odgovarajuće karakteristike.

Do 1974. godine smatralo se da je rekonstrukcija savskih nasipa na području Mačve samo poželjna, ali ne i nužna, iako je konstatovano da nasipi nemaju odgovarajuće gabarite. Onda je u oktobru 1974. godine je na Savi zabeležen do tada najveći poplavni talas, nastao usled

određene koincidencije velikih voda Drine i srednje Save. U toku ovog talasa velike vode vodostaji su bili tako visoki (i pored činjenice da se Sava u srednjem toku izlila, kao i Drina u donjem toku), da je postojala neposredna opasnost od prelivanja nasipa u Mačvi. Odbrana od poplava je bila teška, dugotrajna i skupa, ali je definitivno potvrdila da postoji potreba za rekonstrukcijom nasipa na području Mačve.

Već 1975/76. godine izvedeni su radovi za odbranu grada Šapca, a 1980. godine rekonstruisan je nasip od železničkog mosta u Sapcu do Kočinog kanala.

Iskustva iz sledeće odbrane od velikih voda (1981. godine) ukazala su da je potrebno rekonstruisati sve nasipe na području Mačve, tako da se obezbedi sigurnost od prelivanja nasipa stogodišnjom velikom vodom, kao i sigurnost od ostalih nepovoljnih uticaja. Rekonstrukcija odbrambene linije uz Savu i Drinu, započeta osamdesetih godina, ni do danas nije završena.

Tokom odbrane od poplava u maju 2014. godine, nerekonstruisani nasipi su bili veoma ugroženi, tako da su morale da budu preduzete veoma obimne i skupe mere operativne odbrane (nadvišenje i ojačanje slabih deonica) kako bi se zaštitilo područje Mačve. Ovaj događaj je potvrdio da je rekonstrukcija nasipa Mačve prioritetan i urgentan zadatak, koji će se završiti narednih godina.

Primer: U Srbiji je najveći broj i obim regulacionih građevina u osnovnom koritu realizovan na Dunavu, Tisi, Savi i Velikoj Moravi, uglavnom u okviru dugoročnih i planskih zahvata.

Na Dunavu su radovi planski započeti još krajem XIX veka, u cilju obezbeđenja plovnog puta i zaštite priobalnih područja od rečne erozije, a vršeni su u nekoliko faza. U periodu do I svetskog rata osnovni radovi su se sastojali u prosecanju krivina, pregrađivanju rukavaca i osiguranju obala, čime je na potezu od mađarske granice do ušća Tise obezbeđen plovni put za gaz od 1,8 m i širinu plovnog puta od 100 m. Između dva svetska rata su radovi nastavljeni u cilju obezbeđenja plovidbe, bagerovanjem brojnih plićaka i izgradnjom brojnih lokalnih obaloutvrda, napera, pregrada i drugih građevina. Nakon II svetskog rata su regulacioni radovi izvođeni sistematski, radi uspostavljanja plovnog puta odgovarajućih dimenzija. Regulacione građevine iz ovog perioda su projektovane sa kotom krune koja je 1 m iznad niskog plovnog nivoa, pri čemu je obezbeđena minimalna širina plovnog puta od 180 m, uz gaz od 2,5 m i minimalni radijus krivina od 1000 m. U celini gledano, dosadašnji regulacioni radovi na Dunavu uzvodno od Beograda su imali pozitivne efekte u pogledu uslova plovidbe, opšte stabilizacije korita i poboljšanja propusne moći za vodu, nanos i led, kao i u pogledu uređenja i korišćenja rečnih obala. Međutim, postoji još nekoliko deonica na kojima treba izvesti regulacione zahvate u narednom periodu radi postizanja dobrih uslova plovidbe u svim uslovima.

Na Dunavu nizvodno od Beograda je potreba za klasičnim regulacionim radovima prestala nakon izgradnje HE Đerdap 1 (HE je izgrađena 1972. godine, na km 943). Na ovom sektoru Dunava uloga regulacionih građevina sada se uglavnom sastoji u zaštiti obala od erozionog dejstva talasa izazvanih vetrom i plovilima (u zonama naselja, industrijskih pogona, pristaništa, mostova, ušća kanala i drugih objekata). Duž akumulacije HE Đerdap 2 (brana je izgrađena 1985. godine na km 863) izvedeni su radovi u cilju zaštite desne obale u zonama naseljenih mesta od erozionog dejstva talasa i velikih dnevnih oscilacija nivoa vode koje se javljaju usled rada hidroelektrana.

Veliki obim regulacionih radova na reci Tisi završen je još krajem XIX veka. Do kraja 1875. godine je dužina korita Tise skraćena sa 1419 km na 962 km izvođenjem 110 proseka (od

čega je na srpskoj teritoriji izvedeno 13 proseka, ukupne dužine 28,8 km), uz istovremeno građenje brojnih regulacionih građevina i obaloutvrda. U periodu od 1875. do 1918. godine radovi su vršeni u cilju uređenja ruševnih obala u zonama naselja, u blizini vodoprivrednih i drugih objekata, kao i radi lokalnih korekcija u tečenju i razvoju korita (naperima i paralelnim građevinama). U ovom periodu je regulacionim objektima zaštićeno 31,1 km obale. Posle I svetskog rata na Tisi su građene samo obaloutvrde.

Na Savi regulacioni radovi datiraju od davnina, na deonici kod Sremske Mitrovice i na ušću Drine. Sistematska regulacija celog toka reke Save nije, međutim, izvršena, već su samo hitnim regulacionim radovima rešavani problemi (u vezi plovidbe i zaštite obala u zonama naselja i drugih priobalnih objekata) na pojedinim ugroženim lokalitetima i deonicama. Jedino su u zoni Beograda (od ušća do Makiša) izvršeni obimni i sistematski regulacioni radovi, posebno u sklopu izgradnje Novog Beograda, sajmišta i rekreacionog centra na Adi Ciganliji.

Za potrebe obezbeđenja plovidbenih gabarita (širina plovnog puta 80 m, dubina 2,4 m) na pojedinim deonicama Save (kod ušća Drine, Mrđenovca, Skele) je izvršena regulacija korita za malu vodu. Ovi radovi nisu dali očekivane efekte, jer su krune građevina bile niske i sistemi nisu u potpunosti završeni. Nakon izvođenja objekti nisu održavani i oštećeni su, tako da su izgubili funkciju.

Na Velikoj Moravi je u periodu nakon 1950. godine minor korito regulisano na devet odvojenih deonica. U okviru regulacije izvedeno je 16 proseka, čime je dužina prirodnog korita skraćena preko 20%, kao i veliki broj različitih vrsta regulacionih građevina.

4.1.1 Stabilizacija i povećanje propusne sposobnosti osnovnog korita vodotoka

Stabilizacija i povećanje propusne sposobnosti osnovnog korita vodotoka se zasniva na radovima na zaštiti obala i dna korita od erozije, kao i korekcijama trase prosecanjem oštrih krivina. Cilj radova je formiranje stabilnog korita, sa karakteristikama koje će omogućiti efikasno oticanje vode, neometan pronos leda i nanosa, bez bitnog poremećaja životne sredine.

Radovi na uređenju rečnog korita (regulacije) se mogu klasifikovati na osnovu više kriterijuma.

Prva podela je u zavisnosti od **merodavnog protoka** i po njoj se razlikuju:

- **Regulacija korita za velike vode** koja obuhvata kompletno major korito vodotoka i obično se izvodi na malim i bujičnim tokovima;
- **Regulacija korita za srednje vode** ima za cilj obezbeđenje dinamičke ravnoteže režima nanosa i zaštitu obala, a najčešće se primenjuje na rekama srednje veličine;
- **Regulacija korita za malu vodu** najčešće se radi na velikim plovnim rekama, da bi se obezbedile dubine potrebne za bezbednu plovidbu.

U zavisnosti od potreba, korito vodotoka se može urediti duž celog srednjeg i donjeg toka (primenjuje se samo kod kraćih vodotoka, kroz naseljena mesta) i samo na deonici gde postoje problemi.

U zavisnosti **od položaja**, regulacije mogu biti: „poljskog“ tipa (van naselja) i „gradskog“ tipa (u naseljenim mestima).

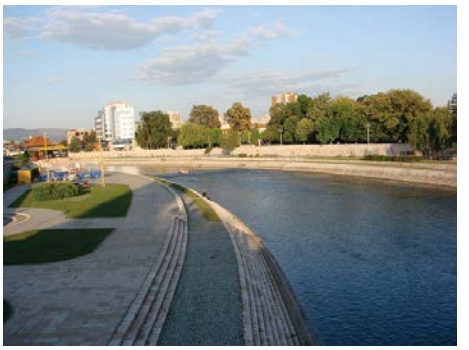
Regulacija "gradskog" tipa u najvećem broju slučajeva podrazumeva uređenje korita vodotoka za prijem velikih voda i obezbeđenje njegove stabilnosti oblogom (slike 4.1 do 4.4).

Rešenja i obim zahvata zavise od karakteristika vodotoka. Dok se na malim i srednjim rekama često oblaže celo korito za veliku vodu (ili se obloga kombinuje sa zelenim površinama), u slučaju većih reka se radi samo na zaštiti obala od erozije, uz obezbeđenje potrebnog stepena zaštite od poplava (slike 4.5 i 4.6).

Slika 4.1: "Gradska" regulacija bujičnog vodotoka (kineta sa kaskadom) – reka Čađevica u Krupnju (Izvor: IJČ)

Slika 4.2: "Gradska" regulacija bujičnog vodotoka (kanal) – reka Bogoštica u Krupnju (Izvor: IJČ)

Slika 4.3: "Gradska" regulacija reke Veternice kroz Leskovac (Izvor: panoramio.com)



Slika 4.4: "Gradska" regulacija reke Nišave u Nišu (Izvor: okradio.rs)

Slika 4.5: Regulacija Save u Zagrebu (Izvor: politikaplus.com)

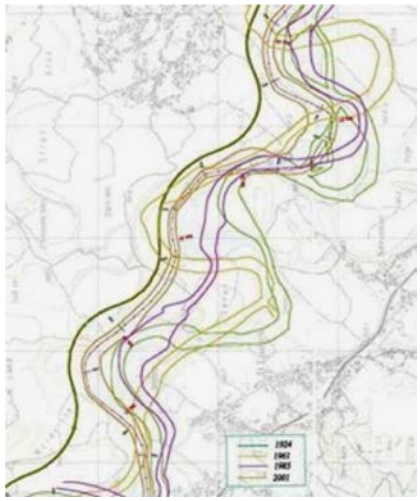
Slika 4.6: Regulacija obale Dunava u Beogradu (Izvor: queveren.net)

Na potezima van naseljenih mesta primenjuje se regulacija **"poljskog" tipa** (slika 4.7), kod koje se korito vodotoka uređuje za prijem velikih voda (sa ili bez nasipa), ali i dozvoljava određena deformacija osnovnog korita. To znači da se korito ne oblaže ili se oblogom štite samo konkavne obale u krivinama. Po prolasku svake velike vode je potrebno popraviti nastala oštećenja.

Slika 4.7: Primeri "poljske" regulacije (Izvor: IJČ)

Regulacije bujičnih tokova imaju svoje specifičnosti, uslovljene karakterom ovih vodotoka. Zavisno od kombinacije podužnih i poprečnih objekata regulacija bujičnog vodotoka može biti tipa „kanal" odnosno regulisano korito na kome nema poprečnih objekata (pregrada, kaskada, pragova ili konsolidacionih pojaseva) ili "kineta" odnosno objekat koga čine korito ozidanih obala i niz poprečnih objekata.

Često postoji potreba da se samo **zaštite ruševne obale** vodotoka, u slučaju da se u procesu meandriranja vodotoka odnose velike površine zemljišta. Primeri velikih problema ove vrste se mogu naći u donjim tokovima svih reka, a posebno su prisutni na Drini, Kolubari, Južnoj, Zapadnoj i Velikoj Moravi, gde je nestabilnost obala uslovljena njihovim nepovoljnim geomehaničkim sastavom. Primeri izrazitog meandriranja i rušenja obala Velike Morave dati su na slikama 4.8 i 4.9.



Slika 4.8: Promene trase reke Velike Morave rezultuju odnošenjem zemljišta (Izvor: IJČ)

Slika 4.9: Ruševne obale Velike Morave (Izvor: IJČ)

Tip obaloutvrde zavisi karakteristika vodotoka i vrednosti štićenog područja. To mogu biti vrlo skupi objekti za zaštitu gradskih područja (slika 4.10), ali i najjednostavnije obaloutvrde od priručnog materijala koje se primenjuju za zaštitu manje vrednih, šumskih i poljoprivrednih zemljišta (slika 4.11).

Slika 4.10: Obaloutvrda od betonskih blokova na desnoj obali Dunava u Beogradu (Izvor: IJČ)

Slika 4.11: Obaloutvrda od popleta (Izvor: bushcraftuk.com)

4.1.2 Zaštita od poplava

Zaštita od poplava, koje često nanose velike štete u naseljima, industriji i poljoprivredi, najčešći je motiv za uređenje vodotoka. Svake godine poplave nanose ogromne štete nezaštićenim područjima, a ponekad i zaštićenim područjima, ukoliko objekti izgrađeni radi prevencije izlivanja vode iz rečnog korita popuste pod dejstvom velike vode (slike 4.12a – 4.12d).

a. Poplava nezaštićenog naselja u Zaječaru, 2010. (Izvor: IJČ)

b. Poplavljeno poljoprivredno zemljište u dolini Južne Morave, 2010. (Izvor: IJČ)

c. Poplava Obrenovca, 2014. (Izvor: svet.rs)

d. Štete od poplave u Krupnju, 2014. (Izvor: IJČ)

Slika 4.12: Prizori iz poplava 2010. i 2014. godine

Poplave i druga štetna dejstva voda izazivaju velike vode, koje imaju stohastički - slučajan karakter. Stoga se objekti i sistemi za smanjenje tih štetnih dejstava dimenzionišu na usvojene **merodavne velike vode** određenih verovatnoća pojave.

Ne može se računati na totalnu zaštitu od poplave ili od bilo kog štetnog dejstva velikih voda, jer se od usvojenog merodavnog uticaja na koji je dimenzionisan zaštitni sistem može pojaviti još veći (svakako sa manjom verovatnoćom pojave) i izazvati poplave i štete. Pored toga, poplave mogu nastati i usled havarije, odnosno otkaza pojedinih zaštitnih objekata (nasipa, brana, ustava), zbog grešaka i propusta učinjenih pri projektovanju, izvođenju, održavanju i upravljanju objektom. Iz toga sledi logičan zaključak da štete od poplava i drugih nepovoljnih dejstava voda ne mogu potpuno i trajno da se izbegnu, već se teži smanjenju šteta u okviru tehnički i ekonomski opravdanog rešenja.

Zavisno od hidrološko-hidrauličkih, psamoloških i morfoloških karakteristika, kao i načina korišćenja vodotoka, u zaštiti od poplava primenjuju se različiti objekti, radovi i mere. Dominantnu ulogu pritom imaju **investicioni (građevinski ili strukturni)** radovi i mere kojima se obezbeđuje zaštita od usvojenog merodavnog protoka.

Zaštitu od poplava najčešće obezbeđuju **pasivne mere** odnosno izgradnja nasipa ili drugih linijskih objekata, odnosno ograničavanje korita za veliku vodu do planirane širine (slika 4.13). Linija nasipa ne treba da prati osnovno korito vodotoka, da razvoj meandara ne bi, u slučaju približavanja ruševne obale nasipu, ugrozio njegovu stabilnost.

Ukoliko se izvode u blizini osnovnog korita, nasipi mogu biti izloženi eroziji rečnog toka, udarima talasa i uticaju leda. Da bi se objekti obezbedili od ovih nepovoljnih uticaja, na kosini prema vodi se izvodi obloga (slika 4.14).

Slika 4.13: Dobro održavan nasip (Izvor: IJČ)

Slika 4.14: Nasip sa betonskom oblogom (Izvor: IJČ)

Stepen zaštite koji obezbeđuju nasipi zavisi od broja stanovnika, važnosti dobara i veličine površine branjene na određenom prostoru. Na površini okruženoj nasipima (kaseta) sistem zaštite od spoljnih voda najčešće je kombinovan sa sistemima za odvodnjavanje, navodnjavanje i odvođenje otpadnih voda.

Nasipi mogu biti različitih dimenzija (širine krune, nagiba kosina, visine) i tipova poprečnog profila (sa bankinama, drenažnim rovom, balastom ili bez njih itd.). Tip i dimenzije nasipa su prilagođeni zahtevima zaštite, materijalu od koga su izvedeni i vrsti podloge na kojoj su fundirani.

Za neke vodotoke odnosno branjena područja u našoj zemlji usvojeni su detaljni kriterijumi za dimenzije i druge parametre nasipa, koji se primenjuju prilikom rekonstrukcije

postojećih ili izgradnje novih objekata. To je, uglavnom, slučaj sa većim vodotocima u našoj zemlji (Dunav, Sava, Tisa), dok na drugim vodotocima postoji veliki broj nasipa koji su vrlo heterogeni po tipu, vremenu i tehnologiji izgradnje i drugim parametrima.

U cilju zaštite od poplava se može **„aktivnim merama"** uticati na promenu režima velike vode na štićenom području. U ovu grupu spadaju regulacija korita za velike vode (slika 4.15), skraćenje trase vodotoka (slika 4.16), izgradnja rasteretnih kanala (slika 4.17) i zadržavanje dela zapremine poplavnog talasa u retenzijama i akumulacijama koje imaju predviđenu zapreminu za prihvat velikih voda (slika 4.18).

Slika 4.15: Regulacija korita za prijem velike vode – reka Resava, Svilajnac (Izvor: IJČ)

Slika 4.16: Skraćenje trase izvođenjem proseka – reka Rajna kod grada Karlsrue (Izvor: johndfenton.com)

Slika 4.17: Rasteretni kanal za velike vode kod Adorjana na Tisi (Izvor: IJČ)

Slika 4.18: Akumulacija HE Bajina Bašta (Izvor: dlhe.rs)

Na područjima sa više vodotoka i raznolikim uslovima plavljenja izgrađuju se zaštitni sistemi, koji obuhvataju sva ugrožena područja i u kojima se primenjuju različiti tipovi protivpoplavnih radova i mera. Zavisno od prirodnih uslova, položaja centara potencijalnih šteta i drugih činilaca, moguće je primeniti najrazličitije kombinacije mera u zaštitnim sistemima. Osnivni princip je da izbor, raspored i dejstvo primenjenih mera zaštite od poplava budu međusobno komplementarni i usklađeni. Takođe, u sistemima se korišćenje objekata i primena drugih mera u vreme poplave mora odvijati u skladu sa planom koji daje optimalne efekte.

Višenamenski regionalni hidrosistemi imaju za cilj osnovno uređenje voda na određenom prostoru i zbog toga gotovo da ne postoji nijedan hidrosistem koji nije od izuzetnog značaja za zaštitu od poplava. Sa aspekta uloge u zaštiti od poplava razlikuju se dva osnovna tipa hidrosistema:

- hidrosistemi koji imaju aktivnu ulogu u zaštiti od poplava, tako da im je to jedan od prioritetnih zadataka (na primer HS DTD, višenamenski hidrosistem "Ibar-Lepenac" i Hidrosistem "Bosut"),
- hidrosistemi građeni za druge namene, koji nemaju izrazito aktivnu ulogu u zaštiti od poplava, ali po svojim implikacijama su izuzetno značajni i za ovu funkciju (na primer Hidroenergetski i plovidbeni sistem "Đerdap").

Hidrosistem Dunav-Tisa-Dunav pripada prvom tipu hidrosistema, u kome je zaštita od poplava jedan od prioritetnih zadataka. To je višenamenski regionalni hidrosistem koji ima zadatak kompleksnog uređenja voda na području koje pokriva (zaštita od poplava, odvodnjavanje, snabdevanje vodom za potrebe navodnjavanja poljoprivrednih površina, ribnjaka, naselja i industrije, prijem i evakuacija otpadnih voda, plovidba i razne prateće delatnosti kao što su ribarstvo, šumarstvo, rekreacija, turizam, sport i dr.). Pokriva ravničarsko područje Bačke i Banata, površine blizu 20.000 km^2, kroz koje protiču Dunav, Tisa i niz banatskih vodotoka.

Aktivna odbrana od poplava područja Banata se obezbeđuje upravljanjem jedinstvenim sistemom koji čine korita kanala HS DTD (Kikindski kanal i Magistralni kanal Novi Bečej - Banatska Palanka) i presečenih vodotoka (Zlatica, Stari Begej, Plovni Begej, Tamiš, Brzava, Moravica sa Rojgom, Vršački kanal i Karaš) sa zaštitnim nasipima i brojne ustave (Vrbica i Padej na Zlatici, Sajan, Novi Bečej, Botoš i Kajtasovo na kanalu DTD, Klek, Srpski Itebej i Stajićevo na Begeju, Tomaševac, Opovo i Pančevo na Tamišu i Čenta na Karašcu).

Magistralni kanal DTD od Novog Bečeja do Banatske Palanke preseca vodotoke i prihvata njihove vode, počevši od Starog Begeja do Karaša (slika 4.19). Kikindski kanal, spaja Zlaticu sa Magistralnim kanalom DTD. Na taj način dobijen je jedinstven elastični sistem, koji sačinjavaju presečeni vodotoci i Magistralni kanal. Ovaj sistem obezbeđuje mogućnost međusobne preraspodele protoka u zavisnosti od veličina protoka u svakom vodotoku i koincidencije sa nivoima u recipijentima. Najveći efekti su postignuti prokopavanjem kanala DTD kroz Potporanjsku vododelnicu, čime je ceo sliv Brzave izdvojen iz sliva Tamiša i odveden u Dunav kroz dolinu Karaša. Naknadno izgrađeni sistem ustava na Donjem Tamišu čini u vodno-režimskom smislu celinu sa hidrosistemom DTD.

Slika 4.19: Šema tečenja u kanalskoj mreži HS DTD pri evakuaciji velikih voda banatskih vodotoka (Izvor: IJČ)

Bački deo hidrosistema čini mreža kanala koja se prostire između Dunava i Tise, sa vodozahvatima na uzvodnom sektoru Dunava (Bezdan, Bogojevo) i vodoispustima na nizvodnom sektoru Dunava (Novi Sad) i Tise (Bečej, Žabalj). Sastavni deo hidrosistema, pored kanala, čine ustave i crpne stanice na vodozahvatima i vodoispustima, kao i veći broj "unutrašnjih" ustava, potrebnih za upravljanje vodnim režimom. Kako veći deo kanala služi i za plovidbu, uz ustave se nalaze i brodske prevodnice.

U Bačkoj su izgradnjom HS DTD uslovi odbrane od poplava manje izmenjeni nego u Banatu, ali su promene ipak značajne. "Spuštanjem" većeg dela mreže ranije visoko ležećih kanala, veći deo područja je zaštićen od velikih voda. Naročito je značajan doprinos novoizgrađenih

ustava (R. Krstur i Sombor) i crpnih stanica (Bečej, Žabalj i Bogojevo), koje u periodima visokih vodostaja recipijenata Tise i Dunava održavaju niži nivo vode u mreži.

4.1.3. Zaštita saobraćajne i druge infrastrukture

Svaki saobraćajni infrastrukturni sistem, bilo da se radi o putnom ili železničkom saobraćaju utiče na hidrografsku mrežu i zahteva određene mere i radove. Trase puteva i pruga prelaze preko postojećih vodotoka ili ih tangiraju. Poseban problem je što saobraćajnice presecaju rečne slivove, tako da su neophodne posebne mere za odvođenje površinskog oticaja i njihovo uvođenje u reku. Najčešće je dovoljna lokalna zaštita dna i obala vodotoka u zoni prelaza saobraćajnice (slika 4.20). Međutim, kada se saobraćajnica pruža dolinom vodotoka, eroziono dejstvo vode će je ozbiljno ugrožavati (slika 4.21), tako da se moraju preduzeti ozbiljni regulacioni zahvati.

Osim saobraćajne infrastrukture, rečnim dolinama se pružaju ili ih presecaju drugi infrastrukturni sistemi (dalekovodi, naftovodi, gasovodi). Svi objekti u zoni dejstva rečnog toka su izloženi štetama i rušenju, pa se moraju zaštititi primenom adekvatnih mera.

Slika 4.20: Lokalna zaštita mosta (Izvor: jugokop.com)

Slika 4.21: Saobraćajnica ugrožena fluvijalnom erozijom (Izvor: IJČ)

4.1.4 Obezbeđenje uslova za odvodnjavanje

Za efikasnu zaštitu od "unutrašnjih voda" odnosno odvodnjavanje grade se posebni sistemi, koji moraju imati vezu sa recipijentom – vodotokom. Veza se ostvaruje izgradnjom ustava i crpnih stanica. Kroz ustave se voda gravitaciono upušta u vodotok, što je moguće samo u periodima kada su nivoi u recipijentu niži od nivoa u kanalskoj mreži za odvodnjavanje. U periodima kada su nivoi u recipijentu viši od nivoa u kanalskoj mreži, voda se prepumpava u crpnim stanicama. Zone ustava i crpnih stanica se obavezno osiguravaju od štetnog dejstva vode (slika 4.22). Crpni agregati se postavljaju iznad nivoa „merodavne velike vode" kako ne bi bili potopljeni pri velikim vodama.

Slika 4.22: Ustava i crpna stanica na ušću reke Bosut u Savu (Izvor: mapio.net)

U ravničarskim predelima je ranije bila praksa da se, ukoliko je predviđeno odvodnjavanje gravitacijom, prirodni vodotok potpuno reguliše da bi nivoi u njemu uvek niži od vodostaja u mreži za odvodnjavanje. To se postizalo: povećanjem uzdužnog pada (prosecanjem rečnih krivina), smanjenjem vrednosti koeficijenta rapavosti korita (uklanjanje vegetacije) i izmenom geometrijskih karakteristika poprečnog preseka korita. Primer „totalno" regulisanog vodotoka u sistemu za odvodnjavanje dat je na slici 4.23. Ova praksa se napušta u novije vreme, jer je vrlo nepovoljna sa aspekta zaštite životne sredine.

Slika 4.23: Regulisano korito vodotoka koji je uključen u sistem za odvodnjavanje (Izvor: IJČ)

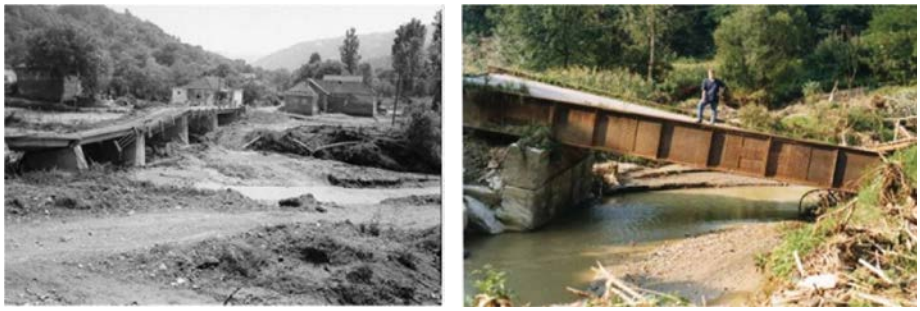
4.1.5 Zaštita od erozije i bujica

Pri nailasku talasa velikih voda na bujičnom vodotoku, uporedo sa izlivanjem voda iz korita javljaju se i fenomeni vezani za nanos - bujična lava, odroni i klizišta. Kako se pri velikim vodama na bujičnim vodotocima pokreću i izuzetno krupne frakcije nanosa, to dovodi do pojave "bujične erozije" (slika 4.24). Nanos koji nosi vodotok ostaje istaložen u poplavljenom području (slika 4.25) i pravi veće štete nego da su objekti bili poplavljeni čistom vodom.

Slika 4.24: Bujična erozija - Vlasina, 1987 (Izvor: IJČ)

Usled naglog nadolaska, bujični talasi imaju vrlo izraženo strmo čelo (**bujična pesnica**), koje ima veliku destruktivnu moć. Čelo talasa ruši drveće i objekte u koritu i priobalju i zahvata sav otpad iz ovog pojasa. Usled toga, bujični talasi pronose velike mase **plivajućeg (površinskog) nanosa**. U slučaju nailaska na usko grlo u rečnom koritu (prirodno suženje, mostovi sa stubovima u koritu i dr.), dolazi do zaustavljanja i gomilanja rečnog i plivajućeg nanosa. To prouzrokuje veliki uspor usled koga se uzvodno od lokacije zagušenja podiže nivo vode i povećavaju razmere plavljenja. Ova pojava često dovodi do rušenja mostovske konstrukcije (slika 4.26).

Slika 4.25: Nanos uz korito vodotoka, po prolasku poplave - Vlasina, 1987 (Izvor: IJČ)



Slika 4.26: Primeri mostova srušenih usled nagomilavanja plivajućeg nanosa (Izvor: IJČ)

Protiverozione mere i radove čini kompleks zaštitnih mera i metoda usmerenih ka regulisanju površinskog oticanja, zaštiti zemljišta od spiranja sa padina, uspostavljanju i povećanju plodnosti erodiranih zemljišta, njihovom racionalnijem korišćenju i otklanjanju razloga koji mogu da izazovu eroziju.

Protiverozioni radovi obuhvataju izgradnju različitih objekata (tehnički radovi), kao i radove na šumskim i poljoprivrednim melioracijama (biološki, biotehnički i agrotehnički radovi).

Tehnički radovi služe za neposrednu zaštitu od poplavnih voda i za zadržavanje bujičnih nanosa. U ovu grupu spada izgradnja podužnih i poprečnih građevina za uređenje korita bujičnih vodotoka (kanala, regulacija, kineta, obaloutvrda, zemljanih nasipa, pregrada, pragova). Međutim, na bujičnim vodotocima se grade i specifični objekti kao što su konsolidacioni pojasevi i kaskade radi smanjenja erozije korita (slika 4.27) i bujične pregrade sa namenom zadržavanja nanosa koji nastaje u uzvodnim delovima sliva (slika 4.28). Takođe, grade se mikro-retenzije i male akumulacije za vodu i zadržavanje bujičnih nanosa.

Slika 4.27: Rečno dno fiksirano pragovima (Izvor: czech-rivers.blogspot.com)

Slika 4.28: Bujična pregrada (Izvor: IJČ)

Pošumljavanje i zatravljivanje spadaju u grupu **bioloških radova**. Radi stvaranja uslova za njihovu primenu se, u okviru biotehničkih radova, izvode konturni rovovi, terase, pleteri i gradoni. **Agrotehničke radove** čine melioracije poljoprivrednih zemljišta, popravka strukture zemljišta, itd.

Protiverozione mere čini skup ekonomskih, administrativnih i drugih akcija kojima se utiče na način obrade, održavanje i upravljanje zemljištem, šumama i vodama u slivu i na načine njihovog korišćenja.

4.1.6 Zaštita od leda

Kada se u zimskom periodu voda ohladi do temperature od 0°C, na rekama se pojavi led. Za pojavu leda je potrebno da srednje dnevne temperature vazduha u određenom periodu budu negativne. Kada suma negativnih temperatura vazduha u toku jednog zimskog perioda dostigne 20-50°C zima se ocenjuje kao „blaga" i ledenih pojava nema ili su retke. Nasuprot tome, dugotrajne i oštre zime imaju velike vrednosti suma negativnih temperatura vazduha, u dijapazonu od 300-500°C i tada se na nekim rekama javljaju vrlo ozbiljne ledene pojave.

Postoji više mogućih oblika leda na rekama, od kojih su najznačajniji površinski led (priobalni led, sante leda) i dubinski led. Vrste ledenih pojava i njihova ozbiljnost uglavnom zavise od hidroloških i hidrauličkih uslova, pre svega podužnog pada korita, kao i uslova tečenja u samom rečnom koritu.

Na brdsko-planinskim rekama se led ne javlja, jer su brzine vode velike. Međutim, na ravničarskim rekama se led javlja u svakoj oštroj zimi, i to najpre kao površinski led uz rečne obale, jer su tu najmanje brzine vode (slika 4.29).

Ukoliko niske temperature traju duže, led postepeno pokriva vodno ogledalo i kreće se (slika 4.30), a na nekim lokalitetima se zaustavlja, stvarajući kompaktnu ledenu koru (slika 4.31). Debljina leda na jezerima i sporijim ravničarskim rekama može da dostigne 1 do 2 m.

Slika 4.29: Priobalni led (Izvor: riverice.wordpress.com)

Slika 4.30: Ledohod na Dunavu, zima 2012. (Izvor: IJČ)

Slika 4.31: Ledostaj na Dunavu uzvodno od brane HE Đerdap 1, zima 2012. (Izvor: IJČ)

Slika 4.32: Nagomilavanje leda na Dunavu, zima 2017. (Izvor: IJČ)

U hidrotehnici su brojni problemi vezani za led. Najopasnija je pojava uspora i/ili zatvaranje proticajnog profila koje može dovesti do "ledene" poplave. Na Dunavu su u prošlosti zabeležene brojne ledene poplave, sa teškim posledicama. Poslednja ledena poplava je zabeležena u Mađarskoj, 1956. godine, a nastala je usled ledenih barijera u oštrim krivinama na srpskom sektoru Dunava.

Na građevine u rečnom koritu led ima višestruko nepovoljno dejstvo: deluje kao statičko opterećenje, led u porama ugrožava stabilnost i mehaničku otpornost građevina, a udari ledenih santi imaju dinamički uticaj. Posredna šteta nastaje jer se tokom leda obustavlja plovidba na plovnim rekama. Mogu se pojaviti problemi sa vodosnabdevanjem naselja ili industrije ako led blokira vodozahvat.

Regulacijom vodotoka se mogu poboljšati uslovi transporta leda. Regulacionim radovima se ublažavaju oštre krivine, ujednačava proticajni profil i uklanjaju prirodne i veštačke

prepreke iz glavnog korita i inundacija. Takođe se grade i specifični objekti za kontrolu režima leda (za zadržavanje ili usmeravanje leda u pokretu, evakuaciju leda i dr.).

Pri dimenzionisanju svih objekata u rečnom koritu (regulacionih građevina, stubova mosta itd.) treba uzeti u obzir statički i dinamički uticaj leda.

4.2 Obezbeđenje uslova za racionalno korišćenje voda

4.2.1 Vodozahvati

Rečna voda se zahvata i koristi za različite namene: vodosnabdevanje stanovništva i industrije, navodnjavanje, uzgoj ribe, proizvodnju električne energije i drugo. Sam rečni tok se koristi za plovidbu, uzgoj ribe, sport, kupanje, rekreaciju i druge slične namene.

Slika 4.33: Lokalna zaštita vodozahvatne građevine (Izvor: IJČ)

U slučaju da se voda zahvata iz reke da bi se koristila za određenu namenu, grade se vodozahvati koji se moraju zaštititi od štetnog dejstva voda. Ukoliko je vodozahvat lociran na samoj obali reke, potrebni su relativno mali zahvati na uređenju vodotoka – zaštita obale uzvodno i nizvodno od vodozahvata radi održavanja stabilnog proticajnog profila (slike 4.33 i 4.34). Poželjno je da vodozahvat bude lociran na konkavnoj obali, kako se ne bi zasipao rečnim nanosom.

Često se uz vodozahvat gradi i pregrada rečnog korita, koja obezbeđuje dovoljan nivo vode na tom lokalitetu tokom perioda malih voda (slika 4.35). Ovakav objekat zahteva značajnije regulacione radove i stalno održavanje.

Slika 4.34: Lokalna zaštita vodozahvata (ustave) u sistemu za navodnjavanje (Izvor: IJČ)

Moguće je da se vodozahvat postavi na pontonu, koji ulazi u proticajni profil reke (slika 4.36). U tom slučaju je objekat potrebno zaštititi od udara leda i krupnog plivajućeg otpada posebnom rešetkastom konstrukcijom, a potrebna je i stabilizacija obale u zoni objekta.

Slika 4.35: Vodozahvat sa pregradom (Izvor: ozonpress.net)

Slika 4.36: Vodozahvat na pontonu [89]

4.2.2 Brane i akumulacije

Brana je stalan ili privremeni objekat koji pregrađuje dolinu ili korito vodotoka radi akumuliranja ili retenziranja vode ili deponovanja jalovine.

Sve brane imaju uticaj na korito vodotoka koji pregrađuju, pri čemu je on posebno značajan u slučaju prirodnih vodotoka. Naime, u prirodnom rečnom toku, dugoročno posmatrano, postoji veoma osetljiva dinamička ravnoteža između protoka, brzina i dubina vode, koncentracije i krupnoće nanosa, morfoloških karakteristika vodotoka (oblik i dimenzije poprečnog profila, pad dna, oblik trase) i hidrauličkih otpora. Izgradnja brane sa akumulacijom izaziva poremećaj dinamičke ravnoteže u kojoj se nalazi prirodni vodotok, sa efektima koji se osećaju u prostoru akumulacije i propagiraju uzvodno i nizvodno od profila brane.

U zoni prostiranja uspora od brane i u prostoru same akumulacije odvija se proces taloženja nanosa (slike 4.37 i 4.38). Položaj i oblik nanosnih naslaga u određenoj akumulaciji zavise od više različitih faktora. U slučaju nekih akumulacija, proces taloženja je tako intenzivan da se korisna zapremina akumulacije veoma brzo gubi. Troškovi stalnog uklanjanja nanosa mogu biti tako veliki da se dovodi u pitanje ekonomska opravdanost iskorišćavanja objekta. Čak i ako proces nije intenzivan, taloženje nanosa u akumulaciji predstavlja problem za njene korisnike, jer nanosne naslage mogu da ometaju ili onemoguće funkcionisanje objekata u akumulaciji. Druge nepovoljne posledice su nastanak sprudova koji ometaju plovidbu ili umanjuju estetske kvalitete akumulacije, zamuljenje i pogoršanje kvaliteta vode, i dr. Sve ove pojave zahtevaju određen obim radova i mera za sanaciju.

Slika 4.37: Nanos istaložen u akumulaciji (Izvor: IJČ)

Slika 4.38: Naslage nanosa u Jablaničkom jezeru na Neretvi (Izvor: atvbl.com)

Rečni nanos se najpre delimično zadržava u zoni isklinjavanja uspora od akumulacije, u kojoj su smanjene brzine toka i transportne sposobnosti za nanos u odnosu na prirodan rečni tok. Nanosne naslage u ovoj zoni postepeno rastu u uzvodnom pravcu, sve dok se ne dostigne novo ravnotežno stanje. Ovaj proces ima više nepovoljnih posledica: grananje toka, dopunski uspor, potapanje priobalnih površina i povišenje nivoa podzemnih voda. Nanos koji se u ovoj zoni istaložio u periodima kada je u akumulaciji nivo vode visok spiraće se kada se nivo obori.

Do pojave dopunskog uspora (povišenje nivoa vode za isti protok) dolazi zbog smanjenja propusne moći korita, koje je posledica istaložavanja nanosa. Dopunski uspor, koji se javlja i u plitkim i u dubokim akumulacijama, može dostići značajnu veličinu tokom veka korišćenja akumulacije. Najopasniji je dopunski uspor pri velikim vodama, jer smanjuje stepen zaštite od poplava, tako da se nasipi moraju povremeno nadvišavati.

Obale rečnog korita u zoni akumulacije su često ugrožene oscilacijama nivoa i talasima od vetra, tako da se moraju zaštiti obaloutvrdama.

U akumulaciji se zadržavaju skoro sve frakcije nanosa, tako da se iz nje ispušta relativno čista voda. Ispuštanje vode neopterećene nanosom kroz ispuste, turbine ili preko preliva, dovodi do poremećaja prirodnog kvazi-ravnotežnog režima vodotoka na sektoru nizvodno od brane. Taj proces je povoljan za energetsku proizvodnju, jer se snižava donja voda hidroenergetskog objekta, ali erozija ima i mnogobrojne negativne posledice: dolazi do rušenja obala, potkopavanja obaloutvrda i drugih regulacionih objekata, ugroženi su mostovski stubovi i oslonci, a može čak biti ugrožena i stabilnost same brane. Posledice erozije (ugrožavanje objekata, pojava regresione erozije na pritokama itd.) mogu biti značajne, tako da su u nekim slučajevima potrebni veliki investicioni radovi u cilju zaštite objekata i obala vodotoka, koji mogu dovesti u pitanje ekonomsku opravdanost eksploatacije akumulacije.

Obim radova na uređenju vodotoka čije se vode koriste za proizvodnju električne energije zavisi od tipa i veličine objekta. U slučaju malih hidroelektrana obim radova zavisi od tehničkog rešenja, a najčešće se ono bira tako da ima što manji uticaj na životnu sredinu reke i priobalja (slika 4.39).

Slika 4.39: Regulacija u zoni male hidroelektrane (Izvor: minihydro.co)

Slika 4.40: Regulacija Dunava u zoni hidroelektrane Gabčikovo (Izvor: pluska.sk)

U slučaju velikih brana i hidroelektrana (slika 4.40) najčešće se štite relativno kratke deonice uzvodno i nizvodno od objekata, koje su pod uticajem neustaljenog režima rada. Takođe, često se uzvodno od brane grade usporni nasipi, kojima se priobalno područje štiti od velikih voda. Brojni su primeri velikih hidroenergetskih sistema, u sklopu kojih je vodotok potpuno izmešten, izgrađeni kanali i brojni drugi objekti (vodozahvati, prevodnice, kanali, itd.).

4.2.3. Plovidba

U dugom periodu ljudske istorije vodni transport je predstavljao jedinu mogućnost za prenos većih tereta. Tek u XIX i XX veku pojavljuju se železnički i drumski saobraćaj, koji se brzo razvijaju, postepeno potiskujući unutrašnji vodni saobraćaj u drugi plan.

Unutrašnji vodni transport, u poređenju sa konkurentskim vidovima saobraćaja - železničkim i drumskim, ima određene prednosti i mane. Prevoz robe plovnim putem iziskuje znatno manje troškove nego kod drugih vidova saobraćaja, pa je posebno pogodan za transport velikih količina tereta male vrednosti. Pored toga, unutrašnji vodni transport ima znatne prednosti i sa ekološkog aspekta, jer znatno manje zagađuje životnu sredinu nego drugi vidovi saobraćaja.

Mana unutrašnjeg vodnog saobraćaja je, pre svega, to što zavisi od meteoroloških i hidroloških uslova. Na deonicama plovnog puta koje nemaju obezbeđene plovne gabarite dolazi do zastoja ili prekida transporta u periodima malih voda, a plovidba se prekida pri velikim vodama i usled pojave leda, magle ili većih talasa od vetra.

Infrastrukturu unutrašnjeg vodnog saobraćaja čine: mreža plovnih puteva, flota i pristaništa.

Danas u Evropi postoji 7 klasa unutrašnjih plovnih puteva, koje se određuju na osnovu klasifikacije koju je donela Evropska ekonomska komisija (EEK). Klase unutrašnjih plovnih puteva određene su na osnovu gabarita najvećeg samohodnog broda ili guranog brodskog sastava koji na njima mogu da plove. Tipski gurani sastav, na osnovu koga se određuje klasa plovnosti reke ili kanala evropske kategorije, sastoji se od barži tipa ''Evropa II'', koje imaju standarne dimenzije: dužina 76,5 m, širina 11,40 m i gaz koji se menja zavisno od količine utovarenog tereta u tonama (2,0 m sa teretom od 1.250 t, 2,5 m sa teretom od 1660 t i 2,8 m sa teretom od 1.850 t). Utvrđivanjem klase potvrđuje se da su na reci ili kanalu obezbeđeni parametri plovnosti za samohodne brodove i brodske sastave određenih dimenzija ili dozvoljava da se regulacionim i drugim radovima u određenom periodu obezbede parametri plovnosti potrebni za tu klasu.

Korita reka koje su pogodne za plovidbu se uređuju da bi se obezbedio kontinuitet plovidbe u toku navigacionog perioda (period godine kada nema prekida plovidbe usled pojave leda, magle, jakog vetra, izuzetno niskih ili visokih vodostaja reke), sigurnost plovidbe u svim meteorološkim i hidrološko-hidrauličkim uslovima i povoljni navigacioni uslovi duž celog plovnog puta.

Na plovnim rekama nanosne naslage stvaraju probleme plovidbi, naročito u periodu malih voda. Ovaj problem je ilustrovan slikom 4.41, na kojoj se vidi sprud u koritu Dunava kod Apatina, koji je u dužem periodu bio velika prepreka plovidbi.

Slika 4.41: Poprečni sprud u koritu Dunava (Izvor: IJČ)

Da bi se postigli potrebni gabariti plovnog puta (dubine, širine i zakrivljenost trase) za nesmetano kretanje merodavnog plovila, u osnovnom koritu se reke primenjuju mere kao što je korekcija trase i bagerovanje sprudova i grade regulacione građevine. Najčešće se izvode sistemi napera, kojima se korito sužava (slika 4.42). U suženom koritu su brzine i vučne sile veće, tako da se nanos neće zaustavljati i formirati sprudove.

Slika 4.42: Regulacija osnovnog korita reke Rajne za plovidbu (Izvor: gsi.ie)

Ukoliko ovim radovima nije moguće postići odgovarajuće uslove, zbog nepovoljnog hidrološkog režima, izgradnjom ustava i akumulacija se potpuno menja režim protoka i nivoa da bi se omogućila plovidba tokom cele godine.

U prethodnim vekovima su preduzimani vrlo obimni radovi radi obezbeđenja plovnosti, koji su rezultirali potpunom promenom hidromorfoloških uslova vodotoka. Danas je poželjno da se uređenje vodotoka radi postizanja potrebnih dimenzija plovnog puta postigne merama koje ne utiču nepovoljno na životnu sredinu [72].

Principi rečne hidrotehnike se koriste i pri projektovanju velikih objekata na plovnim rekama, kao što su luke (slika 4.43) i marine (slika 4.44). Svi objekti se moraju zaštititi od štetnog dejstva voda i zasipanja rečnim nanosom.

Slika 4.43: Rečna luka (Beograd) (Izvor: skyscrapercity.com)

Slika 4.44: Projekat rečne marine na Dunavu (Izvor: gradnja.rs)

4.2.4 Sport, kupanje, rekreacija

Korišćenje za sport, kupanje, rekreaciju i druge slične namene je sve značajniji motiv uređenja vodotoka. U tim slučajevima je potrebno obezbediti stabilnost korita u zoni za rekreaciju i kupanje, potrebnu dubinu i kvalitet vode (slike 4.45 do 4.46). Nivo vode u zoni koja se koristi za kupanje se može podići postavljanjem privremenih brana.

Slika 4.45: Plaža na rečnoj obali – Dunav, Novi Sad (Izvor: mojnovisad.com)

Slika 4.46: Privremena brana obezbeđuje nivo vode za kupanje – Crni Timok, Zaječar (Izvor: mapio.net)

5 PODLOGE ZA PROJEKTOVANJE UREĐENJA VODOTOKA

5.1 Uvodne napomene

Prikupljanje podloga za izradu projekta uređenja vodotoka je vrlo ozbiljan zadatak za projektanta, jer od kvaliteta podloga zavisi i kvalitet projekta. Kako su za projekat uređenja vodotoka potrebne veoma raznovrsne podloge, u toj fazi učestvuje tim stručnjaka različitih profila, kojim rukovodi projektant – građevinski inženjer hidrotehničke struke.

Podloge se prikupljaju u okviru terenskih istražnih radova od kojih se neki organizuju i pre početka izrade projekta. Naime, da bi se istražila promena parametara režima voda, nanosa, leda i životne sredine u toku vremena, potrebno je dugotrajno osmatranje i statistička obrada vremenskih ili prostornih serija podataka.

Čest slučaj je da se obim istraživanja smanjuje na minimum i to pravda nedostatkom vremena i sredstava za obavljanje kompleksnih terenskih istražnih radova i studijskih analiza. Međutim, treba znati da je koštanje terenskih istražnih radova najčešće zanemarljivo u odnosu na ukupne investicije, a uštede koje se mogu postići uz dobre podloge mogu biti veoma velike.

Za projektovanje uređenja vodotoka potrebne su:

- topografske podloge,
- morfološke podloge,
- hidrološke podloge,
- meteorološke podloge (najčešće samo podaci o brzini vetra, ukoliko je potreban proračun visine talasa od vetra),
- podaci o režimu leda,
- hidrauličke podloge,
- psamološke podloge (podaci o rečnom nanosu),
- geološko-geomehaničke podloge,
- biološke podloge,
- ekonomske podloge,
- ostale podloge.

5.2 Topografske i morfološke podloge

5.2.1 Snimanje korita vodotoka

Snimanje korita vodotoka vrši snimanjem poprečnih profila. Snimanje se sastoji od dve operacije, koje se mogu podvijati simultano ili odvojeno: snimanje suvih delova major korita (obala i inundacija) i snimanje delova korita pod vodom (osnovno korito i rukavci).

5.2.1.1 Snimanje suvih delova major korita

Snimanje obale (deo korita iznad nivoa vode u trenutku snimanja) i suvih delova korita za veliku vodu (inundacija) se vrši standardnim geodetskim metodama, koje se oslanjaju na stalne geodetske tačke u priobalju vodotoka (slika 5.1). Ukoliko se koriste standardni geodetski instrumenti (teodolit, totalna stanica) potrebno je postavljanje poligonog vlaka duž obe obale reke.

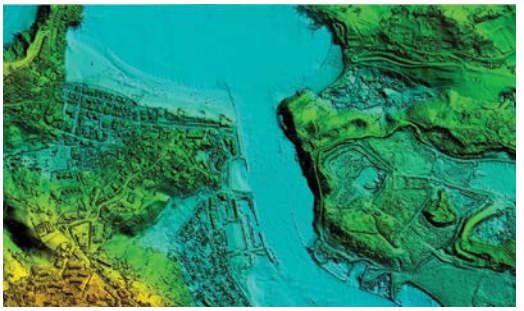
U novije vreme za snimanje se najčešće koristi GPS tehnologija. Međutim, na delovima terena koji su obrasli visokim rastinjem, a to je vrlo čest slučaj u priobalju reka, GPS signal često nije dostupan, pa se moraju koristiti drugi instrumenti i tehnike merenja.

I pored velikog napretka tehnologije i instrumenata u geodeziji koji je ostvaren u novije vreme, snimanje inundacija ostaje najteži i najskuplji deo snimanja rečnog korita, zbog velike dužine poprečnih profila i nepristupačnosti terena (gusta vegetacija, zabareno tlo, rukavci, otoke i druge stajaće vode).

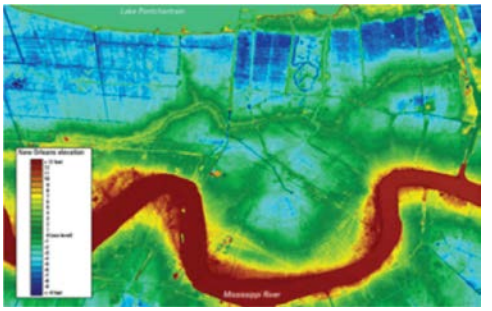
Zbog pomenutih teškoća, u novije vreme se za prikupljanje topografskih podataka o major koritu vodotoka sve češće koristi LIDAR tehnologija. Senzor LIDARA-a šalje pulsni, uzak snop visoko-frekventnih laserskih zraka prema tlu iz uređaja postavljenog na donjem delu aviona ili helikoptera (slika 5.2). Senzor beleži vreme od emisije lasera do povratka odbijenog zraka. Podaci se mogu videti u GIS-u (geografskom informacionom sistemu) kao tačke, linije ili konture (slike 5.3 i 5.4). Najpovoljnije je predstavljanje podataka u vidu mreže, koja područje deli na ćelije kojima pripada određena kota terena.

Slika 5.1: Geodetsko snimanje inundacija (Izvor: IJČ)

Slika 5.2: LIDAR (Izvor: lidar-america.com)



Slika 5.3: 3D prikaz snimanja LIDAR (Izvor:dielmo.com)



Slika 5.4: 2D prikaz snimanja LIDAR-om (Izvor: linkedin.com/pulse/producing-geographic-data-lidar-kodi-volkmann)

Korišćenje LIDAR-a (za sada) ograničava visoka cena angažovanja letilice i obrade podataka. Takođe, period godine kada je snimanje moguće je ograničen jer su potrebni dobri vremenski uslovi i slabo razvijena vegetacija (najpovoljniji su rano proleće ili kasna jesen). Ova tehnologija se stalno razvija, tako da će uskoro snimanja biti moguća i u periodima kada na terenu postoji razvijena vegetacija.

5.2.1.2 Snimanje delova korita pod vodom

Metoda snimanja rečnog korita (batimetrija) zavisi od postavljenog cilja (jednokratno ili periodično snimanje), veličine vodotoka i hidrološko-hidrauličkih uslova u vreme merenja.

Do skora je batimetrija rečnog korita podrazumevala snimanje poprečnih profila na unapred definisanim razmacima (zavisno od namene podloga i veličine vodotoka), ali sa razvojem naprednih geodetskih tehnika se detaljnost snimanja povećala, tako da je moguće snimiti kompletno rečno dno i dobiti digitalnu podlogu koja se zatim koristi za proračune ili projektovanje.

Poprečni profil rečnog korita se u planu standardno definiše koordinatama krajnjih tačaka na obalama, brojem i stacionažom. Ako je planirano da se isti profil periodično snima, potrebno je obeležiti stalne tačke na obalama reke trajnim belegama i utvrditi njihove tačne koordinate.

Za snimanje dubina korita **plitkih vodotoka** se koristi sondirka (letva graduisana na 1 cm, dužine do 3 m) koju radnik opremljen čizmama postavlja u određenim tačkama rečnog korita. Položaj tačke u kojoj se meri dubina određuje se pomoću graduisanog užeta, koje je prethodno razapeto između obala ili geodetski metodama. Tokom snimanja dubina se prate promene vodostaja na stalnom ili privremeno postavljenom vodomeru. Broj vertikala u kojima se mere dubine na klasičan način zavisi od širine vodotoka (na primer, bar 20 na vodotokovima veće širine).

Umesto sondirke i užeta za merenje se mogu koristiti prizma teodolita ili rover GPS uređaja, koje radnik postavlja u određenim tačkama rečnog korita (slika 5.5).

Slika 5.5: Snimanje korita pomoću GPS-a (Izvor: cssolutions.ie)

Slika 5.6: Trimaran za batimetrijsko snimanje (Izvor: gpserv.com)

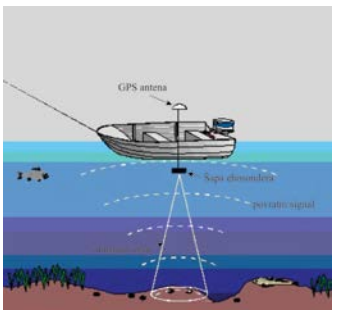
Savremen način snimanja rečnih korita, akumulacija i jezera je pomoću plovila na koje je montiran ehosonder i GPS uređaj (slike 5.6 i 5.7). Prostorne koordinate svake snimljene tačke dna se određuju spregnutim radom ova dva uređaja. Ukoliko zbog male dubine ili drugih ograničenja nije moguće koristiti čamac sa motorom, uređaji se montiraju na malo plovilo (trimaran), kojim se upravlja sa obale.

Ehosonder (ultrazvučni dubinomer) je uređaj koji meri brzinu kojom se zvučni talasi prostiru kroz vodu, od sonde do dna i nazad (slika 5.8). Kako je brzina prostiranja zvučnih talasa kroz vodu konstantna (pri određenoj temperaturi vode), dubina je

srazmerna vremenu putovanja talasa. Smetnje u radu ehosondera može da napravi visoka koncentracija suspendovanog nanosa (jer se zvučni talasi odbijaju od čestica nanosa). Merenje ehosonderom nije tačno na delu korita uz obalu, jer ehosonder meri najkraće (a ne vertikalno) rastojanje do dna. Zato je u zoni plitke vode najbolje izvršiti sondiranje dubina. Pre početka merenja potrebno je izvršiti kalibraciju uređaja nad tvrdom podlogom, kako bi se uzeo u obzir uticaj temperature vode.

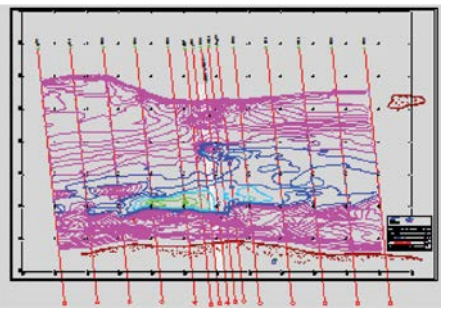
Za snimanje korita reka najčešće se koristi klasični "single beam" ehosonder, koji snima dno duž linije kretanja plovila (slike 5.9 i 5.10). U novije vreme se koristi i "multi beam" ehosonder za snimanje cele površine dna 3 dimenzije (slika 5.11). Zbog (za sada) visoke cene, obično se koristi samo za snimanje nekih lokaliteta u rečnom dnu (na primer potonulih brodova, mostovskih stubova i drugih objekata na dnu reke - slika 5.12).

Slika 5.7: Čamac za snimanje opremljen ehosonderom i GPS uređajem (Izvor: IJČ)

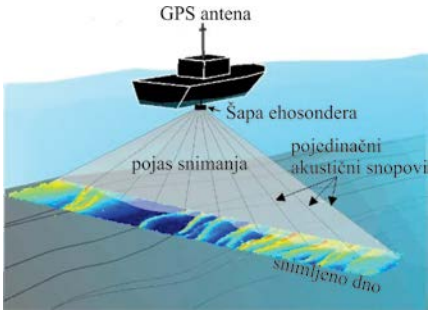


Slika 5.8: Prikaz načina rada "single beam" ehosondera (Izvor: ozcoasts.gov.au)

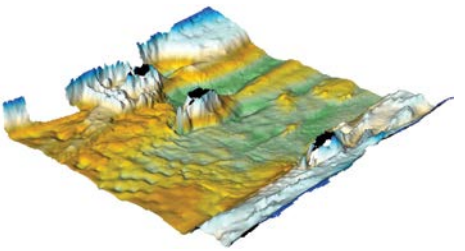
Slika 5.9: Ekran "single beam" ehosondera prikazuje rezultate snimanja dna (Izvor: IJČ)



Slika 5.10: Situacija rečnog dna snimljena klasičnim "single beam" ehosonderom (Izvor: Plovput)



Slika 5.11: Prikaz načina rada "multi beam" ehosondera (Izvor: eagmdsurvey.com)



Slika 5.12: 3D prikaz rečnog dna Dunava u zoni mosta kod Beške snimljen "multi beam" ehosonderom (Izvor: IJČ)

5.2.2 Prikaz rečnog korita

Rečno korito se, za potrebe analiza ili projektovanja, prikazuje u tri projekcije:

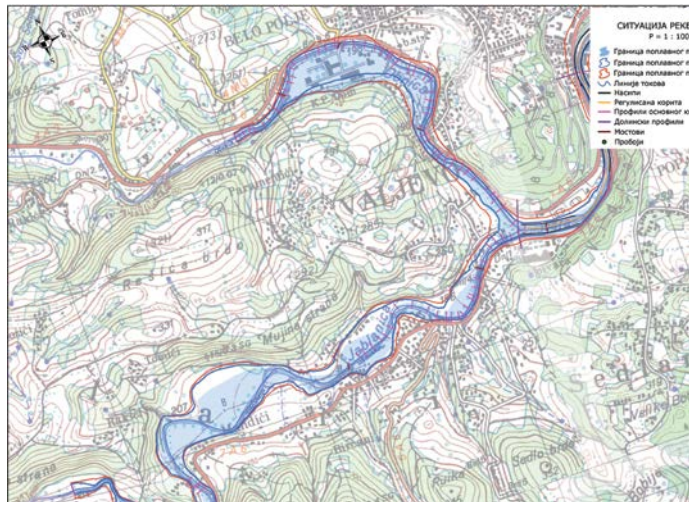
- situacioni plan daje sliku vodotoka u horizontalnoj projekciji (planu),
- podužni profil predstavlja presek vertikalne ravni po osovini korita i rečnog korita,
- poprečni profil predstavlja presek vertikalne ravni, upravne na tok i rečnog korita.

5.2.2.1 Situacioni plan

Situacioni plan je geodetska podloga koja mora da obuhvati osnovno rečno korito i širok pojas priobalnog terena, kako bi se mogle uneti eventualne promene trase, projektovani objekti van korita, granice plavnih zona pri velikim vodama i drugo.

Razmera situacionog plana zavisi od namene podloge. Opšte karakteristike sliva i vodotoka se prikazuju u razmerama od 1:10.000 (slika 5.13) do 1:300.000. Razmera u kojoj se prikazuje trasa zavisi od veličine vodotoka i dužine projektne deonice (1:2500 i 1:5000 za manje, 1:10.000 za velike vodotoke). Za projektovanje i prikazivanje regulacionih radova i objekata koriste se razmere 1:200, 1:500, 1:1000, 1:2500, 1:5000.

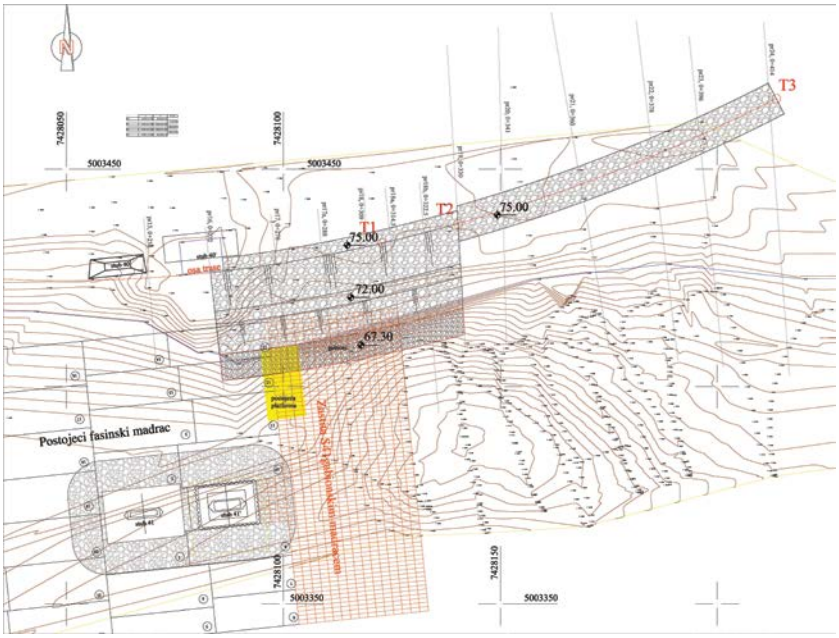
Na situacionom planu koji se koristi za projektovanje regulacionih radova (slika 5.14) se obavezno prikazuju: podaci o priobalnom terenu (izohipse i karakteristične tačke terena sa kotama), konture rečnog korita (sa linijom ureza vode pri snimanju), rečno dno sa izobatama (linije istih dubina, uz obaveznu naznaku o nivou vode pri kome su određene) ili izohipsama, poprečni profili (položaj i oznaka profila), osovina toka sa stacionažom, smer toka i objekti u koritu i na obalama. Eventualno se unosi i linija najvećih dubina (talveg) i linija najvećih brzina (matica).



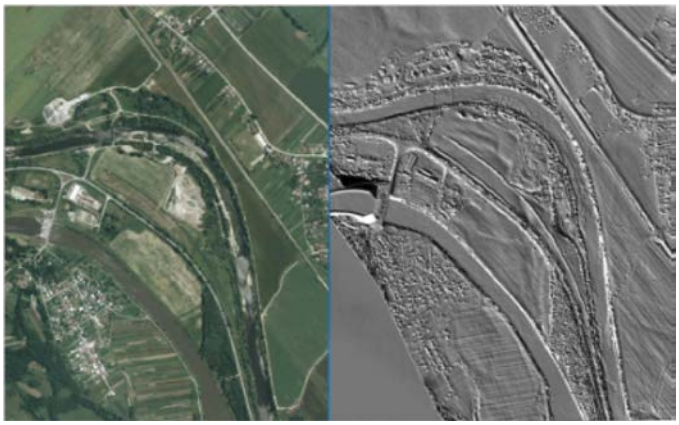
Slika 5.13: Situacija reka Jablanice i Kolubare sa granicama poplavnih područja, R = 1:10.000 (Izvor: IJČ)

Na situacionom planu se obavezno prikazuje **stacionaža vodotoka**, merena po osovini rečnog korita. Stacionaža vodotoka se najčešće meri od ušća uzvodno, ali može biti definisana i od izvora nizvodno, što je čak praksa u nekim zemljama. Ukoliko se radi projekat uređenja kraće deonice, a nije poznato rastojanje od ušća, definiše se njena relativna stacionaža.

Tradicionalno su situacioni planovi za potrebe projektovanja regulacionih radova štampani na papiru. Međutim u novije vreme se najčešće koriste u digitalnom obliku i putem specijalizovanih softvera povezuju sa drugim savremenim digitalnim podlogama, kao što su ortofoto snimci (dobijeni avionskim snimanjem), satelitski snimci i digitalni modeli terena (DMT). Primer digitalne podloge je dat na slici 5.15.



Slika 5.14: Situacioni plan objekata za zaštitu stuba mosta kod Beške, R = 1:200 (Izvor: IJČ)

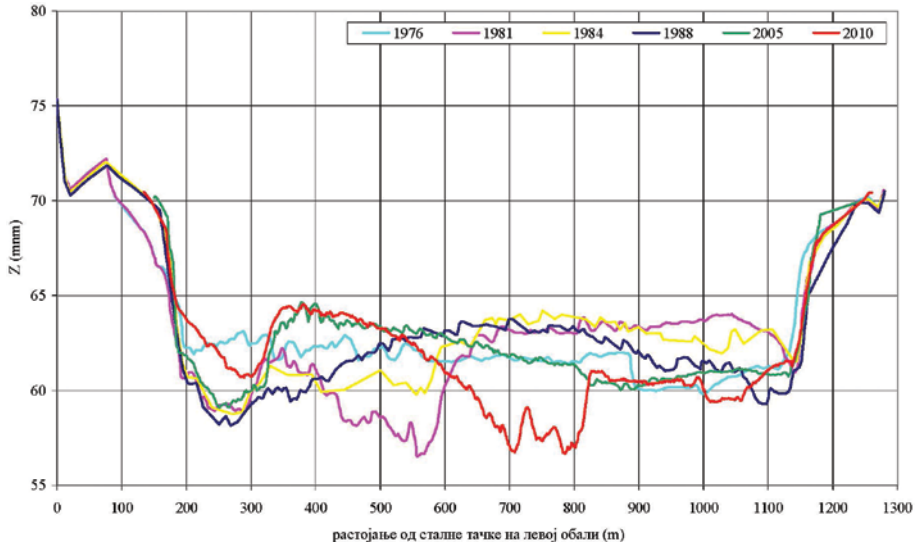


Slika 5.15: Ortofoto i DMT jedne rečne deonice (Izvor: privatna komunikacija)

5.2.2.2 Poprečni profil

Za potrebe morfoloških analiza, kao i za projektovanje regulacionih radova, koriste se poprečni profili u razmeri 1:100/100 (rečice) do 1:100/1000 (velike reke). Uobičajeno je da se leva obala na crtežu nanosi levo, tako da se profil posmatra u pravcu toka (slika 5.16). Osim rastojanja od stalne tačke na levoj obali i kota terena odnosno dna, na poprečni profil se mogu uneti i drugi podaci (objekti u koritu, sastav materijala u dnu, nivoi vode za karakteristične protoke itd.).

Na nekim, najčešće plovnim rekama, poprečni profili se snimaju u određenim vremenskim razmacima, kako bi se identifikovale morfološke promene i planirali potrebni radovi na održavanju i obeležavanju plovnog puta. Primer rezultata uzastopnih snimanja poprečnog profila dat je na slici 5.16.



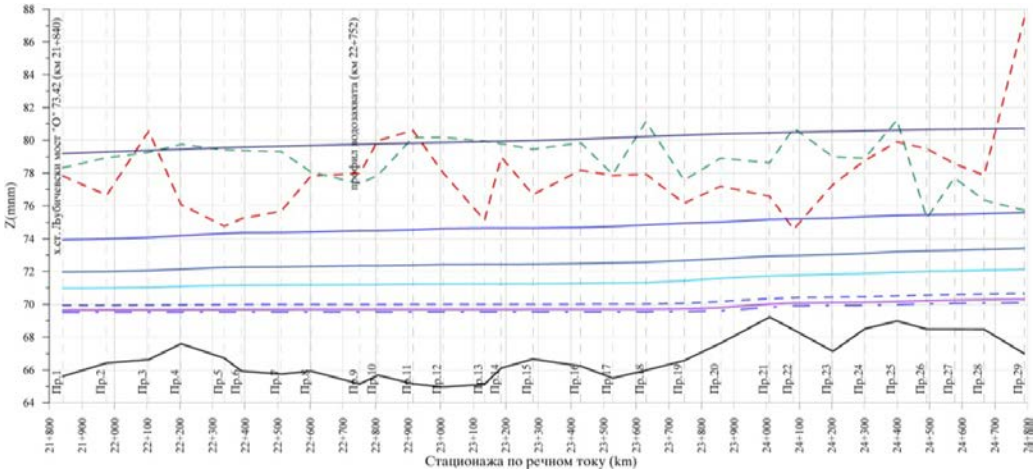
Slika 5.16: Uzastopna snimanja poprečnog profila reke Dunav kod ušća Velike Morave (Izvor: IJČ)

5.2.2.3 Podužni profil

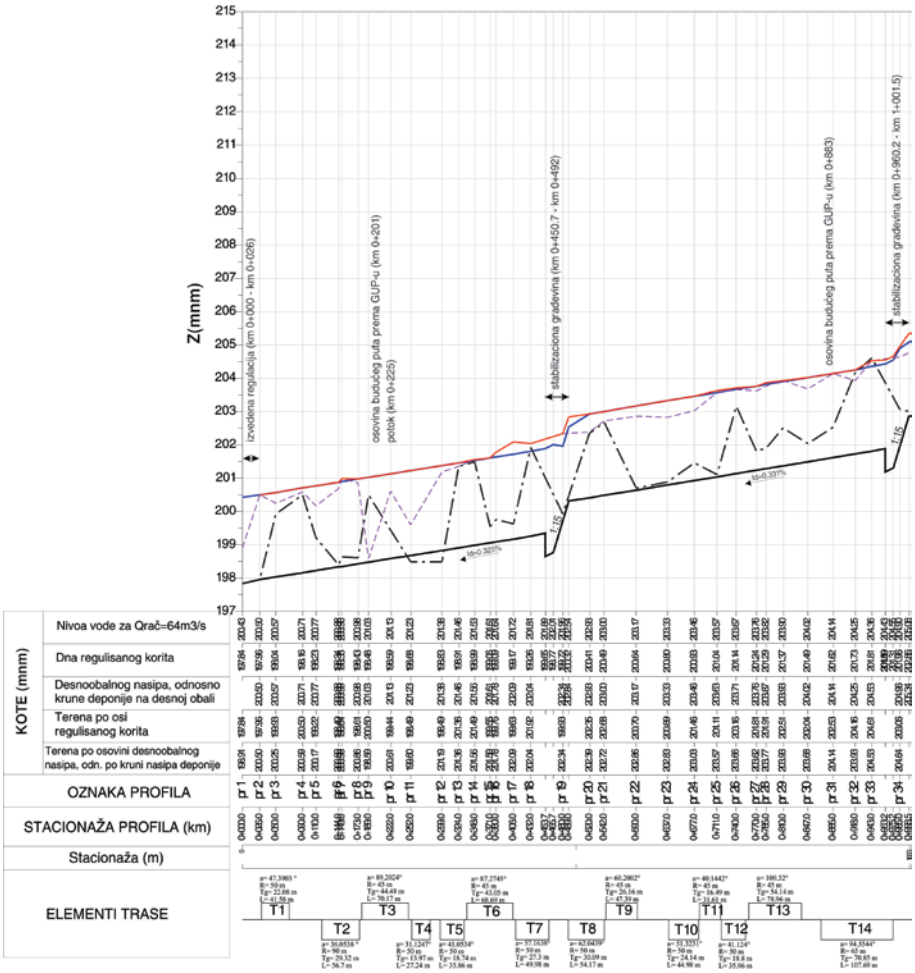
Razmera podužnog profila zavisi od dužine deonice i podataka koji se prikazuju na njemu.

Obavezni elementi podužnog profila su: linije koje povezuju kote terena duž leve i desne obale, linije koja povezuje kote krune nasipa ili visokog terena duž leve i desne obale, linija koja povezuje kote rečnog dna (najčešće najniže tačke – po talvegu), položaj poprečnih profila (stacionaža i oznaka profila), stacionaža toka po osovini i linije nivoa vode za karakterističe protoke.

Primer podužnog profila na kome su prikazani rezultati hidrauličkog proračuna prikazan je na slici 5.17. U projektu regulacionih radova potrebno je u dnu uzdužnog profila upisati i numeričke podatke o parametrima od značaja za projekat (stacionaža, kote nivoa vode, dna i obala, regulacionih građevina, elementi trase regulisanog korita), kao na slici 5.18.



Slika 5.17: Podužni profil deonice Velike Morave sa prikazom linija nivoa vode (Izvor: IJČ)



Slika 5.18: Podužni profil reke sa projektovanim elementima regulacije (Izvor: IJČ)

5.3 Hidrološke podloge

Podaci o hidrološkom režimu vodotoka, odnosno o nivoima i protocima vode su najvažnija podloga za projekat uređenja vodotoka. Bez poznavanja veličine i načina promene ovih hidroloških parametara ne može se sagledati problematika vodotoka ni ući u bilo kakve dalje aktivnosti.

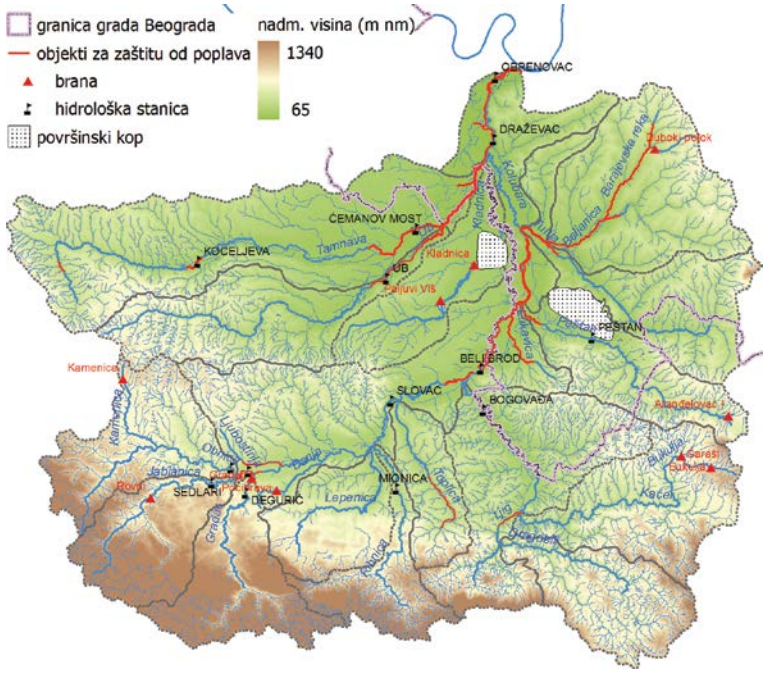
Podaci potrebni za projekat uređenja vodotoka se dobijaju analizom vodostaja i protoka koji su dobijeni merenjem i osmatranjem na stalnim ili privremenim mernim profilima. Ukoliko nema merenih podataka ili su oni nedovoljni ili nepouzdani, računaju se samo protoci koji su potrebni za projekat, empirijskim metodama.

5.3.1 Hidrološki izučeni i neizučeni vodotoci

Prema stepenu izučenosti režima površinskih voda, vodotoci se dele na izučene i neizučene. Najčešće u prvu kategoriju spadaju samo veći vodotoci (površine sliva veće od 200 km^2) i to samo oni koji su značajni sa aspekta upravljanja vodama.

Na **„izučenim“ vodotocima** (odnosno slivovima) postoje hidrološke (vodomerne) stanice na kojima se mere osnovni parametri režima voda – nivoi vode i protoci (slika 5.19), a često se meri suspendovani nanos i kvalitet vode i prate pojave leda. To znači da su u određenoj tački izučenog sliva (x,y) postoje podaci o promeni nivoa vode Z(x,y,t) i protoka Q(x,y,t) tokom vremena.

Merenja na stalnim hidrološkim stanicama organizuje hidrometeorološka služba, koja objavljuje podatke na svoj zvaničnoj web strani i štampa ih u hidrološkim godišnjacima.



Slika 5.19: Hidrološke stanice na slivu reke Kolubare (Izvor: IJČ)

Vrlo često je problem što se deonica koja je predmet studije ili projekta uređenja vodotoka nalazi uzvodno od deonice na kojoj je hidrološka stanica. U tom slučaju se režim voda analizira empirijskim metodama ili se postavlja privremena vodomerna stanica, da bi se posle osmatranja i merenja koja se na njoj vrše u ograničenom vremenskom periodu, uspostavila korelacija podataka sa podacima na zvaničnoj hidrološkoj stanici.

Podaci o protoku u određenoj tački **„neizučenog“ sliva** Q(x,y,t) dobijaju se empirijskim metodama hidroloških proračuna, na osnovu merenih podataka o kišama i poznatih fizičkih karakteristika sliva (topografija, geologija, način korišćenja zemljišta). Podatak o nivou vode Z(x,y,t) može se dobiti samo putem hidrauličkog proračuna za prethodno određen dijapazon protoka vode.

5.3.2 Merenje nivoa vode

Nivo vode se može meriti na vertikalnoj ili kosoj vodomernoj letvi, pomoću limnigrafa ili beskontaktnog merača.

Na vodomernoj letvi (slika 5.20) se meri vodostaj (u cm), najčešće 2 puta dnevno. Broj merenja se povećava u periodu prolaska poplavnog talasa. Za svaki očitani vodostaj H (cm) se može odrediti odgovarajuća kota nivoa vode Z (m), sabiranjem vodostaja i kote "nule" vodomera (određuje se geodetskim merenjem).

Slika 5.20: Vertikalna i kosa vodomerna letva (Izvor: IJČ)

Vodomerna letva treba da bude dovoljno duga da bi obuhvatila ceo dijapazon nivoa, od male do ekstremno velike vode. U suprotnom se merenjem ne mogu dobiti podaci o ekstremnim uslovima, koji su važni za upravljanje vodama.

Limnigraf (slika 5.21) je automatski merni uređaj, koji kontinualno meri nivo vode. Postoji više tipova uređaja (sa plovkom i kontrategom, pneumatski, sa senzorom). Podaci se zapisuju na traci (što se postepeno napušta) ili u digitalnom obliku.

Slika 5.21: Limnigraf (uređaj i kućica) (Izvori: hydro.upol.cz i nrfa.ceh.ac.uk)

U grupu digitalnih merača nivoa vode spada "diver" (slika 5.22), uređaj za merenje nivoa koji se sastoji iz senzora pritiska, bloka za napajanje (baterija) i interne memorije u koju se smeštaju podaci. "Diver" se postavlja u vertikalno postavljenu perforiranu cev i meri apsolutni pritisak, odnosno sumu pritiska vodenog stuba iznad uređaja i atmosferskog pritiska. Da bi se dobio podatak o nivou vode, potrebno je od merene vrednosti oduzeti atmosferski pritisak, koji se meri na posebnom uređaju (BaroDiver).

Slika 5.22: Diver (Izvor: IJČ)

Beskontaktni merači nivoa vode (slike 5.23 i 5.24) rade na principu radara ili ultrazvuka, a mere rastojanje od uređaja (postavljenog na mostu ili stubu) do površine vode. Naročito su pogodni za sisteme za upozorenje na opasnost od poplava, gde su povezani sa sirenama koje se uključuju ako nivo vode prevaziđe definisani prag opasnosti.

Slika 5.23: Ultrazvučni beskontaktni merač nivoa vode (Izvor: senix.com)

Slika 5.24: Radarski beskontaktni merač nivoa vode (Izvor: ott.com)

5.3.3 Merenje protoka vode

Protok vode predstavlja količinu vode koja protiče kroz poprečni presek vodotoka u jedinici vremena. Izražava se u m^3/s ili l/s u zavisnosti od veličine vodotoka.

Protok vode je osnovni i najvažniji hidrološko-hidraulički parametar, za koji se vezuju i ostali parametri rečnog toka. Poznavanje protoka vode neophodan je preduslov za projektovanje i izvođenje radova na vodotoku ili u vezi s njim, bez obzira da li se radi o hidrotehničkim objektima ili o objektima za čije je pravilno funkcionisanje potrebna određena količina vode.

Protoci se određuju merenjem u prirodi. Metode za merenje protoka vode dele se na neposredne i posredne (indirektne) metode.

Merenje protoka **neposrednom metodom** je moguće samo na hidrotehničkim objektima. To mogu biti posebni merni objekti (prelivi, suženi preseci), na kojima je definisana funkcionalna veza između nivoa i protoka, tako da se merenje protoka svodi na registrovanje nivoa vode (slika 5.25). Slično tome se određuje protok na prelivima brane (slika 5.26). Takođe, protok se može dobiti preračunavanjem energije koja je proizvodena na turbinama hidroenergetskog postojenja.

Slika 5.25: Uređen profil za merenje protoka (Izvor: IJČ)

Slika 5.26: Prelivanje preko brane HE Jablanica (Izvor: elektroenergetika.info)

Na rekama se najčešće koriste **posredne metode merenja protoka**, od kojih su najpoznatije metoda "površina-brzina" i metoda mešavine.

Metoda "površina - brzina" je zasnovana na merenju polja brzina i površine poprečnog preseka vodotoka. Na srednjim i većim vodotocima se za merenje brzina koristi hidrometrijsko krilo sa torpedom (slika 5.27), a na malim „mikro krilo" sa štanglom (slika 5.28) i drugi uređaji.

Brzina vode se meri u više vertikala u poprečnom preseku, pri čemu broj vertikala zavisi od veličine vodotoka (slika 5.29). Na rekama se hidrometrijskim krilom brzina meri u najmanje 5 mernih vertikala, iz čamca ili sa mosta, i to u više tačaka po dubini toka.

Broj mernih tačaka zavisi od dubine vode: ako je dubina vode mala ($h < 20$ cm) meri se u jednoj tački; ako je dubina između 20 i 50 cm u 3 tačke; ako je dubina veća od 100 cm potrebno je merenje u pet tačaka (pri površini, 0,2h, 0,6h, 0,8h i pri dnu), kako bi se preciznije definisala promena brzine sa dubinom vode.

Obrada podataka se vrši grafičkom metodom integracije (slika 5.30), a ukupan protok dobija pomoću sledeće jednačine:

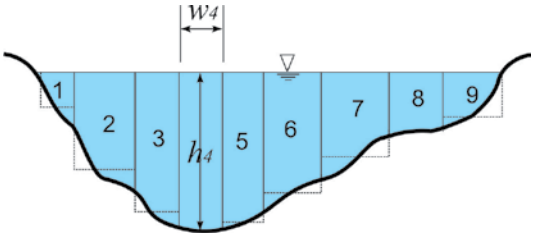
$$Q = V \cdot A = \sum_{i=1}^{n} w_i h_i V_i \qquad (5\text{-}1)$$

gde je: Q - protok vode (m^3/s), V – srednja brzina vode u mernoj vertikali (m/s), A – površina proticajnog profila (m^2), h - dubina vode u vertikali (m), w - rastojanje između vertikala (m).

Slika 5.27: Hidrometrijsko krilo i torpedo (Izvor: nd.water.usgs.gov)

Slika 5.28: „Mikro" hidrometrijsko krilo (Izvor: wavelength-environmental.co.uk)

Slika 5.29: Merenje brzina vode „mikro" hidrometrijskim krilom (Izvor: IJČ)

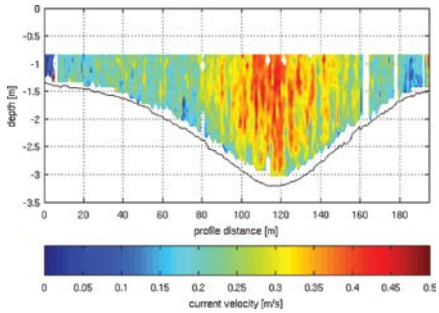


Slika 5.30: Šematski prikaz metode "površina-brzina"

U novije vreme se za merenje polja brzina koristi **ADCP uređaj** (Acoustic Doppler Current Profiler), koji meri brzinu vode koristeći Doplerov efekat. Ako su dubine vodotoka veće, uređaj se montira na plovilo, koje je opremljeno GPS-om radi definisanja položaja u prostoru (slika 5.31). U slučaju manjih vodotoka, ADCP se montira na papuču (trimaran) i njime se upravlja pomoću kablova ili žičare (slika 5.32). Merenjem u poprečnom profilu dobija se kompletan raspored brzina po širini i dubini toka (slika 5.33). Ukoliko je potrebno obezbediti kontinualno merenje brzina vode, ADCP uređaj se može postaviti na obalu, tako da zrak bude usmeren horizontalno (slika 5.34). Ovo je uređaj koji će se sve više koristiti u budućnosti.

Slika 5.31: Čamac sa ADCP uređajem (Izvor: mixzon.com)

Slika 5.32: Trimaran sa ADCP uređajem pri merenju na maloj reci (Izvor: mixzon.com)



Slika 5.33: Rezultat merenja ADCP uređajem (Izvor: delight.eoc.dlr.de)

Slika 5.34: ADCP uređaj postavljen na obali (Izvor: isodaq.co.uk)

Metoda mešavine se primenjuje na malim vodotocima (najčešće potocima), koje odlikuju nepravilni profili, buran režim tečenja i izražena turbulencija. U reku se postepeno ubacuje neki traser (najčešće hemijska supstanca) sa konstantnom koncentracijom (c) i količinom (q). Na nekom nizvodnom profilu se uzima uzorak vode, pa se na osnovu koncentracije trasera (C) određuje protok vode (Q) preko odnosa:

$$Q : q = C : c \tag{5-2}$$

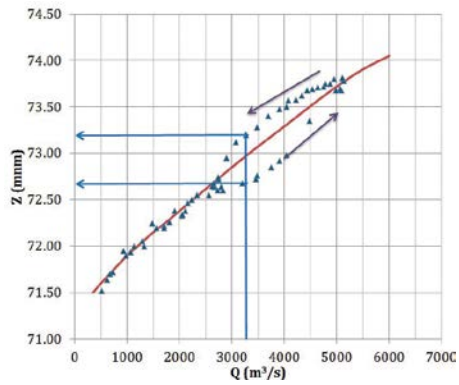
5.3.4 Kriva protoka

Na osnovu podataka hidrometrijskih merenja u jednom profilu vodotoka, koja se vrše nekoliko puta godišnje, formira se kriva protoka. Kriva protoka definiše promenu protoka sa promenom vodostaja ili nivoa vode. Ona se zatim koristi za preračunavanje podataka kontinualnih merenja nivoa vode u takođe kontinualni niz podataka o protoku vode.

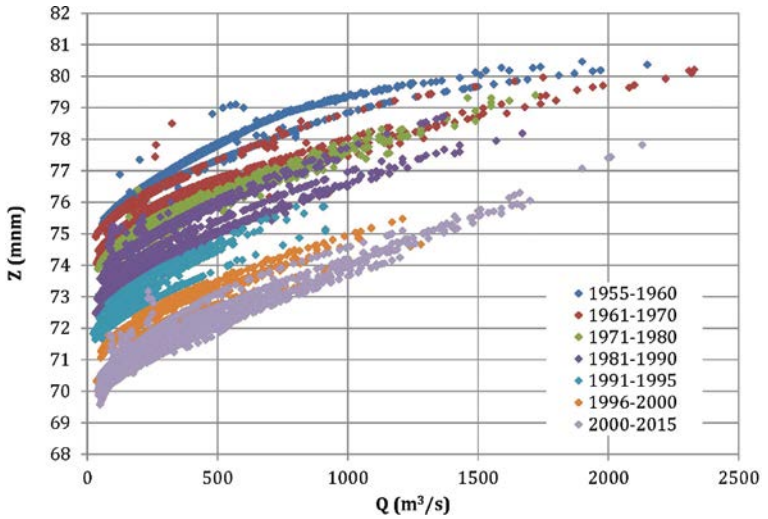
Poznavanje odnosa između protoka i nivoa vode je veoma značajno za mnoge zadatke u rečnoj hidrotehnici, a posebno za hidrauličke proračune gde predstavlja osnovni ulazni podatak.

Najčešće se provlačenjem linije kroz tačke dobijene merenjima određuje jednoznačna kriva koja odgovara ustaljenom režimu tečenja (slika 5.35). Međutim, u domenu velikih voda tečenje je neustaljeno, pa veza između nivoa vode i protoka nije jednoznačna. Naime, u prirodnim vodotocima pri nailasku poplavnog talasa se voda izliva u inundacije i nivo u koritu je niži od onog koji bi se formirao pri ustaljenom tečenju, dok se po prolasku voda vraća u korito i nivoi za isti protok su viši nego u nailasku talasa. Stoga se na krivoj protoka javlja petlja (histerezis), čije karakteristike zavise od hidrološko-hidrauličkih uslova (talas sa jednim pikom ili višestruki talas velikih voda), kao i stanja vegetacije u inundacijama.

Krive protoka se menjaju tokom vremenu jer su merni profili podložni deformaciji. Zbog toga obavezan deo svakog hidrometrijskog merenja čini snimanje poprečnog profila vodotoka. Primer promena krive protoka, koje su posledica velike deformabilnosti mernog profila, dat je na slici 5.36.

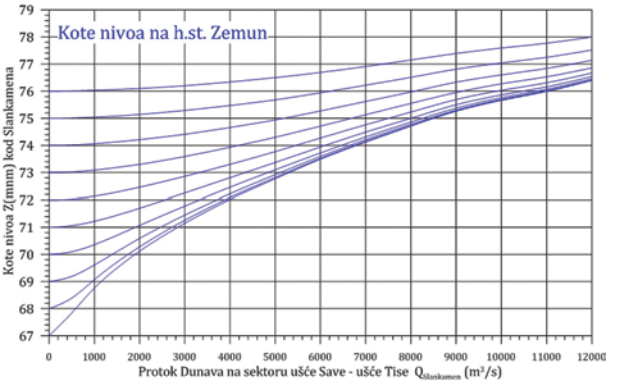


Slika 5.35: Petlja (histerezis) na krivoj protoka (Izvor: IJČ)



Slika 5.36: Promene krive protoka tokom vremena na h.st. Lj.most, Velika Morava (Izvor: IJČ)

Kriva protoka može biti **parametarska**, ukoliko se nizvodno od mernog profila nalazi objekat (ustava ili brana) ili ušće pritoke, koje utiče na formiranje nivoa vode. Primer na slici 5.37 pokazuje kako nivoi Dunava kod Belegiša zavise od nivoa Dunava neposredno uzvodno od ušća Save (kod Zemuna) i protoka.



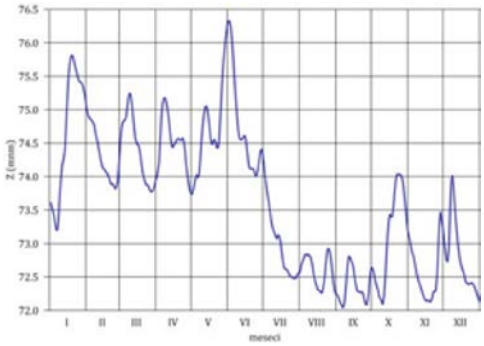
Slika 5.37: Parametarska kriva protoka (Izvor: IJČ)

5.3.5 Analiza i prikaz hidroloških podataka

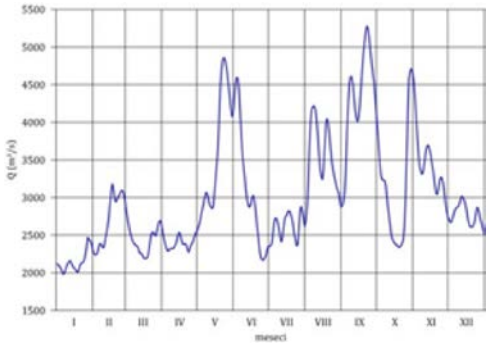
Na osnovu analize hidroloških podataka iz višegodišnjeg perioda osmatranja određuju se merodavni vodostaji i protoci za uređenje vodotoka. Kako nivoi vode i protoci u rekama imaju stohastički karakter, merodavne vrednosti se određuju primenom metoda matematičke statistike.

Osnovna je analiza podataka registrovanih u određenom vremenskom periodu. Mereni podaci se prikazuju u obliku dijagrama promene nivoa vode ili protoka u vremenu. To su **nivogram** (Z=Z(t), slika 5.38) i **hidrogram** (Q=Q(t), slika 5.39). Iz niza merenih podataka se izvode određene karakteristične vrednosti (minimum, maksimum, srednja vrednost i dr.) za mesec, godinu ili duži vremenski period. Najčešće su za projekat uređenja vodotoka bitne srednje i ekstremne veličine, koji se određuju na osnovu dužeg niza osmatranja:

- **srednje vrednosti:** srednja mala voda (srednja vrednost najnižih nivoa /protoka vode), srednja voda (srednji nivo vode/protok) i srednja velika voda (srednja vrednost najviših nivoa vode/protoka) i
- **ekstremne vrednosti:** najmanja mala voda (najniži registrovani nivo vode/ protok) i najveća velika voda (najviši registrovani nivo vode/protok).

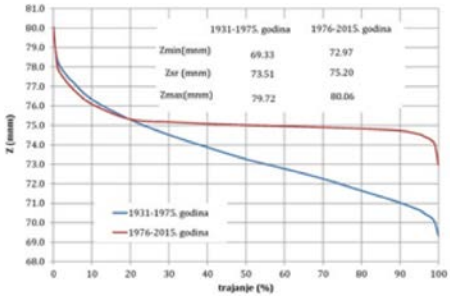


Slika 5.38: Nivogram – reka Dunav, Novi Sad, 2015. (Izvor: IJČ)

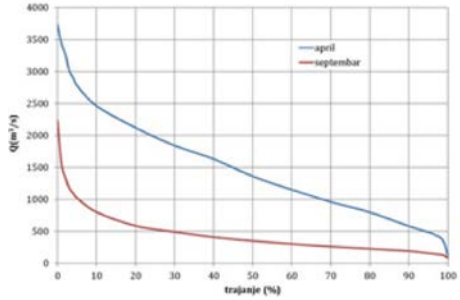


Slika 5.39: Hidrogram – reka Dunav, Bogojevo, 2014. (Izvor: IJČ)

Analizom **trajanja i učestalosti** određuju se vrednosti nivoa vode/protoka određenog trajanja ili učestalosti u određenom vremenskom periodu (u % ili danima). Primeri krivih trajanja nivoa i protoka dati su na slikama 5.40 i 5.41.



Slika 5.40: Krive trajanja nivoa vode na h.st. Novi Bečej na Tisi za prirodni režim i i režim posle izgradnje brane na Tisi (Izvor: IJČ)



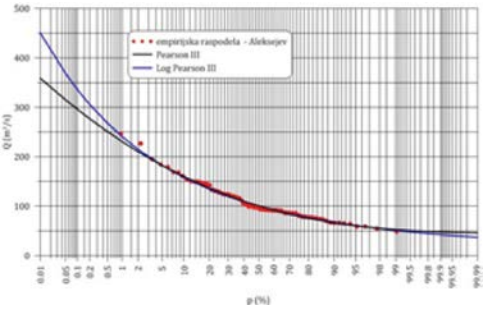
Slika 5.41: Krive trajanja protoka u karakterističnim mesecima godine (Izvor: IJČ)

Korišćenjem podataka o minimalnim, srednjim ili maksimalnim nivoima vode/protocima (u godini, određenom mesecu ili danu) i empirijskih odnosno teorijskih funkcija raspodela verovatnoća (slike 5.42 i 5.43) određuju se vrednosti određene **verovatnoće pojave** ili **povratnog perioda**. Verovatnoća pojave događaja (p) je recipročna vrednost dužine povratnog perioda (T):

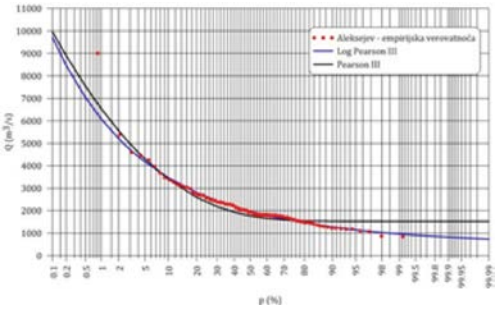
$$p = \frac{1}{T} \tag{5-3}$$

Na primer 100-godišnja velika voda ima verovatnoću pojave 0,01 (1%), 5-godišnja 0,2 (20%), 10-godišnja 0,1 (10%), 1000-godišnja 0,001 (0,1%) itd.

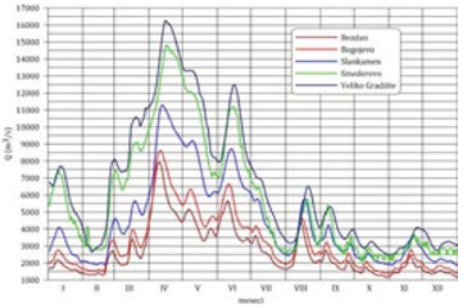
Za proračun neustaljenog tečenja ili proračun punjenja retenzija i akumulacija neophodna hidrološka podloga su **hidrogrami poplavnih talasa**. Oni mogu biti osmotreni (slika 5.44), definisani pomoću statističkih hidroloških metoda (slika 5.45) ili primenom hidroloških ili hidrauličkih modela propagacije poplavnih talasa (slika 5.46).



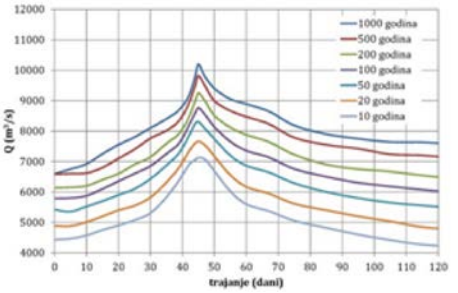
Slika 5.42: Empirijska i teorijske raspodele minimalnih srednjemesečnih protoka reke Drine, h.st. Radalj, 1926-2014. (Izvor: IJČ)



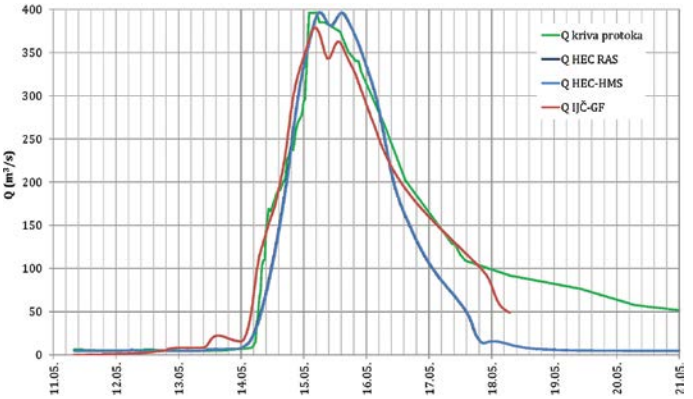
Slika 5.43: Empirijska i teorijske raspodele maksimalnih godišnjih protoka reke Drine, h.st. Radalj, 1926-2014. (Izvor: IJČ)



Slika 5.44: Osmotreni talas velike vode Dunava 2006. (Izvor: IJČ)



Slika 5.45: Računski hidrogrami talasa velikih voda Dunava na h.st. Bogojevo (Izvor: IJČ)



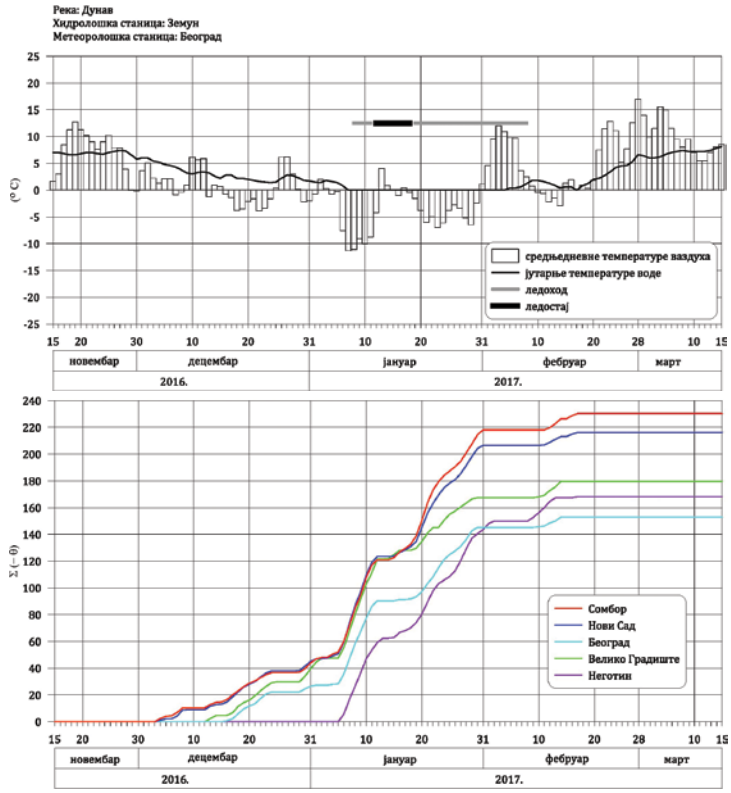
Slika 5.46: Osmotreni i računski hidrogrami talasa velikih voda iz maja 2014. godine na h.st. Valjevo, reka Kolubara (Izvor: IJČ)

5.4 Podaci o režimu leda

Proces hlađenja rečne vode počinje još u jesenjem periodu, ali specifičnu dinamiku dobija sa pojavom negativnih temperatura vazduha. Intenzitet hlađenja rečne vode do 0°C, tj. do promene agregatnog stanja, zavisi od meteoroloških uslova i gradijenta sniženja srednje dnevne temperature vazduha. U slučaju naglog zahlađenja i višednevnog trajanja niskih temperatura vazduha, vremenski interval sniženja temperature vode od 3-5°C (što je najčešća pojava pre početka negativnih srednje dnevnih temperatura vazduha) do 0°C na velikim rekama traje 5-15 dana.

Hidrometeorološka služba tokom zimskog perioda prikuplja podatke potrebne za analizu režima leda. To su meteorološki podaci (srednje dnevne temperature vazduha), kao i podaci o temperaturi vode i pojavama leda u profilu hidrološke stanice.

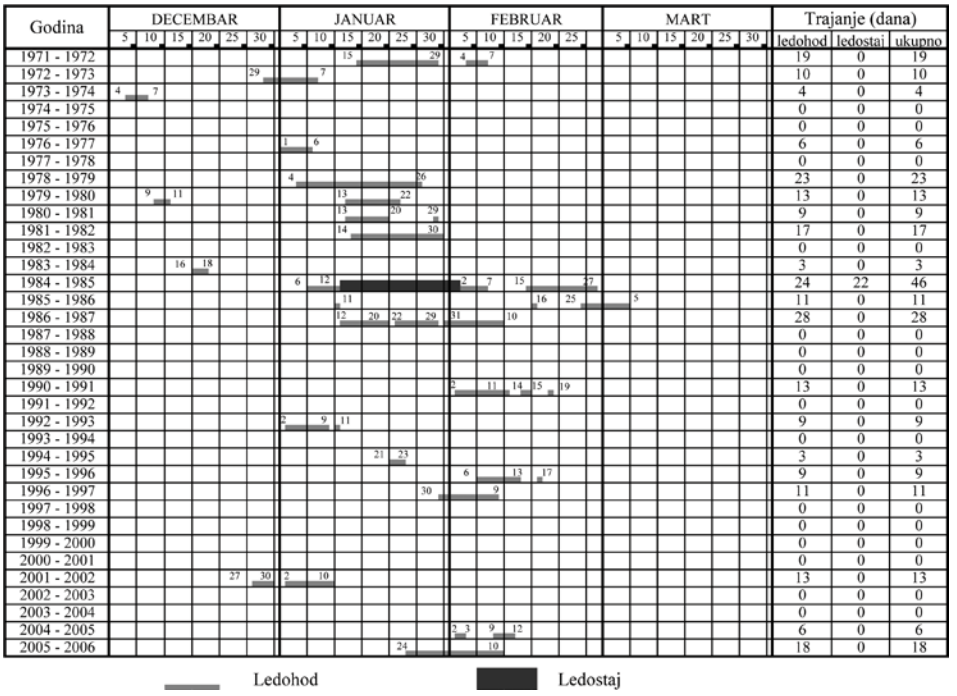
Meteorološki podaci koji utiču na režim leda se interpretiraju u vidu sumarnih krivih negativnih temperatura vazduha u toku jednog zimskog perioda - $\sum(-\theta)$ (slika 5.47). Ovaj način grafičke interpretacije je vrlo ilustrativan, jer pokazuje raspored ukupne "količine hladnoće" u toku zime. Gradijent sumarnih krivih negativnih temperatura vazduha ukazuje na intenzitet hladnog talasa. Ukoliko se u toku zimskog perioda javi više hladnih talasa različitog intenziteta (između kojih se javljaju intervali sa pozitivnim srednje dnevnim temperaturama vazduha), to se na sumarnoj krivoj manifestuje različitim nagibima (pri čemu intervalu pozitivnih temperatura odgovara horizontala).



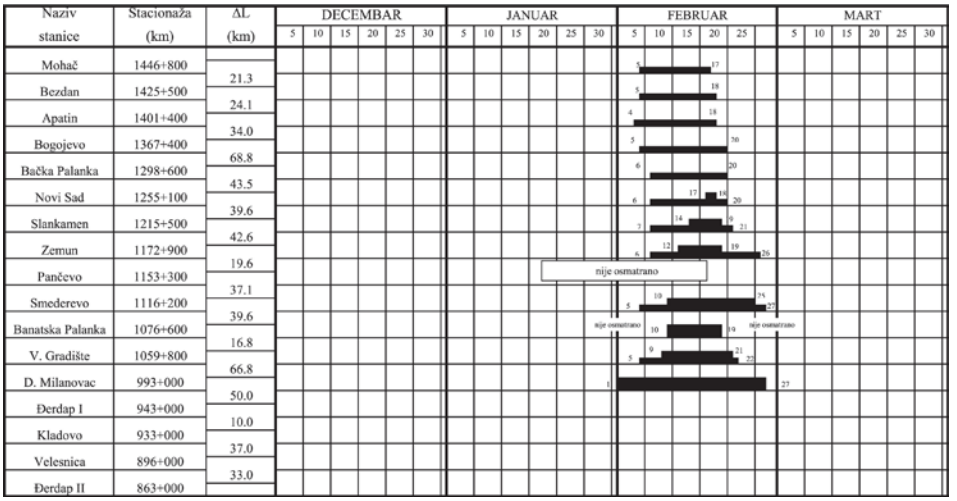
Slika 5.47: Hronološki dijagram srednjih dnevnih temperatura vode i vazduha na h.st Zemun i sumarne krive negativnih srednjih dnevnih temperatura vazduha duž reke Dunav, zima 2017. (Izvor: IJČ)

Pojave leda se svakodnevno osmatraju na hidrološkim stanicama i po potrebi duž toka. Iskazuju se opisno, kao % površine vode koju pokriva led u pokretu (slika 4.30) odnosno kao % površine vode koju pokriva led u mirovanju. Ledostaj je potpuno zaleđena površina vode (slike 4.31).

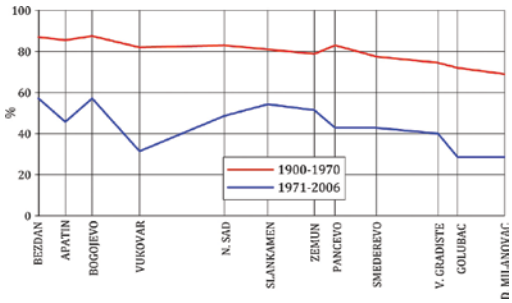
Ove pojave se prikazuju na **hronološkim dijagramima pojava leda**, koji se odnose na jednu hidrološku stanicu u dužem periodu (slika 5.48) ili na ceo vodotok u toku jedne zime (slika 5.49) ili višegodišnjeg perioda. Iz njih se mogu izvesti zaključci o trajanju i učestalosti ledenih pojava i leda duž toka reke (slike 5.50 i 5.51), kao i zaključci o vezi između jačine zime (izražene preko sume negativnih temperature vazduha) i trajanja ledenih pojava (slika 5.52).



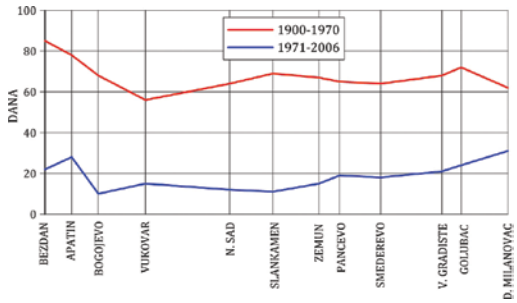
Slika 5.48: Hronološki prikaz ledenih pojava na Dunavu, h.st. Bezdan, 1971-2006. (Izvor: IJČ)



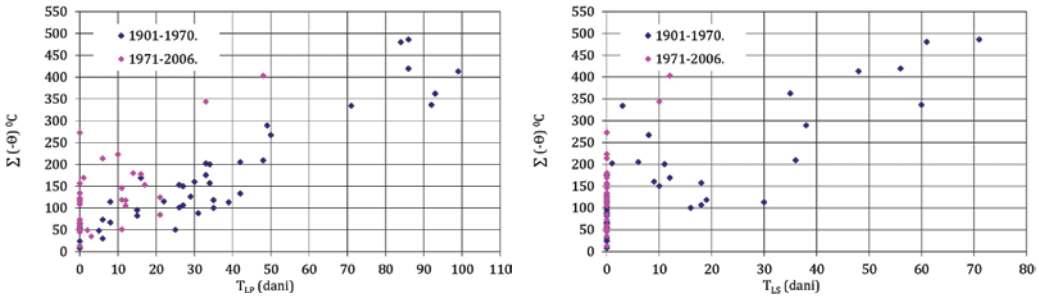
Slika 5.49: Hronološki dijagram pojava leda na Dunavu, 2012. (Izvor: IJČ)



Slika 5.50: Učestalost ledenih pojava na Dunavu (%) (Izvor: IJČ)



Slika 5.51: Maksimalno trajanje ledostaja na Dunavu (Izvor: IJČ)



Slika 5.52: Korelacija trajanja ledenih pojava (TLP) i ledostaja (TLS) i sume negativnih temperatura vazduha (°C) kod Novog Sada (Izvor: IJČ)

5.5 Hidrauličke podloge

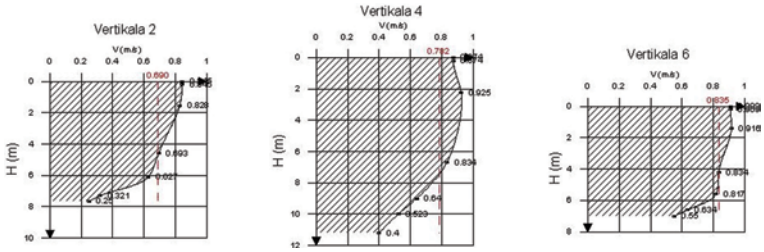
Hidrauličke podloge se obezbeđuju:

(a) **Merenjem u prirodi:** Pomoću hidrometrijskog krila ili ADCP uređaja se meri raspored brzina, u jednom ili više poprečnih profila reke (slika 5.53). Strujna slika na deonici vodotoka dobija se geodetskim snimanjem položaja površinskih i dubinskih plovaka, u kratkim vremenskim intervalima (slika 5.54);

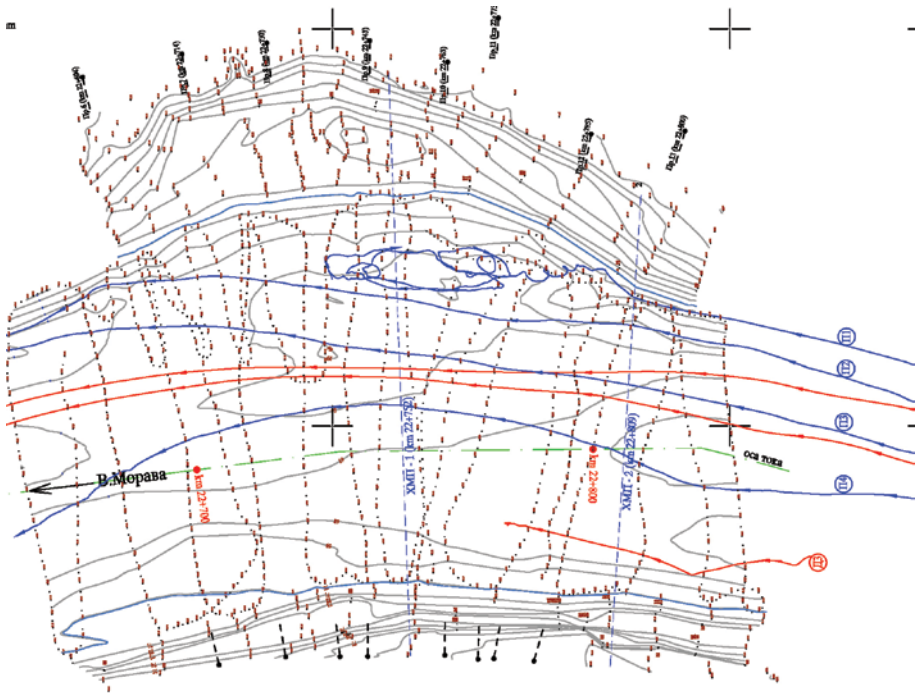
(b) **Hidrauličkim proračunima** čija je svrha definisanje karakteristika prirodnog hidrauličkog režima vodotoka (linije nivoa vode za različite protoke, brzine strujanja, tangencijalni naponi, pronos nanosa...) i utvrđivanje posledica regulacionih radova predviđenih projektom na hidrauličke i morfološke karakteristike vodotoka (računaju se isti parametri toka, za iste hidrološke uslove);

(c) **Merenjem na fizičkom modelu**.

Detaljan opis metoda za obezbeđenje podataka o hidrauličkom režimu vodotoka prikazan je u poglavlju 6.



Slika 5.53: Rezultati merenja brzina vode u karakterističnim vertikalama reke Dunav kod Apatina, 2004. (Izvor: IJČ)



Slika 5.54: Rezultati merenja trajektorija površinskih (plava linija) i dubinskih plovaka (crvena linija) u zoni planiranog vodozahvata za izvorište Ključ kod Požarevca, 2013. (Izvor: IJČ)

5.6 Podaci o režimu nanosa (psamološke podloge)

Psamološke podloge (podaci o nanosu) zavise od postavljenog zadatka. Granulometrijske krive i promena granulometrijskog sastava nanosa duž vodotoka su potrebni za proračun transportnog kapaciteta za vučeni i suspendovani nanos, a podaci o hidrauličkoj krupnoći suspendovanog nanosa za proračun pronosa suspendovanog nanosa i deformacije rečnog korita.

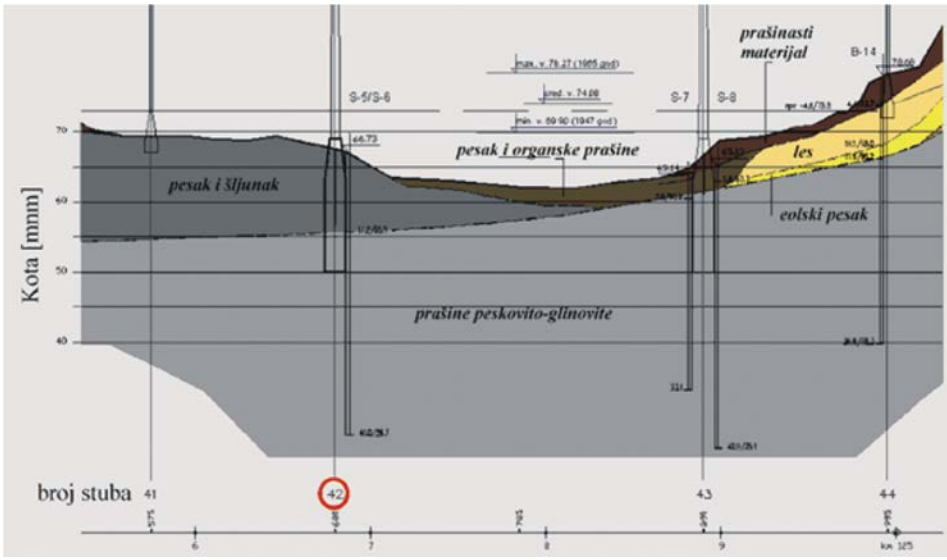
Na osnovu merenja ili proračuna definišu se korelacije između protoka vode i pronosa nanosa, koje se koriste da bi se, u slučaju proračuna deformacije korita, definisali ulaz vučenog nanosa i suspendovanog nanosa na posmatranu deonicu vodotoka.

Prikazi načina merenja nanosa i metoda proračuna transporta nanosa su dati u poglavlju 7.

5.7 Geološko-geomehaničke podloge

Za projekte uređenja vodotoka značajni su podaci o geološkim karakteristikama rečne doline, koji se daju na poprečnim i podužnim geološkim profilima (slika 5.55). Takođe su bitni podaci o geomehaničkim karakteristikama materijala u kome je formirano korito (krive granulometrijskog sastava, kao i poprečni i podužni profili sa geomehaničkim svojstvima tla).

Ova vrsta istraživanja je takođe potrebna da bi se dobili podaci o raspoloživim količinama (rezervama) i kvalitetu građevinskog materijala za izvođenje hidrotehničkih objekata (kamen, pesak, šljunak, glina itd).



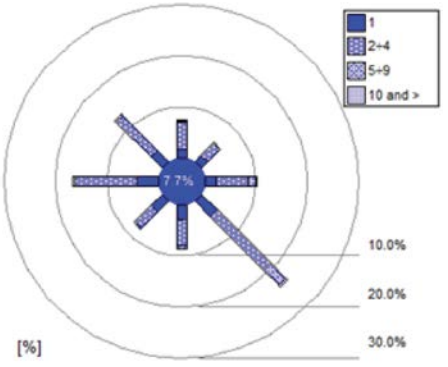
Slika 5.55: Geološki profil korita Dunava u profilu mosta kod Beške (Izvor: arhiva IJČ)

5.8 METEOROLOŠKE PODLOGE

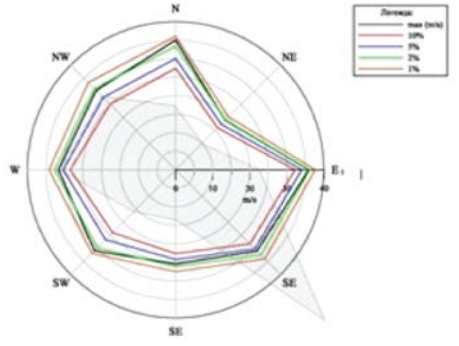
Od značaja za projekat uređenja vodotoka mogu biti podaci o temperaturama vazduha i padavinama, jer od njih zavisi dinamika izvođenja radova. Najčešće se, međutim, analizira režim vetrova jer je ovaj parametar klime od izuzetnog značaja za planiranje korišćenja određenog prostora.

Brzina vetra se koristi za proračun visine talasa od vetra, koji na većim rekama i akumulacijama mogu biti vrlo veliki (na pr. visina talasa od vetra na Dunavu kod Zemuna može u uslovima ekstremno jakog vetra dostići 1,1 m). Zbog toga je obavezno da se visina talasa od vetra uzme u obzir pri određivanju kote krune objekata za zaštitu od velikih voda.

Za definisanje režima vetra na lokaciji projekta koriste se podaci sa najbliže meteorološke stanice i na osnovu njih se određuju relativne učestalosti i srednje brzine vetra (prema Beaufort-ovoj skali) po mesecima i za godinu, za 8 ili 16 smerova (slika 5.56). Primenom empirijskih funkcija verovatnoće na niz osmotrenih maksimalnih vrednosti dobijaju se teorijske vrednosti maksimalnih brzina vetra različitih verovatnoća pojave (slika 5.57).



Slika 5.56: Ruža srednjih brzina i učestalosti vetrova na met. st. Beograd (Izvor: IJČ)



Slika 5.57: Ruža maksimalnih brzina vetra na met. st. Beograd (Izvor: IJČ)

5.9 Biološke podloge

Poznavanje karakteristika vegetacije i stepena obraslosti osnovnog korita i inundacija je značajno za projekat uređenja vodotoka. Ovi podaci se koriste za:

- procenu otpora u hidrauličkim proračunima,
- studiju o proceni uticaja regulacionih radova na životnu sredinu (zajedno sa podacima o svim podvodnim i priobalnim biljnim i životinjskim vrstama),
- određivanje vrste, količine i mesta gde se može naći biološki materijal za izvođenje regulacionih radova.

5.10 Ekonomske podloge

Ekonomske podloge za projekat uređenja vodotoka su: (a) cene materijala i njegovog transporta; (b) cene rada (projektovanje, izvođenje, nadzor); (c) kreditni uslovi (rokovi otplate, kamatne stope).

U okviru studije opravdanosti regulacionih zahvata, posebno izgradnje sistema za zaštitu od poplava, koriste se podaci o registrovanim i potencijalnim direktnim i indirektnim štetama. Proračun potencijalnih šteta se zasniva na podacima o načinu korišćenja priobalnih površina, ceni stambenih i infrastrukturnih objekata i dr.

5.11 Ostale podloge

U ovu grupu se svrstavaju:

- **ekološke podloge** (podaci o kvalitetu vode, ugroženim biljnim i životinjskim vrstama i dr.);
- **sociološke podloge** (kvalitet života, mogućnost turizma i rekreacije, potencijalni sukobi interesa, uticaj na zdravlje, zaposlenost i migracije stanovništva,...);
- **kulturološke podloge** (zaštita arheoloških lokaliteta, spomenika kulture, sakralnih objekata, ...) i
- **istorijske podloge** (stari situacioni planovi sa prikazom promena trase vodotoka i preduzimanih mera uređenja). Primeri su dati na slikama 5.58 i 5.59.

Slika 5.58: Poplavna područja duž Dunava, XIX vek (Izvor: Arhiv Vojvodine)

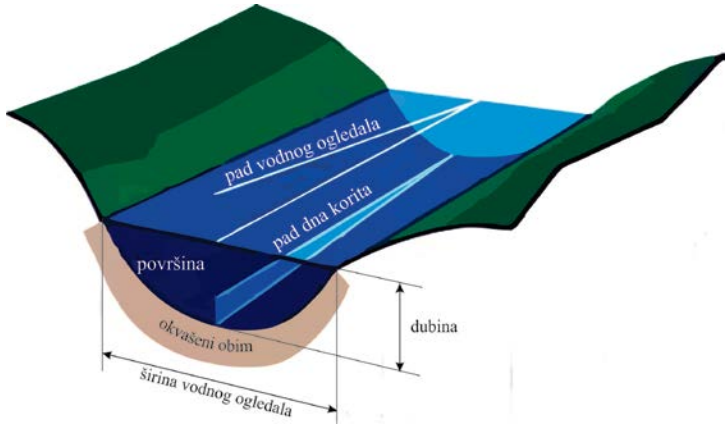
Slika 5.59: Projekat regulacije reke Tise kod ušća u Dunav, 1846 (Izvor: Arhiv Vojvodine)

6 REČNA HIDRAULIKA

U prirodnom rečnom toku tečenje je najsloženije moguće jer je:

- Prostorno (trodimenzionalno), pod uticajem sekundarnih strujanja koja nastaju u rečnim krivinama, usled neprizmatičnosti korita i različitih prepreka u rečnom dnu i na obalama;
- Neustaljeno (promenljivo u vremenu), što je posledica promenljivosti hidrološkog režima vodotoka;
- Nejednoliko, što je posledica postojanja različitih prepreka tečenju koje menjaju pad, dubine i brzine vode;
- Odvija se u neprizmatičnom koritu čiji se oblik, dubine i širine menjaju tokom vremena;
- Sa čestim promenama režima tečenja (mirno u burno i obrnuto);
- Izrazito turbulentno;
- Hidraulička rapavost okvašene konture rečnog korita je prostorno i vremenski promenljiva;
- Rečnim koritom se kreće dvofazni fluid (mešavina vode i nanosa).

Parametri rečnog korita: hidraulički radijus (R), površina proticajnog profila (A) i okvašeni obim (O) definišu **„hidrauličku" geometriju rečnog toka** (slika 6.1). Kod širokih pravougaonih korita (širina korita je najmanje 5 puta veća od dubine) hidraulički radijus (R=A/O) približno je jednak srednjoj dubini poprečnog profila.



Slika 6.1: „Hidraulička" geometrija rečnog korita (Izvor: tes.com)

Za potrebe rešavanja inženjerskih zadataka se problematika prirodnih vodotoka može pojednostaviti, uvođenjem određenih pretpostavki i uprošćenja. Međutim, da bi hidraulička analiza rečnog toka bila uspešna, moraju se razumeti procesi koji se odvijaju u rečnom sistemu. Osnovno je poznavanje karakteristika tečenja i morfologije rečnog korita.

Prvi korak u hidrauličkoj analizi određenog vodotoka je klasifikacija njegovog stanja, tipa i karakteristika tečenja. Posle ovog koraka, inženjer može da identifikuje podatke, granične uslove i odgovarajući metod za simulaciju tečenja.

Inženjer koji radi hidrauličku analizu ima veliki broj opcija od kojih mora da izabere jednu (ili kombinaciju nekoliko opcija) da bi dobio upotrebljive rezultate, a uz razuman trošak.

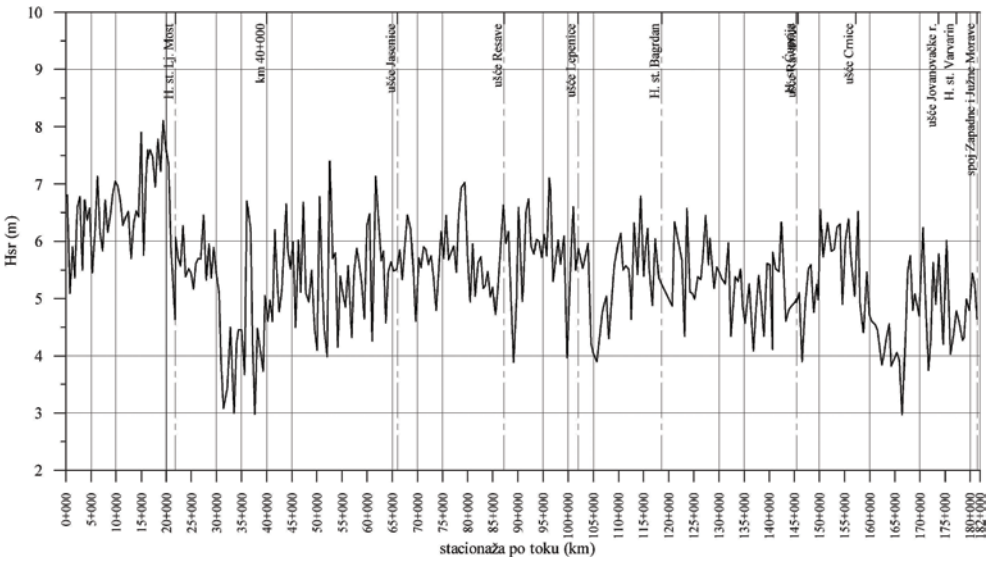
Još uvek ne postoje kriterijumi koji se mogu rutinski primeniti da bi se izabrala prava metoda hidrauličke analize. Zato su u nastavku date osnovne smernice za hidrauličko modeliranje tečenja u prirodnim vodotocima, koje se radi da bi se predvidelo ponašanje vodotoka u širokom dijapazonu hidroloških uslova.

6.1 Hidrauličke karakteristike prirodnih tokova

6.1.1 Prostorna dimenzija

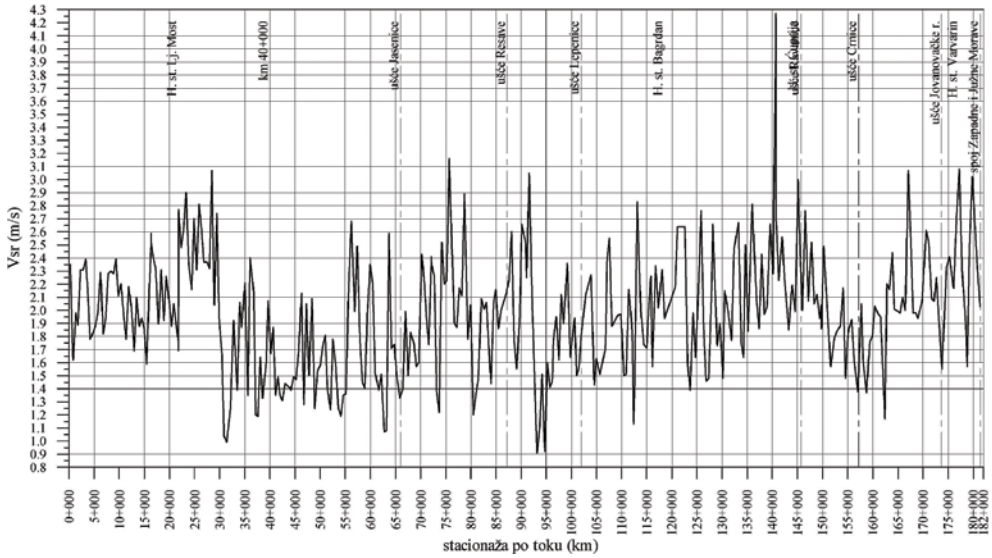
Iako je suštinski **prostorno** (3D), tečenje u rekama se može u većini slučajeva posmatrati kao linijski (jednodimenzionalni) problem jer je dužina toka daleko veća od širine. To znači da se prostor svodi na osovinu rečnog toka, a promena relevantnih veličina u pravcu upravnom na osovinu toka (odnosno u poprečnom profilu reke) zanemaruje.

Linijskim (1D) hidrauličkim proračunom dobijaju se nivo vode, srednja dubina, površina i drugi morfološki parametri toka, srednja profilska brzina i drugi hidraulički parametri, i to u svakom poprečnom profilu reke. Primeri rezultata proračuna su dati na slikama 6.2 i 6.3.



Slika 6.2: Varijacija srednje dubine toka Velike Morave pri protoku koji puni osnovno korito (Izvor: IJČ)

Koncept složenog korita se uobičajeno koristi da bi se u 1D analizi uzelo u obzir usporavanje toka na inundacijama, koje zbog vegetacije imaju veći otpor tečenju od osnovnog korita. Osim usvojene pretpostavke da je nivo vode i pad nivoa isti u svim delovima složenog poprečnog profila (slika 6.14), uvodi se i pretpostavka da se ukupan protok raspoređuje na osnovno korito i inundacije proporcionalno njihovoj protočnosti. Proračun se radi za tri susedna linijska toka koji imaju različite dužine, po osnovnom koritu, na levoj i desnoj inundaciji.

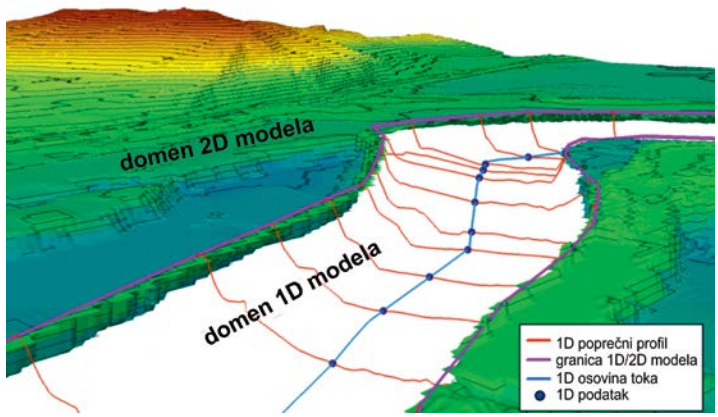


Slika 6.3: Varijacija brzine toka Velike Morave pri stogodišnjoj velikoj vodi (Izvor: IJČ)

Linijskim proračunom se samo aproksimativno mogu opisati uslovi tečenja pri velikim vodama, naročito u fazama porasta (kada nivo vode raste brzo, voda se izliva u inundacije, a njihovo punjenje dugo traje) i opadanja poplavnog talasa (kada se odvija suprotan proces – nivo vode na inundacijama je viši nego u osnovnom koritu i one se postepeno prazne). U fazi punjenja i u fazi pražnjenja inundacija nivo vode nije isti u svim delovima poprečnog profila, tako da se javljaju znatna odstupanja merenih i računskih nivoa vode.

Praktičan predlog je da se može usvojiti linijski (1D) model hidrauličkog proračuna ako je dužina predmetne deonice toka 20 i više puta veća od širine, a poprečne promene brzina toka i nivoa vode nisu od značaja. Primena 1D modela je, takođe, potpuno opravdana ako se radi hidraulički proračun vodotoka sa uskom rečnom dolinom.

Međutim, u određenim slučajevima postoji potreba da se istraži promena neke veličine u više pravaca, jer bi se korišćenjem rezultata 1D proračuna napravila velika greška. Na slici 6.4 prikazan je slučaj složenog korita, gde treba kombinovati 1D model (za osnovno korito) i 2D model hidrauličkog proračuna (za inundacije).



Slika 6.4: Primer složenog korita koje bi trebalo analizirati 1D i 2D modelima

Ravanski (2D) modeli se danas sve češće koriste za proračune tečenja vode u koritu sa širokim inundacijama u uslovima velikih voda, proračune širenja polutanata u rečnom koritu i analize složenih uslova tečenja u zonama ušća pritoka, vodozahvata, mostova itd.

U nekim slučajevima se umesto 2D modela koriste **"hibridni" modeli**, koji su zasnovani na 1D modelu rečnog korita, dok se inundacije posmatraju kao rezervoari. Računa se razmena određenih količina vode između glavnog korita i inundacija, kao i između delova inundacija.

Prostorni (3D) modeli, koji bi bili namenjeni analizi hidrauličkih uslova u izrazito prostorno promenljivim sredinama (na pr. prelivanje preko objekata ili strujanje u rečnoj krivini) se razvijaju ali još uvek nisu u standardnoj upotrebi. Zato se za analize prostornih fenomena još uvek koriste **fizički modeli**.

Prilikom primene 2D ili 3D modela je najvažnije voditi računa da granični uslovi (nivoi i/ili protoci) budu što tačniji. Zbog toga se primenjuje grublji, 1D model koji započinje dalje od analizirane zone ili objekta i njime definišu granični uslovi za detaljniji 2D/3D model kojim se rešava postavljeni problem.

6.1.2 Vremenska dimenzija

U inženjerskim zadacima se najčešće uvodi pretpostavka da je u vodotoku tečenje **ustaljeno**, što znači da se protok ne menja u vremenu. Ova aproksimacija je prihvatljiva i ukoliko su promene protoka postepene (postepen porast i opadanje nivoa vode).

Ova aproksimacija se, međutim, ne može prihvatiti ako se analizira transformacija talasa velikih voda tokom putovanja kroz rečnu dolinu, efekti upravljanja objektima (otvaranje/zatvaranje ustave, rad hidroelektrane) ili posledice rušenja brane. U ovim slučajevima mora se voditi računa o neustaljenosti fenomena odnosno uzeti u obzir promena protoka tokom vremena.

Proračun **propagacije talasa velikih voda** se radi u okviru projekta zaštite od poplava. Proračunom se određuju nivogrami i hidrogrami na profilima duž vodotoka, brzina kretanja i dužina trajanja talasa velike vode, kao i efekti primenjenih mera kontrole velikih voda (retenzije, regulacije i dr.).

6.1.3 Uticaji na rečni tok

6.1.3.1 Uticaj gravitacije

Kretanje vode u otvorenom toku zavisi od sila koje se pri strujanju javljaju. Glavne sile koje određuju tečenje su: sile težine i pritiska, koje predstavljaju osnovni faktor strujanja, sile trenja, koje su posledice viskoznosti fluida i fiktivne inercijalne sile, koje se manifestuju promenom brzina u vremenu i prostoru [28].

Odnos inercijalnih i gravitacionih sila je mera stanja otvorenog toka. Izražava se **Frudovim brojem** (Fr):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \tag{6-1}$$

gde je: V – srednja brzina vode (m/s), g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2), h - srednja dubina (m).

Kada su inercijalne sile veće od sila težine i pritiska tečenje u otvorenom toku je **burno** (silovito). U tom slučaju je Fr>1. Karakterišu ga velike brzine vode i talasi. U suprotnom, ako su inercijalne sile manje od sila težine i pritiska, Fr<1, a tečenje je **mirno**. Kada su izjednačene sile težine i pritiska, Fr = 1, a tok je kritičan. U tim uslovima javlja se **kritična dubina**.

Slika 6.5: Burno tečenje pri velikoj vodi Kolubare u Valjevu, 2014. (Izvor: IJČ)

Slika 6.6: Miran režim tečenja odlikuje reku Dunav (Izvor: IJČ)

Na većini manjih i srednjih reka se tokom velikih voda javlja buran režim tečenja, sa brzinama koje izazivaju znatna oštećenja korita i obala (slika 6.5). S druge strane, tečenje na velikim rekama je mirno i pri malim i pri velikim vodama (slika 6.6).

Pre početka proračuna nivoa vode u vodotoku mora se proveriti Frudov broj za dijapazon protoka. Ukoliko je tečenje mirno, nivoe vode određuju karakteristike rečnog korita na nizvodnom kraju rečne deonice. Zbog toga proračun linija nivoa počinje od najnizvodnijeg profila (gde se definiše nizvodni granični uslov) i ide uzvodno. Ako je tečenje burno, proračun počinje od najuzvodnijeg profila rečne deonice (definiše se uzvodni granični uslov) i ide nizvodno.

Ako smer proračuna nije u saglasnosti sa uslovima koji preovlađuju reci, dobiće se pogrešni rezultati proračuna nivoa vode. S druge strane, ako je usvojen odgovarajući smer proračuna, računski nivoi će konvergirati ka tačnim vrednostima čak iako je početno usvojen nivo vode (granični uslov) bio pogrešan.

6.1.3.2 Turbulencija

Tečenje u rekama je uvek turbulentno, što znači da je vrednost **Rejnoldsovog broja**:

$$\mathrm{Re} = \frac{VR}{\nu} > 2000 \qquad (6\text{-}2)$$

gde je: Re - Rejnoldsov broj (-), V - brzina vode (m/s), R=A/O - hidraulički radijus (m), A - površina proticajnog profila (m^2), O - okvašeni obim (m), ν - kinematički koeficijent viskoznosti vode (m^2/sec).

Turbulencija može imati bitan uticaj na stabilnost rečnih građevina ili kretanje nanosa. Kada se fluktuaciona komponenta brzine (u') doda na lokalnu, vremenski osrednjenu brzinu (u) ona se može bitno povećati. Stepen turbulencije toka se može kvantifikovati na različite načine, ali najčešće preko intenziteta turbulencije (r), gde je:

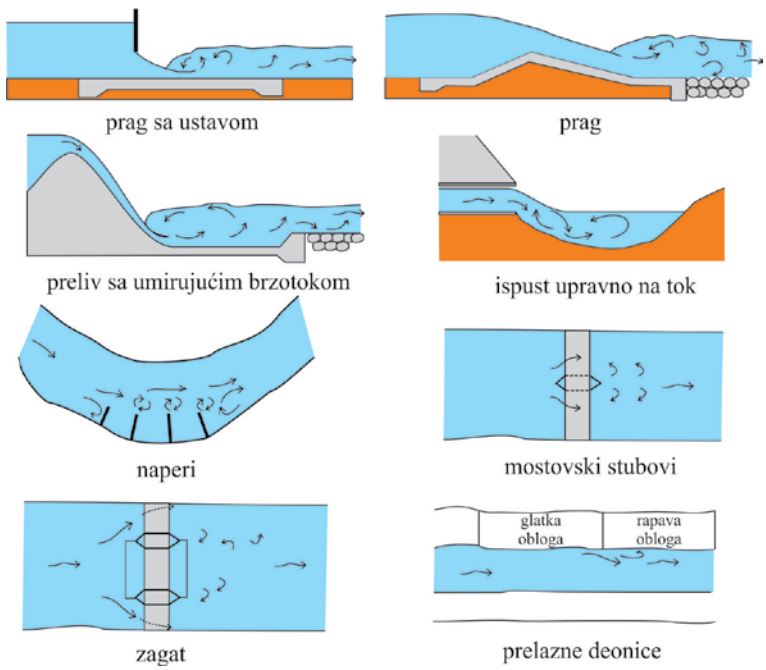
$$r = \frac{\sqrt{(u')^2}}{u} \qquad (6\text{-}3)$$

Normalnom intenzitetu turbulencije, pri jednolikom tečenju u laboratorijskim kanalima ili u rekama sa mirnim tečenjem i ravnim dnom ili riplama, odgovara r≅0,1 (10%). Intenzitet turbulencije iznad rapavog dna ili obloge od lomljenog kamena je veći, sa r≅0,15 (15%).

Turbulencija može biti veća od normalnih 10-15% u zonama gde postoji interakcija između rečnog toka i građevina u koritu (na pr. stubovi mosta, prelivi, rapavi brzotoci) ili postoje nagle promene u samom koritu (proširenje, promena pada ili rapavosti).

Pored toga što ima uticaj na nivo vode i kretanje nanosa, turbulencija jačeg intenziteta menja i sile kojima rečni tok utiče na dno i obale. Iako je često zanemarena, turbulencija je važan parametar kada se ispituje uticaj toka na rečne građevine izgrađene od kamena.

Izrazito turbulentan tok se može javiti u brojnim slučajevima, koji su ilustrovani na slici 6.7. Kako lokalna turbulencija strogo zavisi od specifičnih dimenzija, geometrije i rapavosti strukture koja je generiše, ne postoje generalne preporuke za njenu procenu.

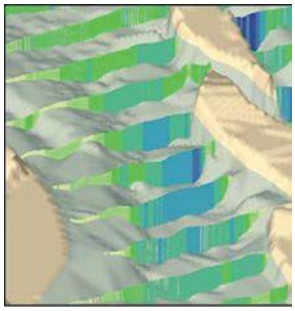


Slika 6.7: Primeri uslova u kojima se javlja jaka turbulencija [76]

6.1.3.3 Efekat kontura toka

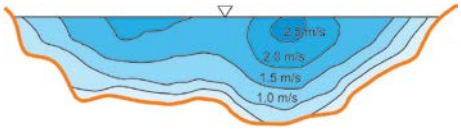
Tečenje u otvorenim tokovima je znatno komplikovanije nego u cevima jer se površina vode menja u vremenu i prostoru. Takođe, tečenje sa slobodnom površinom u veštačkim vodotocima (kanali) i prirodnim rečnim tokovima se bitno razlikuje, jer se ovi vodotoci razlikuju po geometrijskim karakteristikama i otporima koje pružaju tečenju. Kanali u većini slučajeva imaju prizmatičan profil i ujednačen podužni pad, sa obloženim ili travnatim, ali dobro održavanim kosinama, kako bi otpori tečenju bili što manji (slika 6.8). S druge strane, oblici i dimenzije poprečnih profila, kao i rapavost dna i kosina prirodnih vodotoka znatno variraju (slika 6.9).

Slika 6.8: Prizmatično korito kanala DTD (Izvor: Vode Vojvodine)



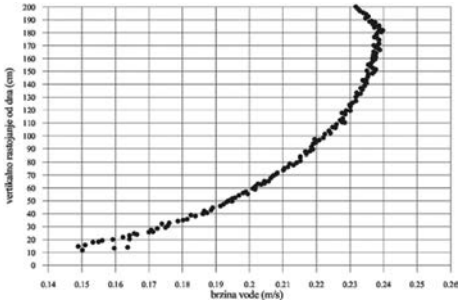
Slika 6.9: Neprizmatično korito prirodnog vodotoka (Izvor: IJČ)

Usled efekta konture, **raspored brzina toka** i u veštačkom i u prirodnom vodotoku je promenljiv, kako po širini poprečnog profila, tako i po dubini. Gledano u poprečnom preseku, najveće brzine su u sredini toka, a najmanje uz obale. U prirodnom toku (slika 6.10) je ova promenljivost bitno izraženija nego u kanalima.



Slika 6.10: Raspored brzina toka u poprečnom preseku reke [26]

I **vertikalni raspored brzina** u vodotoku nije ujednačen jer je brzina pri dnu znatno manja nego na površini (slika 6.11). Naime, u blizini čvrste granice (dna) trenje usporava kretanje vode.



Slika 6.11: Raspored brzina toka u vertikali (Izvor: researchgate.net)

Oblast usporenog kretanja vode naziva se **granični sloj**, a odlikama tečenja u ovoj zoni posvećena je kompleksna **teorija graničnog sloja** [26].

Između rečnog toka i pokretne konture rečnog dna javlja se **tangencijalni napon** (τ), čiji se raspored po dubini toka opisuje sledećom linearnom jednačinom [26]:

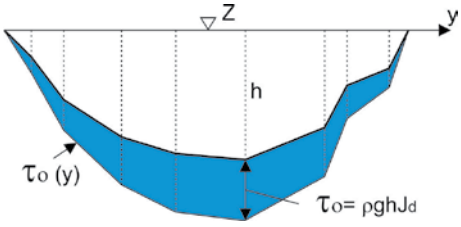
$$\tau(Z)=\rho\cdot g\cdot(h-z)\cdot J_d \qquad (6\text{-}4)$$

gde je: τ - tangencijalni napon (kN/m^2), J_d – pad dna (-), h – dubina vode (m), z – vertikalno rastojanje od dna (m), ρ - gustina vode (t/m^3).

Najveća vrednost tangencijalnog napona je na dnu vodotoka [26]:

$$\tau_0 = \rho\cdot g\cdot h\cdot J_d \qquad (6\text{-}5)$$

dok je na površini vode tangencijalni napon jednak nuli (slika 6.8).



Slika 6.12: Raspored tangencijalnih napona u poprečnom profilu vodotoka [26]

Umesto tangencijalnog napona često se koristi **smičuća brzina** odnosno **brzina trenja** (V_*), koja se određuje iz:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \qquad (6\text{-}6)$$

Raspored brzina u vertikali se može opisati sledećom logaritamskom funkcijom:

$$V(z)=\frac{V_*}{\kappa}\cdot\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{6-7}$$

gde je: z – vertikalni koordinatni pravac (m), z_0 – referentno rastojanje od dna (m), na kome je brzina jednaka nuli, V – brzina vode (m/s), $\kappa = 0{,}4$ (fon Karman-ova konstanta), V_* - brzina trenja ili smičuća brzina (m/s). Po nekim autorima $z_0 \approx 0{,}75\ d$, gde je d srednji prečnik zrna nanosa u dnu (m).

6.2 Hidrauličko modeliranje prirodnih tokova

Hidraulička analiza je neizostavni deo svakog projekta uređenja vodotoka. Njome se:

- Određuju hidrauličke karakteristike prirodnog režima odnosno parametri pod čijim uticajem se formira tok vode, kreće rečni nanos i oblikuje samo rečno korito;
- Proveravaju hidrauličke posledice projektovanih regulacionih zahvata. Najčešće se analizira više varijanti, tako da se može izabrati ona koja obezbeđuje najpovoljnije uslove tečenja, pronosa nanosa i leda, bez nepovoljnih uticaja na stabilnost rečnog korita (naravno, ukoliko su u toj varijanti povoljni i ostali ekonomsko-tehnički pokazatelji).

Generalno se u vodotocima može javiti više tipova tečenja, a za svaki se mora primeniti odgovarajuća metoda hidrauličkog proračuna:

- **Ustaljeno tečenje** se javlja ako se tokom vremena brzina toka na određenoj lokaciji ne menja ni po veličini ni po pravcu;
- **Neustaljeno tečenje** podrazumeva promenljivost brzina tokom vremena. Zbog toga se analizi neustaljenog tečenja vreme eksplicitno pojavljuje kao promenljiva, dok se u analizi ustaljenog tečenja u potpunosti zanemaruje;
- **Jednoliko tečenje** podrazumeva da se dubine, proticajni profili, brzine i protok ne menjaju duž toka, kao i da su padovi energije, nivoa vode i dna isti. Dubina koja se javlja u jednolikom tečenju se naziva **normalna dubina**. Normalna dubina odnosno jednoliko tečenje se mogu uspostaviti samo na dugoj deonici prizmatičnog kanala ujednačene rapavosti, ukoliko se ne menjaju granični uslovi;
- **Nejednoliko tečenje** postoji u rekama, jer se hidraulički parametri menjaju duž toka. Pritom se razlikuje **sporo promenljivo** nejednoliko tečenje (golim okom se ne zapažaju promene pada površine vode) i **naglo promenljivo** (ako se dubine i/ili brzine toka naglo menjanju, što se često lokalno javlja).

6.2.1 Metode hidrauličke analize

Terenska merenja i njihova interperetacija su nužni za primenu, kalibraciju i verifikaciju i numeričkih i fizičkih modela. Retko se koriste kao posebna metoda hidrauličke analize, jer je pokrivanje detaljnim merenjima svih prostorno-vremenskih promena na vodotoku veoma skup i skoro nemoguć zadatak.

Analitička rešenja se dobijaju korišćenjem matematičkih izraza. U analitičkim modelima se često kompleksni fenomeni opisuju empirijskim koeficijentima. Korišćenje analitičkih izraza nije moguće kada je geometrija toka kompleksna ili ako su potrebni detaljniji rezultati proračuna.

U **numeričkim hidrauličkim modelima** se koriste posebne računske tehnike da bi se rešile matematičke jednačine. Numerički modeli daju znatno detaljnije rezultate od analitičkih, ali je za njihovu primenu potrebno iskustvo i sposobnost da se dobro formuliše problem i dobiju podaci koji opisuju značajne fizičke procese.

Fizički modeli se koriste samo za analizu kompleksnih problema. Na modelu se mogu meriti prostorne promene toka, ispitivati uslovi erozije oko objekata i drugi problemi koji imaju više dimenzija. Cena ispitivanja na modelu je visoka, a potrebno je dosta vremena da se model konstruiše ili promeni da bi se na njemu prikazale promene koje se predviđaju u projektu regulacije. Problemi nastaju u kalibraciji modela, izboru razmere i zahtevima za obezbeđenje sličnosti modela i prirode. Često se ne može postići sličnost za više fenomena, tako da se bira razmera koja obezbeđuje sličnost samo za najznačajniji proces. Fizički modeli se grade samo u specijalizovanim laboratorijama, a koriste ih posebno obučeni i iskusni inženjeri.

Hibridni modeli odnosno kombinacije numeričkih i fizičkih modela se koriste da bi se ispitali uticaji brojnih fenomena koji bi inače bili zanemareni ili analizirani na uprošćeni način.

Izbor odgovarajućeg metoda hidrauličke analize zavisi od više faktora: (a) ukupnog cilja projekta; (b) posebnih ciljeva projekta, od kojih zavisi nivo detaljnosti; (c) klase, tipa i režima toka; (d) dostupnosti potrebnih podataka i (e) raspoloživih stručnih i finansijskih resursa i vremena.

Tečenje u rekama se može posmatrati na raznim nivoima detaljnosti, za potrebe različitih vrsta analiza. Ako se hidraulički proračun radi na nivou sliva dovoljno je analizu svesti na jednoliko ili nejednoliko blago promenljivo tečenje, osim na mestima diskontinuiteta u podužnom profilu. Na nivou rečne deonice analizira se uvek nejednoliko tečenje, zbog postojanja brzaka, tišaka, meandera i drugih vrsta prepreka. Na lokalnom nivou se ispituju uslovi nejednolikog, naglo promenljivog tečenja kao što je hidraulički skok. U nekim projektima je potrebno analizirati tok na mikronivou, što uključuje analizu strukture toka po dubini (viskozni i turbulentni sloj), kao i definisanje rasporeda brzine, tangencijalnih napona i drugih parametara.

6.2.2 Podaci za hidrauličko modeliranje

Za hidrauličku analizu u projektu uređenja vodotoka generalno su potrebne tri glavne kategorije podataka: (1) hidrološki podaci, (2) podaci o geometriji korita i (3) podaci o nanosu. Ipak, nisu uvek potrebne sve navedene kategorije ili svi podaci unutar neke kategorije.

Hidrološki podaci. U okviru projekta uređenja vodotoka se objekti obično projektuju tako da budu funkcionalni u uslovima određenog protoka (merodavni protok). Međutim, svaki objekat mora da bude bezbedan u širokom dijapazonu mogućih hidroloških uslova. Projekti zaštite od poplava se vezuju za veliku vodu određene verovatnoće pojave (merodavni protok velike vode), dok se regulacija osnovnog korita obično dimenzioniše na protok određenog trajanja. Podaci o protoku dobijaju se analizom podataka merenja na hidrološkoj stanici ili simulacijom pomoću hidroloških modela. Koriste se i podaci o istorijskim događajima, najčešće poplavama, koji su zabeleženi na terenu.

Podaci o geometriji korita uključuju podatke o topografiji osnovnog korita i inundacija, trasu vodotoka, podatke o mostovima i propustima, rapavosti korita, kao i o promenama trase i poprečnih profila tokom vremena. Ovi podaci se obezbeđuju terenskim snimanjima i prikupljanjem raspoloživih podataka, ako je predmetna reka već ranije istraživana.

Veliki značaj ima adekvatan raspored poprečnih profila na analiziranoj deonici vodotoka. Oni moraju biti tako postavljeni da reprezentuju osnovno korito i inundacije u hidrauličkom modelu. Ako su poprečni profili postavljeni na prevelikim rastojanjima mogu se javiti značajne greške u proračunu. S druge strane, model zasnovan na velikom broju poprečnih profila (postavljenih na malim rastojanjima) neće dati bolje rezultate ako profili nisu postavljeni tako da adekvatno reprezentuju propusnu sposobnost deonice.

Podaci o nanosu se koriste da bi se ispitalo da li će projekat stvoriti probleme sa aspekta režima nanosa. Ako problem već postoji ili se može očekivati po izvođenju projekta, potrebno je prikupiti uzorke materijala iz dna i obala reke, uraditi granulometrijsku analizu uzoraka, proračune transporta nanosa i zaključiti da li postoje tendencije erozije ili istaložavanja.

6.2.3 Kalibracija i verifikacija hidrauličkog modela

Tačnost rezultata hidrauličkog modeliranja bitno zavisi od sposobnosti i iskustva inženjera koji radi analizu, izbora modela koji je odgovarajući za situaciju koja je predmet analize, kao i od podataka koji se koriste za pripremu modela rečne deonice.

Kako bi se ove neizvesnosti svele na minimum, primenjuje se **kalibracija modela** odnosno proces kojim se dokazuje da izlazni rezultati modela odgovaraju osmotrenim podacima.

Proces kalibracije se vrši tako što se menjaju jedan (najčešće Maningov koeficijent rapavosti) ili više parametara modela dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje sa merenim podacima. Najčešće se upoređuju računske vrednosti sa izmerenim nivoima vode ili brzinama toka.

Verifikacija modela je poželjan korak, koji se zasniva na posebnom setu podataka. Hidraulički model (sa parametrima utvrđenim u procesu kalibracije) se koristi za proračun u novim uslovima. Ukoliko se potvrdi dobro slaganje rezultata proračuna i merenja u prirodi, smatra se da je model spreman za dalje korišćenje.

Ukoliko zbog nedostatka podataka nije moguća verifikacija modela, potrebno je uraditi **analizu osetljivosti modela** na parametre (Maningov koeficijent rapavosti, koeficijenti proširenja i suženja).

Tek kada se u procesima kalibracije i verifikacije za više poznatih uslova postigne dobro slaganje modela i prirode, hidraulički model može da se primeni na nepoznate uslove (kao što je proračun nivoa 100-godišnje velike vode) sa poverenjem da će izlaz iz modela dobro reprezentovati fizičke procese u tim uslovima.

6.2.4 Preporuke

Obavezni koraci u hidrauličkom modeliranju su sledeći:

(1) Priprema hidrauličkog modela analizirane rečne deonice;
(2) Početna simulacija u kojoj se uočavaju i ispravljaju grube greške u ulaznim podacima;
(3) Definisanje graničnog uslova;
(4) Kalibracija parametara modela za različite protoke;
(5) Verifikacija parametara modela ili analiza osetljivosti modela.

Tačnost hidrauličkog modela zavisi od tačnosti ulaznih podataka. Stoga je poželjno da se uradi analiza osetljivosti modela na ulazne podatke, kako bi se uočili mogući precenjeni ili potcenjeni rezultati.

Gubici energije se moraju uzeti u obzir u hidrauličkom proračunu. Nastaju usled rapavosti osnovnog korita i inundacija, proširenja i suženja korita i objekata u koritu (najčešće mostova).

Proračuni tečenja u kanalima, koji imaju prizmatično korito, obično se rade uz pretpostavku da je u kanalima tečenje jednoliko. U rekama, koje skoro uvek imaju neprizmatično korito, proračun nivoa vode treba raditi za uslove nejednolikog tečenja.

U tabeli 6.1 date su generalne preporuke za izbor metode hidrauličke analize koja će se koristiti u projektu uređenja vodotoka.

Tabela 6.1: Preporučene metode hidrauličke analize

Projektuje se	Karakteristike projekta	Hidraulički proračun	Proračun nanosa	Dimenzionalnost
Nasip		najčešće UNT		1D
Brana		NET		1D
Uređenje korita vodotoka u cilju zaštite od poplava	kratka deonica	UNT	kvalitativna analiza pokretnog dna da bi se ispitala veličina uticaja	1D
	duga deonica	UNT	kvantitativna analiza nanosa	1D
Rasteretni kanal		UNT ili NET fizički model		1D
Ušće	ušće u manji vodotok	najčešće UNT		1D
	ušća u velike vodotoke ili more	NET		1D ili 2D
Analiza izlivanja vode iz osnovnog korita	uska rečna dolina	često UNT		1D
	široka rečna dolina	NET		2D
Uređenje korita vodotoka	rečne građevine (naperi, prave par. građevine)	UNT fizički model	kvantitativna analiza pokretnog dna	1D ili 2D
	prosek	UNT ili NET fizički model	analiza pokretnog dna	1D ili 2D
	obaloutvrda	UNT		1D
Plovni put	duži potezi	UNT		1D
	lokaliteti brana i ustava	UNT fizički model		2D

Oznake: UNT – ustaljeno nejednoliko tečenje NET – neustaljeno tečenje

6.3 LINIJSKI MODELI

6.3.1 Osnovne jednačine

Osnovne jednačine za **linijsko, neustaljeno tečenje** u otvorenim tokovima (Sen-Venanove jednačine) su:

- **jednačina kontinuiteta** (jednačina održanja mase)

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}-q=0 \tag{6-8}$$

- **dinamička jednačina** (jednačina održanja količine kretanja) za pravac toka (x pravac).

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)+g\cdot A\cdot\frac{\partial Z}{\partial x}+g\cdot A\cdot I_e=0 \tag{6-9}$$

gde je: Q – protok (m^3/s), A – površina proticajnog profila (m^2), q – jednični bočni dotok (m^3/s), g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2), I_e – pad linije energije (-).

Jednačine Sen-Venana (Saint-Venant) su parcijalne diferencijalne jednačine hiperboličkog tipa, koje se u opštem slučaju ne mogu rešiti. Uvođenje određenih aproksimacija omogućava da se ove jednačine iskoriste za proračun nivoa vode u rekama, u neustaljenim uslovima.

6.3.2 Ustaljeno jednoliko tečenje

Tečenje je ustaljeno i jednoliko ako se protok ne menja tokom vremena, a korito vodotoka je prizmatično, sa jednakom rapavošću okvašene površine i jednakim dubinama, konstantnim padom i bez otpora. Ovakvi uslovi se mogu naći samo u kanalima, koji imaju prizmatično korito i ujednačen pad.

Iako jednoliko strujanje u prirodnim vodotocima ne postoji u pravom smislu, jer se često menjaju preseci, rasporedi brzina i padovi, u praksi se za proračune može usvojiti pretpostavka o jednolikom strujanju. Tada se za proračune koristi **Šezijeva jednačina** (Chezy)[28]:

$$Q=A\cdot C\cdot\sqrt{R\cdot J} \tag{6-10}$$

gde je: Q – protok vode (m^3/s), A – površina proticajnog profila (m^2), R – hidraulički radijus (m), J – pad nivoa vode na posmatranoj deonici (jednak padu linije energije), C – Šezijev koeficijent otpora.

Uvođenjem **Maningovog koeficijenta rapavosti** (n), gde je:

$$C=\frac{R^{1/6}}{n} \tag{6-11}$$

Šezijeva jednačina se transformiše u **Šezi-Maningovu jednačinu** koja glasi:

$$Q=\frac{1}{n}\cdot A\cdot R^{2/3}\cdot\sqrt{J} \tag{6-12}$$

gde je: Q – protok (m^3/s), A – površina proticajnog profila (m^2), R – hidraulički radijus (m), J – pad nivoa vode i n - Maningov koeficijent rapavosti ($m^{-1/3}$ s).

Dubina vode u kanalu sa jednolikim tečenjem je **normalna dubina**. U kanalu sa trougaonim poprečnim presekom normalna dubina se izračunava direktno, a u kanalima sa trapeznim i pravougaonim poprečnim presekom iterativnim postupkom.

6.3.3 Ustaljeno nejednoliko tečenje

Tečenje u osnovnom koritu reke je uvek neustaljeno, ali se može aproksimirati ustaljenim ukoliko su promene malog intenziteta (**sporo promenljivo tečenje**). S druge strane, tečenje u rekama je uvek nejednoliko zbog neprizmatičnosti konture toka (suženja ili proširenja preseka korita, promene pada, postojanje prepreka tečenju kao što su pragovi, ustave, kaskade, propusti).

Za hidrauličku analizu ustaljenog nejednolikog tečenja koriste se:

- **Jednačina kontinuiteta**:

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \tag{6-13}$$

- **Jednačina održanja energije** ili **Bernulijeva jednačina**, koja se postavlja za dva susedna rečna profila (slika 6.13):

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + Z_2 + \Delta E_{1-2} \tag{6-14}$$

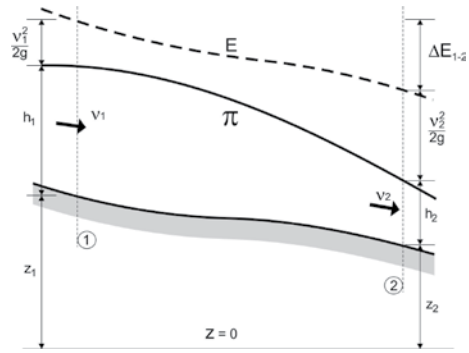
gde su: V_1 i V_2 – brzine vode u profilima 1 i 2 (m/s), Z_1 i Z_2 – kote dna u profilima 1 i 2 (m), h_1 i h_2 – dubine vode u profilima 1 i 2 (m), ΔE_{1-2} – gubitak energije između profila 1 i 2 (m), g – gravitaciona konstanta (m^2/s).

Iz Bernulijeve jednačine se izvodi izraz za promenu nivoa vode između dva susedna profila:

$$h_1 - h_2 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g} + \Delta Z + \Delta E_{1-2} \tag{6-15}$$

u kome prvi član predstavlja promenu brzinske visine, drugi promenu kote dna i treći gubitak energije, koji ima komponentu lokalnog gubitka (ΔE_l) i gubitka na trenje (ΔE_{tr}).

$$\Delta E_{1-2} = \Delta E_l + \Delta E_{tr} \tag{6-16}$$



Slika 6.13: Postavka Bernulijeve jednačine za otvoreni tok [28]

gde je:

$$\Delta E_l = \xi \cdot \left| \frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} \right| \tag{6-17}$$

Koeficijent lokalnog gubitka energije (ξ) u uslovima mirnog tečenja ima vrednosti date u tabeli 6.2.

Tabela 6.2: Koeficijenti lokalnog gubitka [26]

Tip promene	Koeficijent lokalnog gubitka energije (ξ)	
	Suženje ($V_1 < V_2$)	Proširenje ($V_1 > V_2$)
Postepena promena	0,1	0,3
Most	0,3	0,5
Nagla promena	0,6	0,8

Gubitak na trenje se određuje pomoću Šezi-Maningove jednačine:

$$\Delta E_{tr} = J \cdot \Delta x = \frac{n \cdot Q^2}{A_s^2 R_s^{4/3}} \cdot \Delta x \qquad (6\text{-}18)$$

gde je: J – pad linije nivoa između profila (-), Δx - rastojanje između profila (m), n - Maningov koeficijent rapavosti ($m^{-1/3}$ s), A_s – srednja vrednost površina proticajnih profila 1 i 2 (m^2), O_s – srednja vrednost okvašenog obima profila 1 i 2 (m) i osrednjeni R_s – osrednjeni hidraulički radijus (m):

$$A_s = \frac{A_1 + A_2}{2}; \quad O_s = \frac{O_1 + O_2}{2}; \quad R_s = \frac{A_s}{O_s} \qquad (6\text{-}19)$$

Za poznatu geometriju susednih profila, poznat nivo vode na profilu 2 (nizvodni profil ako je tečenje mirno, pa proračun ide u uzvodnom smeru), usvojen Maningov koeficijent rapavosti i poznati protok, računa se nivo vode na uzvodnom profilu 1.

Postupak proračuna je iterativan, jer nije moguće izvesti eksplicitni oblik. U jednačinama figurišu parametri toka u profilu 1, koji su nepoznati, pa se moraju pretpostaviti. Za pretpostavljeni nivo vode u profilu 1, određuju se morfološki parametri i brzina vode. Zatim se primenom Bernulijeve jednačine računa nivo vode u profilu 1. Pretpostavljena i sračunata brzina u profilu 1 se neće poklopiti, pa se postupak ponavlja do zadovoljavajuće tačnosti (u slučaju ravničarskih tokova smatra se dobrim slaganjem ukoliko se pretpostavljeni i računski nivo razlikuju na drugoj decimali). Zatim se prelazi na deonicu između sledeća dva profila itd.

Ukoliko nema lokalnih gubitaka, a razlika brzinskih visina je zanemarljivo mala, promena nivoa vode između dva susedna profila (ΔZ) se može odrediti pomoću sledećeg oblika Šezi-Maningove jednačine [26]:

$$\Delta Z = \Delta x \cdot \frac{(n \cdot Q)^2}{(n \cdot K)^2} \qquad (6\text{-}20)$$

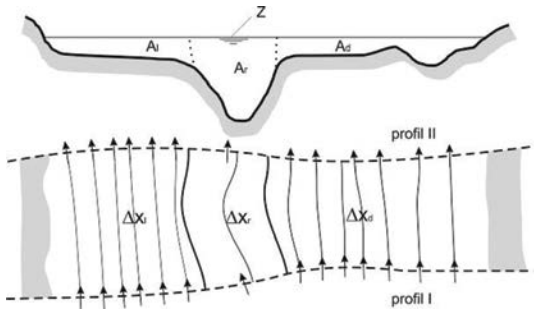
gde je: Q – protok (m^3/s),- rastojanje između profila (m), n - Maningov koeficijent rapavosti ($m^{-1/3}$ s), K - propusna moć korita (ili moduo protoka) na posmatranoj deonici, koji se računa na osnovu:

$$K = \frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{A \cdot R^{2/3}}{n} \qquad (6\text{-}21)$$

gde je: J – pad nivoa vode na posmatranoj deonici, A – površina proticajnog profila (m^2), R – hidraulički radijus (m) .

Primena ove jednačine za proračune prirodnih korita ima smisla samo ukoliko je deonica približno prizmatična. Ovo se može obezbediti ukoliko je razmak profila dovoljno mali. Veličina nK može se direktno sračunati ukoliko je poznata geometrija poprečnog profila reke.

Određivanje geometrijskih parametara i nivoa vode između dva profila je relativno jednostavan zadatak ukoliko se računaju nivoi vode u domenu osnovnog korita. Međutim, pri velikim vodama se tečenje odvija i na inundacijama, koje imaju drugačije geometrijske karakteristike i rapavost. Zbog toga se za potrebe inženjerskih proračuna poprečni profil reke deli na više hidraulički homogenih delova. Najgrublja je podela na osnovno korito i dve inundacije (slika 6.14).



Slika 6.14: Podela složenog korita za veliku vodu na osnovno korito i inundacije [26]

Uvodi se pretpostavka da se u osnovnom koritu i inundacijama formiraju tri paralelna linijska toka, a da nema poprečnog tečenja, odnosno da je nivo vode isti u svim delovima korita.

Moduo protoka složenog korita K jednak je zbiru modula za osnovno korito reke (K_r), levu (K_{il}) i desnu inundaciju (K_{id}):

$$K = K_r + K_{il} + K_{id} = \frac{A_r \cdot R_r^{2/3}}{n_r} + \frac{A_{il} \cdot R_{il}^{2/3}}{n_{il}} + \frac{A_{id} \cdot R_{id}^{2/3}}{n_{id}} \qquad (6\text{-}22)$$

gde je: A_r, A_{il}, A_{id} – površine proticajnog profila osnovnog korita reke, leve i desne inundacije (m^2), R_r, R_{il}, R_{id} – hidraulički radijusi po delovima korita (m) i n_r, n_{il}, n_{id} - Maningov koeficijent rapavosti osnovnog korita, leve i desne inundacije ($m^{-1/3}$ s).

Zbog različite dužine toka po osnovnom koritu i inundacijama, potrebno je definisati i računsko odstojanje između profila:

$$\Delta x = \frac{\Delta x_{il} \cdot Q_{il} + \Delta x_r \cdot Q_r + \Delta x_{id} \cdot Q_{id}}{Q} \qquad (6\text{-}23)$$

gde su: Δx_{il}, Δx_r, Δx_{id} - rastojanja između poprečnih profila po levoj inundaciji, osovini osnovnog korita i desnoj inundaciji (m), Q_{il}, Q_r, Q_{id} – protok između dva profila po levoj inundaciji, u osnovnom koritu i po desnoj inundaciji (m^3/s).

6.3.4 Neustaljeno tečenje

Neustaljeno tečenje karakteriše promenljivost hidrauličkih veličina (protoka, nivoa, brzina) u prostoru i vremenu. Razlikuju se **naglo promenljivi** neustaljeni tokovi koji se odlikuju strmim čelom (talas nastao rušenjem brane ili promenama u ispuštanju vode iz hidroelektrane, talas velikih voda na bujičnoj reci) i **sporo promenljivi neustaljeni tokovi** (poplavni talas na ravničarskoj reci, sa relativno sporim promenama protoka).

Za rešavanje ove problematike koriste se Sen-Venanove jednačine u punom obliku, koje se rešavaju numeričkim metodama kao što je metoda konačnih razlika, uz definisanje početnih i graničnih uslova.

Početni uslovi su vrednosti promenljivih duž toka u početnom trenutku vremena (t_0). Dobijaju se hidrauličkim proračunom ustaljenog tečenja za početnu vrednost protoka $Q(t_0)$.

Granični uslovi su **spoljašnji** (definišu se u profilima na uzvodnom i nizvodnom kraju računske oblasti) i **unutrašnji** (zadaju se na profilima ušća pritoka, brana, bočnih preliva ili sl.). Na uzvodnom kraju računske deonice se može zadati hidrogram ili nivogram, a na nizvodnom hidrogram, nivogram ili kriva protoka.

6.3.5 Linijski otpori

Najznačajnija hidraulička podloga je podatak o linijskom otporu tečenju. Ovom temom su se bavili brojni hidrauličari, a najviše se koriste izrazi za linijske otpore koje su definisali Šezi (Chezy), Maning (Manning) i Darsi-Vajsbah (Darcy-Weisbach) [26]:

Autor	Izraz	Dimenzije koeficijenata otpora
Šezi	$\frac{V}{V_*}=\frac{C}{\sqrt{g}}$	$[C]=\frac{m^{1/2}}{s}$
Maning	$\frac{V}{V_*}=\frac{R^{1/6}}{n\cdot\sqrt{g}}$	$[n]=m^{-1/3}s$
Darsi-Vajsbah	$\frac{V}{V_*}=\sqrt{\frac{8}{\lambda}}$	-

gde su: C, n i λ empirijski koeficijenti otpora (trenja).

U pitanju su relacije između hidrauličkih parametara toka i otpora trenja, koji se izražava preko srednje brzine trenja (V_*):

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R \cdot J} \tag{6-24}$$

gde je: V - srednja brzina (m/s), R - hidraulički radijus (m), V_* - srednja brzina trenja (m/s), τ – tangencijalni napon (kN/m^2), ρ - gustina vode (t/m^3), g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2), J – pad nivoa vode na posmatranoj deonici.

Iako se pojam otpora u principu odnosi na uslove ustaljenog jednolikog tečenja, podaci o otporu se koriste i u proračunima ustaljenog nejednolikog i neustaljenog tečenja. Takođe, treba razlikovati **koeficijent rapavosti** (važi za profil) ili **koeficijent otpora rečne deonice** (važi za duži potez vodotoka).

U rečnoj hidraulici se za ocenu otpora tečenju najčešće koristi **Maningov koeficijent rapavosti (n)**, koji je je promenljiva karakteristika jer zavisi od protoka. Naime, što je veći protok odnosno dubina vode, manji je uticaj rapavosti okvašene konture na tok vode, pa vrednost koeficijenta rapavosti opada. U praksi se, međutim, za manje vodotoke i kanale usvaja konstantna vrednost za ceo dijapazon protoka.

U literaturi se mogu naći vrednosti Maningovog koeficijenta rapavosti (n) koje su određene merenjima u laboratoriji i u prirodi, a date su najčešće opisno (u zavisnosti od materijala dna, obraslosti korita vegetacijom, krivudavosti trase itd.). Primeri su dati u tabeli 6.3.

Tabela 6.3: Vrednosti koeficijenta rapavosti po Maningu

Karakter površine	Stanje površine			
	Odlično	Vrlo dobro	Dobro	Loše
Zidana opeka u cementnom malteru	0,012	0,013	0,015	0,017
Kanal u betonu	0,012	0,014	0,016	0,018
Obloga od tesanog kamena	0,013	0,014	0,015	0,017
Lomljeni kamen u cementu	0,017	0,020	0,025	0,030
Suvozid od lomljenog kamena	0,025	0,030	0,033	0,035
Kanali i rečni tokovi				
- zemljani kanali pravilnog oblika	0,017	0,020	0,023	0,025
- krivudavi sa laganim tokom	0,023	0,025	0,028	0,030
- zemljani iskopani bagerom	0,025	0,028	0,030	0,033
- usečeni u steni, pravilnog oblika	0,025	0,030	0,033	0,035
- zemljano dno, kosine ozidane kamenom	0,028	0,030	0,033	0,035
- grubo kamenito dno, zarasle zemljane kosine	0,025	0,030	0,036	0,040
- grubo usečeni u steni, nepravilan presek	0,035	0,040	0,045	-

Otpor rečne deonice je daleko kompleksniji, jer zavisi od više faktora. To su:

- Površinska rapavost, koja zavisi od oblika i dimenzija čestica rečnog nanosa od koga je formirana okvašena kontura. Sitniji nanos uslovljava manje otpore i obratno;
- Vegetacija, pri čemu gušća vegetacija uslovljava porast otpora;
- Neprizmatičnost rečnog korita;
- Meandriranje trase;
- Deformacija rečnog korita, jer se istaložavanjem nanosa ublažavaju neravnomerne geometrijske forme i smanjuje otpor;
- Postojanje regulacionih građevina u koritu, jer one povećavaju otpor.

Koeficijent otpora rečne deonice se može odrediti na nekoliko načina:

- na osnovu obilaska terena i preporuka iz literature,
- na osnovu empirijske jednačine 6.26 ili
- postupkom kalibracije hidrauličkog modela odnosno „tariranja koeficijenta otpora". Najbolje je da se koeficijent otpora koji je procenjen obilaskom ili empirijski iskoristi kao početna vrednost u postupku tariranja rapavosti.

Ukoliko se koeficijent otpora usvaja na osnovu dostupne literature (primeri su dati na slikama 6.15 i 6.16), projektant mora da bude svestan da je moguća pogrešna procena, koja rezultira značajnim greškama u proračunu.

Empirijska jednačina za određivanje **koeficijenta otpora rečne deonice** glasi:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m \qquad (6\text{-}25)$$

gde je: n_b – koeficijent rapavosti za pravolinijsko, prizmatično korito u prirodnom materijalu (zavisi od apsolutne rapavosti dna odnosno krupnoće nanosa), dok su parametri kojima se obuhvataju ostali uticaji (n_1 – nanosne formacije na dnu, n_2 – neprizmatičnost korita, n_3 – različite prepreke u dnu, n_4 – vegetacija na obalama i inundacijama i m – meandriranje rečnog toka) dati u tabeli 6.4.

Slika 6.15: Rečna deonica sa n=0,0032 [14]

Slika 6.16: Rečna deonica sa n=0,0075 [14]

Tabela 6.4: Parametri za proračun koeficijenta otpora rečne deonice [32]

Stanje korita		Vrednost parametra	
Materijal od koga je formirano korito	zemlja	n_b	0,020
	iskop u steni		0,025
	fini šljunak		0,024
	krupan šljunak		0,028
Stepen rapavosti okvašenog obima	blatno korito	n_1	0,000
	blag		0,005
	umeren		0,010
	jak		0,020
Neprizmatičnost	postepena	n_2	0,000
	povremena		0,005
	učestala		0,010 – 0,015
Uticaj prepreka u koritu	zanemarljiv	n_3	0,000
	mali		0,010 – 0,015
	značajan		0,020 – 0,030
	veliki		0,040 – 0,060
Vegetacija	niska	n_4	0,005 – 0,010
	srednja		0,010 – 0,025
	visoka		0,025 – 0,050
	vrlo visoka		0,050 – 0,100
Stepen meandriranja	mali	m	1,000
	značajan		1,150
	veliki		1,300

Ukoliko je poznat granulometrijski sastav nanosa u kome je formirano rečno korito, za procenu vrednosti koeficijenta n_b može se koristiti jedan od sledećih izraza, koji su dobijeni laboratorijskim ispitivanjima [26]:

Majer-Peter-Miler (Mayer-Peter-Muller, 1948)

$$n_b = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \qquad (6\text{-}26)$$

Garde i Radju (Garde, Raju, 1978)

$$n_b = \frac{d_{50}^{1/6}}{21} \qquad (6\text{-}27)$$

Đulijen (Julien, 2002)

$$n_b = \frac{d_{50}^{1/6}}{16} \qquad (6\text{-}28)$$

gde je: d_{90} – prečnik najkrupnijeg nanosa, d_{50} – srednji prečnik nanosa u dnu korita.

Stanje rečnog korita, obala i inundacija se utvrđuje terenskim obilaskom, kao i pomoću danas lako dostupnih satelitskih i ortofoto podloga. Orijentacione vrednosti koeficijenata otpora rečne deonice su date u tabeli 6.5 i mogu se koristiti kao početne u postupku tariranja.

Tabela 6.5: Dijapazon vrednosti koeficijenta otpora rečne deonice [19]

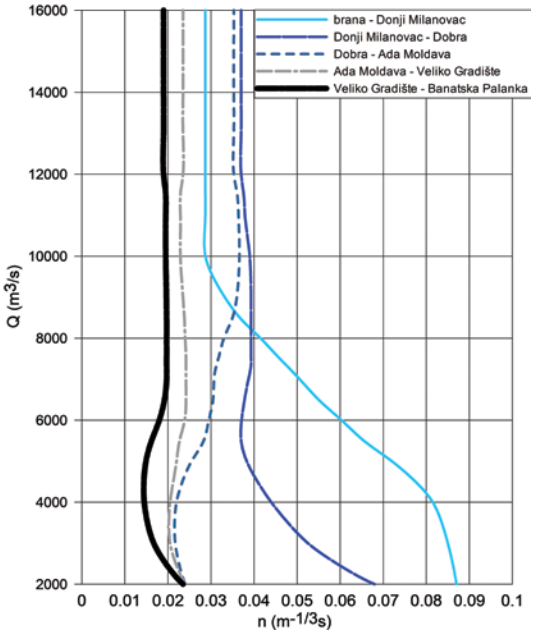
Tip rečnog korita		Vrednost koeficijenta otpora (n)		
		min.	srednja	maks.
A	**MALI REČNI TOKOVI** (širine manje od 20-30 m pri velikim vodama)			
A.1	RAVNIČARSKI TOKOVI			
A.1.1	Čista pravolinijska deonica	0,025	0,030	0,035
A.1.2	Krivudav rečni tok, relativno čist, sa plićacima i tišacima	0,033	0,040	0,045
A.1.3	Deonice sa sporim strujanjem, obrasle rečnim korovom	0,050	0,070	0,080
A.1.4	Deonice sa veoma sporim strujanjem, dubokim tišacima, ostacima korenja drveća	0,075	0,100	0,150
A.2	PLANINSKI TOKOVI (bez vegetacije u koritu, strmih obala)			
A.2.1	Korita sa šljunkovitim dnom	0,030	0,040	0,050
A.2.1	Korita sa dnom pokrivenim krupnim šljunkom i kamenjem većih dimenzija	0,040	0,050	0,070
B	**VELIKI REČNI TOKOVI** (širina vodenog ogledala pri velikim vodama veća od 30 m)			
B.I	Pravilne rečne deonice bez vegetacije na obalama i krupnog kamenja u koritu	0,025	0,030	0,035
B.II	Nepravilne rečne deonice	0,035	0,050	0,100
C	INUNDACIONE POVRŠINE			
C.1	PAŠNJACI BEZ ŽBUNJA			
C.1.1	Niska trava	0,025	0,030	0,035
C.1.1	Visoka trava	0,030	0,035	0,050
C.2	OBRAĐENE POVRŠINE			
C.2.1	Požnjevene površine	0,020	0,030	0,040
C.2.2	Kulture sejane u redovima	0,025	0,035	0,045
C.2.3	Kulture koje se ne seju u redovima	0,030	0,040	0,050
C.3	OBRASLE POVRŠINE			
C.3.1	Retko žbunje i drveće, zimi	0,035	0,050	0,060
C.3.2	Retko žbunje i drveće, leti	0,040	0,060	0,080
C.3.3	Gusto žbunje, zimi	0,045	0,070	0,110
C.3.4	Gusto žbunje, leti	0,070	0,100	0,160
C.4	ŠUME			
C.4.1	Gust vrbak	0,110	0,150	0,200
C.4.2	Očišćen teren sa ostacima panjeva	0,030	0,040	0,050
C.4.3	Šuma sa delimično oborenim stablima, grane iznad nivoa velikih voda	0,080	0,100	0,120
C.4.4	Šuma sa delimično oborenim stablima, grane ispod nivoa velikih voda	0,100	0,120	0,160

Kao što je već više puta istaknuto, koeficijent otpora rečne deonice se najtačnije određuje postupkom "tariranja koeficijenta otpora" na određenoj deonici rečnog toka.

Nivoi vode na analiziranoj deonici rečnog toka se mogu geodetski snimiti, iako se to sve ređe radi (zbog velikih troškova). Nakon definisanja protoka u periodu merenja, podaci o nivoima vode se koriste za određivanje koeficijenta otpora. Hidraulički proračun se ponavlja sa različitim vrednostima koeficijenta otpora, sve dok se za izmereni protok proračunom ne dobiju snimljene kote nivoa vode. Uobičajena je da se proračun ponavlja sve dok se razlika između merenih i računskih nivoa vode ne svede na nekoliko santimetara.

Ako je vodotok hidrološki izučen, tariranje se radi na deonici između dve hidrološke stanice, na kojima su poznate krive protoka.

Rezultat tariranja su krive koje definišu promenu koeficijenta otpora u funkciji protoka (slika 6.17).



Slika 6.17: Krive rapavosti - reka Dunav u akumulaciji HE Đerdap 1 (Izvor: IJČ)

6.3.6 Primeri 1D hidrauličkih proračuna

Za proračune ustaljenog i neustaljenog strujanja u rekama koristi se danas veliki broj softvera, a najčešće HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, slobodno korišćenje softvera) i MIKE11 (Danski institut za hidrauliku, DHI, komercijalni softver).

6.3.6.1 1D hidraulički proračun ustaljenog tečenja u softveru HEC-RAS

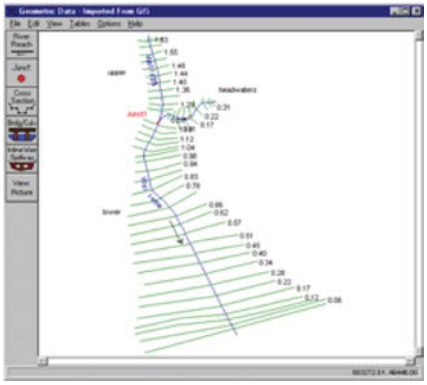
Program HEC-RAS računa ustaljeno tečenje u mirnom, burnom ili prelaznom režimu [74]. Računska procedura je zasnovana na rešavanju linijske energetske jednačine, u kojoj se gubici energije obuhvataju kroz gubitke na trenje (preko Maningovog koeficijenta) i lokalne gubitke zbog širenja/sužavanja toka (preko koeficijenta kojim se množi brzinska visina). Dinamička jednačina se koristi za deonice sa prelaznim režimom, na kojima se javlja hidraulički skok, kao i pri proračunu tečenja u zoni mostova i ušća.

Osnovne ulazne podatke za proračun ustaljenog tečenja u softveru HEC-RAS predstavljaju: (a) granični uslov i to nizvodni ukoliko je tečenje mirno (kriva protoka odnosno kote nivoa vode na najnizvodnijem profilu za sve računske protoke), uzvodni ukoliko je tečenje burno odnosno oba granična uslova u prelaznom režimu; (b) merodavni protoci; (c) koeficijenti otpora osnovnog korita i inundacionih površina i (d) geometrija rečnog korita.

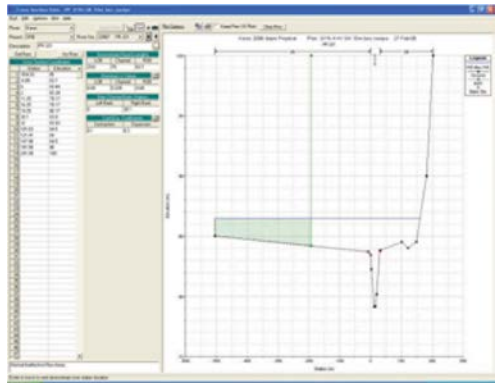
Priprema geometrije modela (hidrografska mreža i poprečni profili korita reka, objekti u i izvan korita reka - mostovi, prelivi, nasipi, neaktivne zone tečenja u delovima dolina, objekti koji blokiraju tečenje i dr.) može se vršiti ručno ili uz pomoć HEC-GeoRAS modula u okviru ArcGIS softverskog paketa. HEC-GeoRAS je skup alata koji radi u GIS okruženju

i koristi georeferencirane podatke, a pre svega digitalni model terena (DMT). Takođe, uz pomoć HEC-GeoRAS modula se rezultati hidrauličkih proračuna prebacuju u GIS okruženje, što olakšava prikaz rezultata na situaciji rečnog korita. Presekom ravni vodnog ogledala sa digitalnim modelom terena dobijaju se prostorni podaci za prikaz poplavljenih područja, u obliku poligona, i prikaz dubina, u rasterskom obliku.

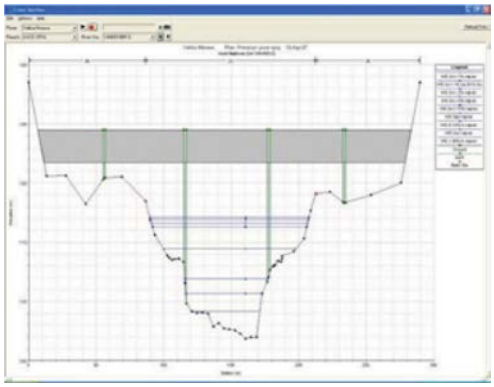
Na slikama 6.18 do 6.21 prikazani su neki „prozori“ ovog programa, sa ulaznim podacima i izlaznim rezultatima.



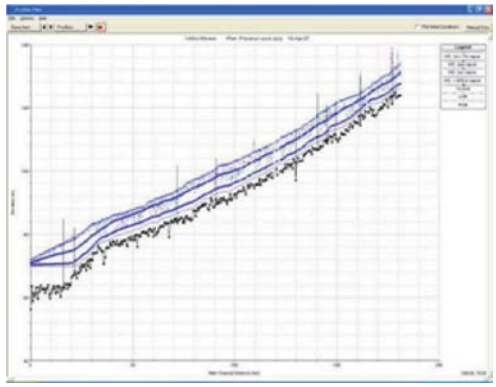
Slika 6.18: Unos položaja poprečnih profila (Izvor: IJČ)



Slika 6.19: Unos geometrije poprečnih profila (Izvor: IJČ)



Slika 6.20: Prikaz rezultata u poprečnom profilu (Izvor: IJČ)



Slika 6.21: Prikaz rezultata u podužnom profilu (Izvor: IJČ)

6.3.6.2 1D hidraulički proračun neustaljenog tečenja u softveru HEC-RAS

U hidrauličkom modelu neustaljenog tečenja potrebno je definisati spoljašnje i unutrašnje granične uslove.

Spoljašnji granični uslovi se definišu na profilima na uzvodnom i nizvodnom kraju računske deonice. Na uzvodnom kraju se kao granični uslov može zadati hidrogram ili nivogram, a na nizvodnom kraju hidrogram, nivogram ili kriva protoka, kao i normalna dubina dobijena iz Chezy-Manning-ove jednačine.

Unutrašnji granični uslovi se zadaju na profilima gde postoji promena u tečenju (ušće pritoke, brana, bočni preliv itd). Takođe, uzima se u obzir i dotok sa međusliva između dve pritoke.

U HEC-RAS-u moguće je modeliranje bočnih retenzija, kao nezavisnog prostora koji se povezuje sa rekom uz pomoć bočnih preliva [74]. Efekat bočne retenzije je smanjenje pika talasa, odnosno odsecanje vršnog dela hidrograma za deo zapremine koji se zadrži u retenziji. Kasnije, kad nivo vode u glavnom toku opadne, počinje pražnjenje retenzionog prostora.

Koraci u proračunu neustaljenog tečenja su:

- Serija proračuna za uslove ustaljenog tečenja i tariranje koeficijenta rapavosti korišćenjem krivih protoka na hidrološkim stanicama i/ili tragova velikih voda duž toka;
- Izbor vremenskih serija za proračune. Poželjno je da svaki događaj obuhvata čitav talas, od male do velike vode;
- Definisanje zona sa neaktivnim tečenjem i bočnih preliva, kako bi se modeliranjem što bolje reprodukovao hidrogram analiziranog događaja (vreme, vrh talasa, zapremina i oblik);
- Podešavanje koeficijenata rapavosti do zadovoljavajućeg poklapanja računskog i registrovanog nivograma;
- Fino podešavanje parametara dodatnom promenom koeficijenata rapavosti za određene vrednosti protoka (preko faktora promene koeficijenta). Moguća je primena sezonskog faktora promene koeficijenata rapavosti, ukoliko se radi kalibracija modela na dužim serijama;
- Verifikacija modela;
- Ako je potrebno, dodatno prilagođavanje modela i novo pokretanje kalibracije i verifikacije.

U postupku kalibracije treba imati u vidu očekivane promene rezultata proračuna pri promeni nekih parametara modela (uz pretpostavku da se geometrija modela ne menja). Na primer, pri povećanju Maningovog koeficijenta: računski nivoi se povišavaju, vrh hidrograma se smanjuje kako se talas pomera nizvodno, povećava se vreme putovanja talasa, a histerezis na krivoj protoka se širi (povećava se razlika uzlazne i silazne grane talasa).

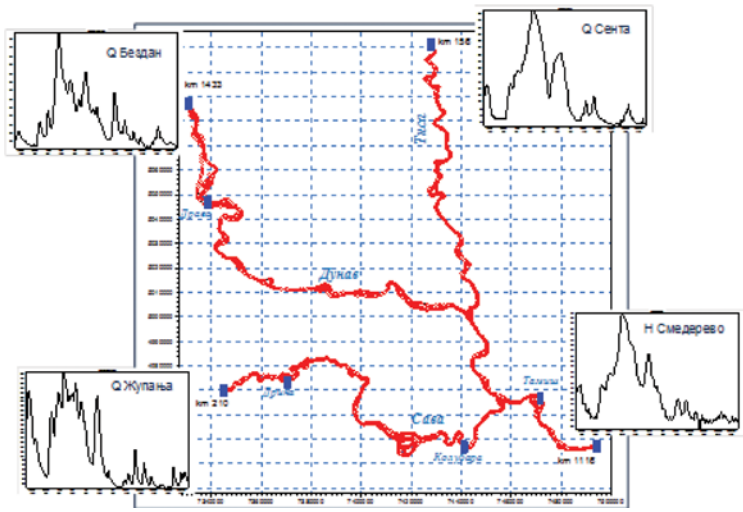
6.3.6.3 1D hidraulički proračun neustaljenog tečenja u softveru MIKE 11

MIKE 11 se može koristiti za modeliranje neustaljenog tečenja u složenom rečnom sistemu. Ulazne datoteke programa MIKE11 definišu rečni sistem, poprečne profile, granične uslove i hidrodinamičke parametre i povezane su u simulacionom editoru.

Primer primene modela je analiza propagacije poplavnih talasa na Dunavu, u uslovima koincidencije sa velikim vodama Save i Tise (slika 6.22). U ovom modelu je kao nizvodni granični uslov korišćen nivogram (srednje dnevne vrednosti nivoa vode na hidrološkoj stanici Smederevo), dok su uzvodni granični uslovi hidrogrami (srednje dnevne vrednosti protoka Dunava, Save i Tise na hidrološkim stanicama Bezdan, Županja i Senta [29]. U model su uključeni protoci pritoka drugog reda (Drave, Tamiša, Drine i Kolubare) kao tačkasti izvori.

Posebna pažnja je posvećena simulaciji tečenja velikih voda u rečnim krivinama i po inundacijama (slika 6.23). Tokovi po inundacijama su povezani sa osnovnim koritom preko veznih kanala, za koje su definisane kote i širine preliva između osnovnog korita i inundacija.

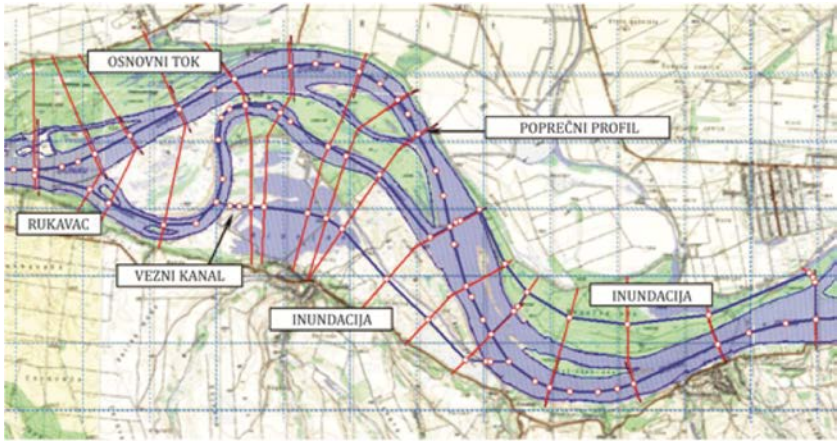
Leva i desna obala osnovnog korita (slika 6.24) se obeležavaju markerima, da bi se razdvojile inundacije i osnovno korito, jer im se dodeljuju različite vrednosti koeficijenta rapavosti.



Slika 6.22: Računska oblast modela (Izvor: IJČ)

Proračuni su vršeni u fiksnim vremenskim intervalima od po 15 min. Model je kalibrisan na osnovu podataka o protocima i nivoima vode koji su zabeleženi tokom 2006. godine, dok se verifikacija zasnivala na podacima o velikoj vodi 2005. godine.

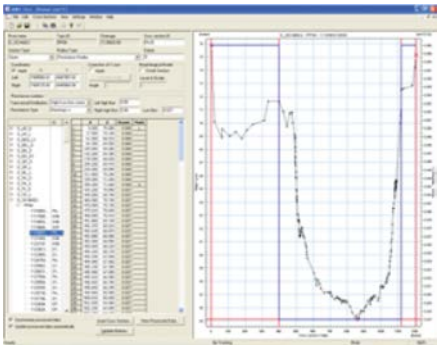
Opisani model neustaljenog tečenja u služenom rečnom sistemu se može koristiti za više namena. To je, najpre, simulacija nivoa vode u hipotetičkim ekstremnim hidrološkim situacijama, u kojoj se može ispitati bilo koja kombinacija ulaznih hidrograma velikih voda.



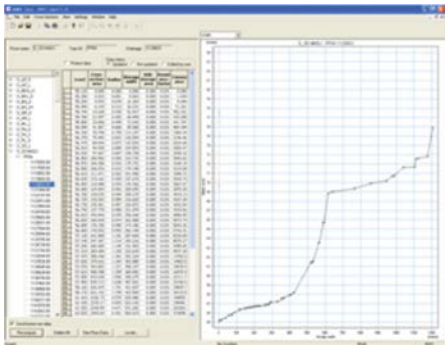
Slika 6.23: Paralelni tokovi kroz osnovno korito, rukavac i inundacije (Izvor: IJČ)

Model može da se operativno koristi tokom odbrane od poplava za prognozu nivoa vode na bilo kojoj lokaciji unutar modeliranog rečnog sistema. Tada se kao ulaz zadaju prognozirani protoci i/ili vodostaji na ulaznim profilima (njihova prognoza je zadatak hidrometeorološke službe).

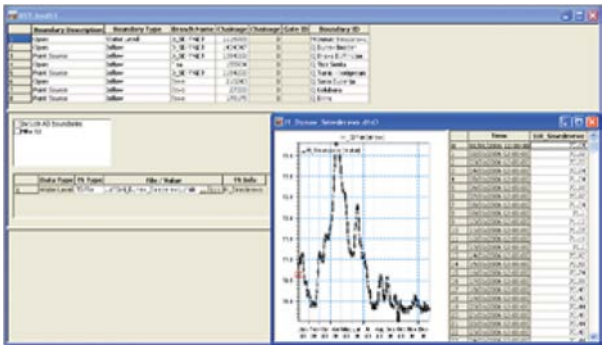
Kombinacijom hidrološke prognoze i hidrauličkog modela neustaljenog tečenja dobijaju se podaci za potrebe službe za odbranu od poplava i obaveštavanje javnosti i to vreme pojave vrha talasa i nivo vode na svim računskim profilima.



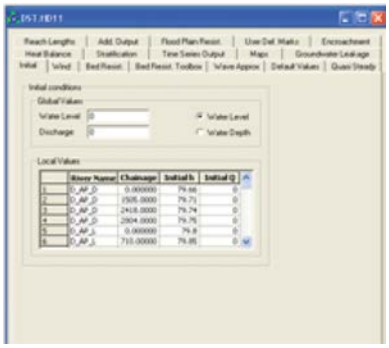
Slika 6.24: Definisanje poprečnih profila (Izvor: IJČ)



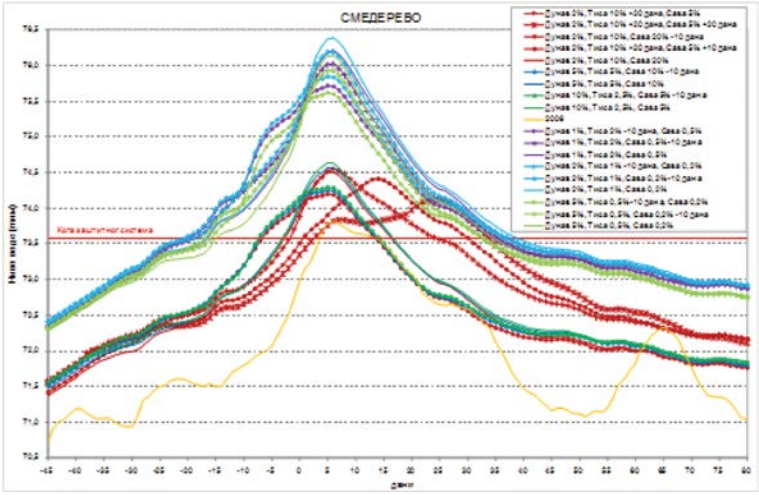
Slika 6.25: Parametri po profilima (Izvor: IJČ)



Slika 6.26: Granični uslovi (Izvor: IJČ)



Slika 6.27: Početni uslovi (Izvor: IJČ)



Slika 6.28: Rezultat simulacije ekstremno velikih voda (Izvor: IJČ)

Ovakav hidraulički model neustaljenog tečenja može da se koristi za analizu efikasnosti mera za kontrolu poplava (kao što su bočne retenzije) u različitim hidrološkim uslovima, za pripremu karata plavnih zona ili projektovanje rekonstrukcije postojećih objekata za zaštitu od poplava.

6.4 Ravanski i prostorni modeli

6.4.1 Ravanski numerički modeli

Iako je u svakom vodotoku strujanje vode trodimenzionalno, u većini slučajeva se 1D modeliranjem dobijaju sve informacije potrebne za analizu ili projektovanje. Međutim, 1D model ne daje dovoljno informacija ako:

- nema privilegovanog pravca tečenja (široke inundacije, promenjivi pravci tečenja u koritu ili na inundacijama – primer na slici 6.29) ili
- je potrebno preciznije definisati strujnu sliku u zoni nekog objekta (na pr. mostovski prelaz sa više otvora) ili na kraćoj rečnoj deonici sa specifičnim uslovima tečenja (oštra krivina, razuđen tok itd.).

Slika 6.29: Složeno rečno korito (Izvor: rudi.net)

Za analizu složenih uslova poželjno je primeniti ravanski (2D) model tečenja, jer se njime dobijaju dopunske informacije, navedene u tabeli 6.6.

Tabela 6.6: Razlike 1D i 2D modela

Karakteristika/faktor	1D model	2D model
Pravac toka	Unapred definisan	Računa se
Brzina u poprečnom pravcu	Zanemaruje se	Računa se
Promene brzine u vertikali	Zanemaruje se	Zanemaruje se
Brzina se osrednjava	U poprečnom preseku	Po dubini
Brzine u poprečnom preseku	Pretpostavlja se da su proporcionalne protoku	Računa se
Promena nivoa vode u poprečnom preseku	Zanemaruje se	Računa se

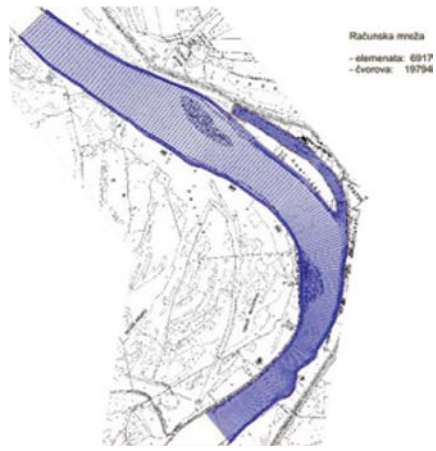
Matematički model ravanskog (2D) tečenja čine jednačina održanja mase i jednačine održanja količine kretanja. Ove jednačine su dobijene proširenjem seta Sen-Venanovih jednačina na još jednu prostornu dimenziju, tako da se sve promenljive definišu i u podužnom i u poprečnom pravcu. U modelu su nezavisne promenljive prostorne koordinate (x,y) i vreme (t), dok su zavisne promenljive komponente vektora brzine (u,v) i dubina (h).

Jednačine su vrlo složene, a rešavaju su numerički metodom konačnih razlika ili metodom konačnih elemenata. Rešenje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina definiše strujno polje u horizontalnoj ravni, pri čemu su komponente brzine osrednjene po dubini.

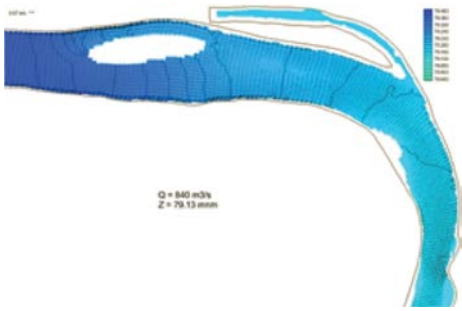
Za primenu ravanskog modela je potreban adekvatan softver i iskusan kadar, kao i vrlo detaljne podloge.

Na slikama 6.30 - 6.33 prikazan je primer primene modela ravanskog (2D) ustaljenog tečenja u analizi strujanja i transporta nanosa na Dunavu, kod Apatina (Građevinski fakultet, Beograd).

Slika 6.30: Aksonometrijski prikaz korita Dunava (Izvor: arhiva IJČ)



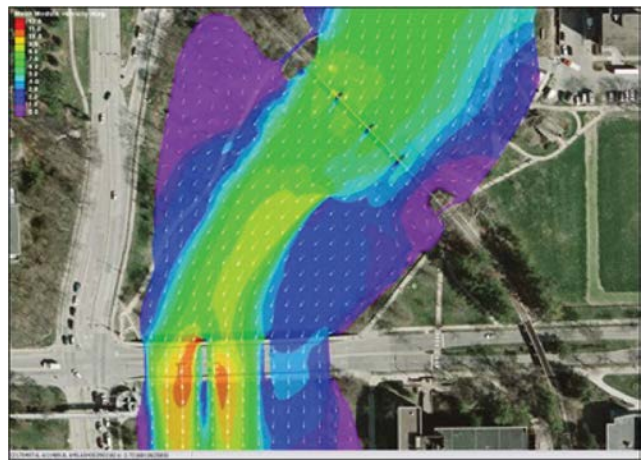
Slika 6.31: Računska mreža (Izvor: arhiva IJČ)



Slika 6.32: Polje brzina u uslovima male vode (Izvor: arhiva IJČ)

Slika 6.33: Polje brzina u uslovima punog korita (Izvor: arhiva IJČ)

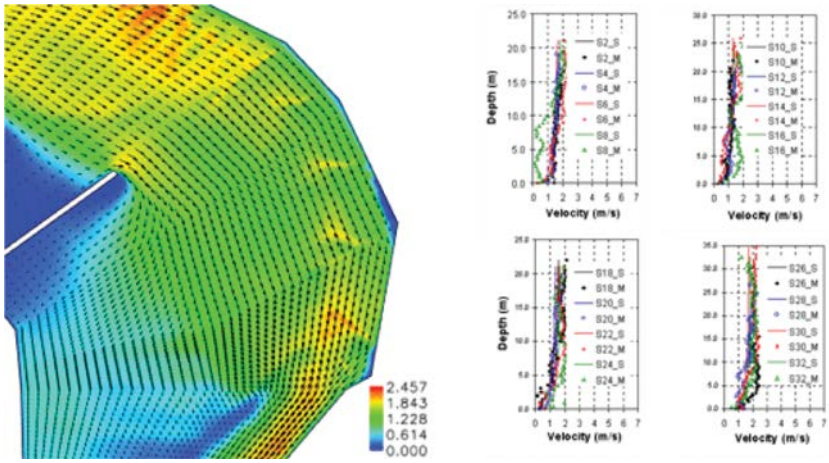
Sa povećanjem kapaciteta računara, ravanski modeli počinju da se koriste i za analizu fenomena neustaljenog tečenja. Najčešće je u pitanju analiza plavljenja priobalja, uključujući i efekte rušenja nasipa (slika 6.34).



Slika 6.34: Primer rezultata neustaljenog ravanskog proračuna (Izvor: ayresriverblog.com)

6.4.2 Prostorni numerički modeli

U svetu se radi na razvoju prostornih (3D) numeričkih modela strujanja. Oni se još uvek vrlo retko primenjuju, jer zahtevaju izuzetno jake računare za simulaciju. Na slici 6.35 prikazani su rezultati primene jednog prostornog modela u rečnoj hidraulici. U pitanju je analiza strujanja u oštroj rečnoj krivini, u kojoj su prisutna i sekundarna strujanja oko rečnih građevina. Kao i svaki drugi hidraulički model, 3D model se mora kalibrisati, što je u ovom slučaju urađeno na osnovu terenskih merenja i merenja na fizičkom modelu.



Slika 6.35: Vektori brzina (horizontalna ravan) i vertikalni rasporedi brzina (Izvor: rwi.adasasistemas.com)

6.5 Fizički modeli

Fizički modeli se koriste za analizu složenih problema, koji se još uvek ne mogu sa dovoljnom pouzdanošću i standardnim procedurama analizirati pomoću numeričkih modela. Najčešće su to prostorna strujanja u zonama objekata kao što su mostovi, prelivi ili regulacione građevine. Fizički modeli dužih rečnih deonica se retko rade zbog specifičnosti merenja, velikog prostora koji je potreban za njihovu izgradnju i visoke cene izrade.

Najznačajnije je na fizičkom modelu obezbediti sličnost sa prirodom [33]. To se postiže uspostavljanjem odgovarajućeg odnosa neke veličine u prirodi i na modelu. Na primer, može se usvojiti razmera za dužinu (L*):

$$L^* = \frac{L_p}{L_m} \tag{6-29}$$

gde se indeksi p i m odnose na prirodu i model.

Ukoliko se model gradi tako da se poštuje razmera za sve dužine u koordinatnom sistemu (x* = y* = z* = L*), model je **nedistordovan**. Ovakvi modeli se koriste za analizu kratkih objekata (prelivi, brzotoci, mostovski stubovi). Modeli se grade u razmeri L* = 20–100, ali je najčešće L* = 40 ili 50. Nedistordovani modeli nisu pogodni za rečne modele, jer vodotoci imaju znatno veću dužinu od druge dve dimenzije.

Za reke se u principu koriste **distordovani modeli**, na kojima je obezbeđena jednakost razmera u horizontalnoj ravni (x* = y* = L*), dok je vertikalna razmera (razmera za dubine h*) drugačija. Tipične horizontalne razmere su L*= 200 i L*= 300, a vertikalne h*=50 i h*=60.

Na fizičkom modelu se mora obezbediti kinematska sličnost (sličnost polja brzine) i dinamička sličnost (sličnost sila). Najčešće se na modelu obezbeđuje Frudova sličnost ($F_{rm}=F_{rp}$), što znači da postoji sličnost polja brzine i dubine na modelu i u prirodi.

Fizički modeli mogu biti sa nepokretnim ili pokretnim dnom. Modeli sa **nepokretnim dnom** se grade u celini od čvrstog materijala. Koriste se za simulaciju ustaljenog i neustaljenog tečenja na rečnoj deonici.

Primer je model brane HE Đerdap 2, izgrađen u laboratoriji Instituta „Jaroslav Černi“ u Beogradu, na kome je ispitivano strujanje vode u sadašnjem stanju, kao i mere kojima bi se obezbedilo bolje iskorišćenje turbina (slika 6.36).

Slika 6.36: Model brane HE Đerdap 2 (Izvor: IJČ)

Modeli sa **pokretnim dnom** se koriste za ispitivanje opšte i lokalne deformacije u zoni objekata. Osim Frudove sličnosti, na ovakvom modelu mora da se zadovolji i psamološka sličnost, kojom se obezbeđuje ista mera prokretljivosti nanosa na modelu i u prirodi. Usklađivanje razmera, uz ograničenje distorzije modela, dovodi do velikih problema u izboru materijala za pokretno dno. Obično se za dno koriste veštački, vrlo laki materijali (bakelt, plastika, ugalj, plovućac).

Primer modela ove vrste je parcijalni hidraulički model sa pokretnim dnom, razmere za dužine 1:40, koji je u Institutu „Jaroslav Černi“ korišćen kako bi se definisala odgovarajuća rešenja zaštite dna Dunava i stubova mosta kod Beške od opšte i lokalne erozije (slike 6.37 i 6.38).

Slika 6.37: Model stuba 41 mosta kod Beške – erozija dna u fazi izgradnje (Izvor: IJČ)

Slika 6.38: Model stuba 41 mosta kod Beške – zaštita dna u fazi eksploatacije (Izvor: IJČ)

7 REČNI NANOS

7.1 Uvodne napomene

Intenzivne atmosferske padavine prozrokuju u rečnim slivovima dva paralelna procesa - površinski oticaj i spiranje tla, usled čega dolazi do nastanka velikih voda i erozione produkcije nanosa. Produkti ovih procesa dospevaju u hidrografsku mrežu, kroz koju nastavljaju kretanje u vidu dvofaznog fluida.

Eroziona produkcija nanosa u rečnim slivovima i transport nanosa u vodotocima predstavljaju dve komponente globalnog prirodnog procesa. Ovi prirodni fenomeni se nikakvim tehničkim merama ne mogu potpuno eliminisati.

Efekti raznih ljudskih aktivnosti na intenzitet erozionih procesa i transporta nanosa mogu biti vrlo veliki, kako pozitivni, tako i negativni. Ovi efekti su vrlo složeni i ne manifestuju se samo na mestu direktne intervencije, već daleko izvan zone ljudskog delovanja.

U slučaju intenzivnih erozionih procesa u slivu, količina nanosa koja dospeva u vodotok najčešće prevazilazi njegovu transportnu sposobnost. Usled toga dolazi do zaustavljanja i taloženja nanosa, koji zasipa vodoprivredne objekte kao što su regulisana rečna korita, kanali za navodnjavanje, vodozahvati. Jedan od najvećih problema je zasipanje akumulacija rečnim nanosom, koje je prisutno u svim krajevima sveta, ali bitno zavisi od lokalnih okolnosti.

Sa druge strane, erozioni procesi dovode do hemijskog zagađenja vode materijalima prirodnog i veštačkog porekla. Hemijske materije prirodnog porekla nastaju u procesu raspadanja stena i dospevaju sa nanosom u hidrografsku mrežu. Usled spiranja veštačkih đubriva i pesticida sa poljoprivrednih površina u rečnim slivovima nastaje hemijsko zagađenje veštačkog porekla, koje može bitno pogoršati kvalitet reka i akumulacija. Najveći deo hemijskog zagađenja prenose čestice suspendovanog nanosa uz koje se vezuju molekuli hemijskih materija.

Rečni nanos čine čestice geološkog porekla koje su, pokrenute erozijom sa površine terena, dospele u vodotok. Rečni nanos je sastavljen od čestica različite veličine, od prašine do oblutaka. U zavisnosti od brzine vode u vodotoku i krupnoće čestica, rečni nanos se transportuje u vidu **vučenog nanosa** (najčešće 5-15%) i **suspendovanog ili lebdećeg nanos**a (85-95%).

Režim rečnog nanosa je termin koji se odnosi na prostornu i vremensku raspodelu količina i karakteristika nanosa. Njime se obuhvataju fizička svojstva nanosa, kao i pojave vezane na njegovu interakciju sa rečnim tokom. Definiše se na osnovu terenskih istražnih radova i hidrauličkih proračuna.

Pored rečnog nanosa, u vodotocima se kreće **plivajući nanos** odnosno grane i debla drveća, kao i otpad različitog porekla. Plivajući nanos predstavlja opasnost jer može da zatvori proticajni profil mosta ili ustave.

7.2 Nastanak rečnog nanosa

Režim nanosa u vodotoku uslovljen je erozionim procesima u rečnom slivu. Erozija u slivu vodotoka se, prema uzroku nastanka deli na eolsku (erozija izazvana vetrom) i vodnu.

Vodnom erozijom se pokreću čestice koje čine rečni nanos. Razlikuju se:

- **pluvijalna erozija** (slika 7.1), koja nastaje kada se pod udarom kišnih kapi razara slabo vezano zemljište,
- **glacijalna** ili **glečerska erozija** (slika 7.2) i
- **erozija pod uticajem toka vode** (slike 7.3 do 7.6), koja može biti površinska, dubinska ili fluvijalna.

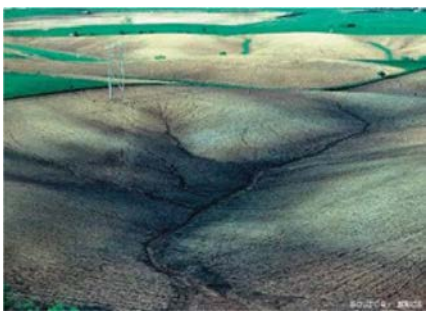
Slika 7.1: Pluvijalna erozija
(Izvor: cursa.ihmc.us)

Slika 7.2: Glacijalna erozija
(Izvor: colorado.edu)

Površinskom erozijom (slika 7.3) pokreću se fine čestice sa površine zemljišta, koje se u prirodnom toku kreću kao **suspendovani nanos**. Na proces površinske erozije utiču intenzitet kiše (veći intenzitet kiše ima i veću erozionu snagu), osobine zemljišta (nestrukturna zemljišta su podložnija procesu erozije) i nagib terena.

Dubinska erozija nastaje kao posledica koncentracije površinskog oticaja i javlja se u obliku jaruga, potoka i reka. U ovom procesu nastaje krupan nanos koji se kreće po dnu rečnog korita kotrljanjem, klizanjem ili u skokovima, odnosno **vučeni nanos**.

Brazdasta erozija je podvrsta dubinske erozije, proces u kome se erozione brazde formiraju na površini zemljišta, duž površinskog slivanja vode (slika 7.3). Brazde imaju tendenciju produbljivanja i proširivanja, pa mogu preći u vododerine i jaruge (slika 7.4), koje često dopiru i do geološke podloge.



Slika 7.3: Površinska i brazdasta erozija
(Izvor: erozijageo.fu-berlin.de)

Slika 7.4: Vododerine i jaruge
(Izvor: dailymail.co.uk)

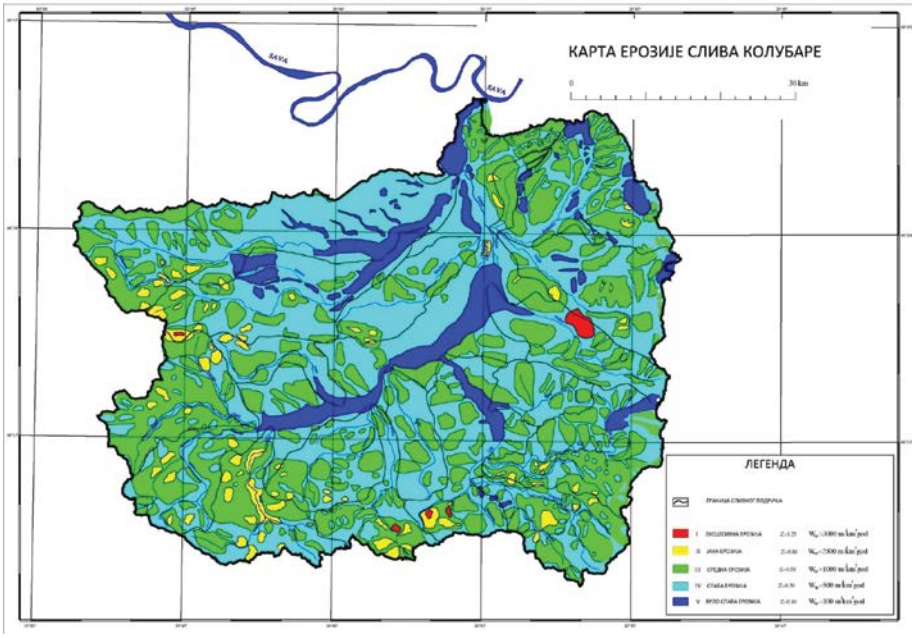
Bujična erozija (slika 4.24) je najopasniji vid dubinske erozije zemljišta. Tokom bujičnih poplava se pokreću najkrupniji materijali i transportuju velikom brzinom do mesta zaustavljanja. Bujična erozija nanosi velike štete poljoprivrednom zemljištu, putevima, pa čak i naseljima [46].

U rečnoj hidrotehnici se termin **fluvijalna erozija** najčešće koristi za proces rušenja obala vodotoka pod uticajem toka vode (slika 7.5).

Osnovni činioci koji utiču na eroziju i nastanak nanosa u određenom slivu su: (a) geomorfološka i geološka predispozicija slivnog područja za razvoj erozionih procesa; (b) meteorološki, hidrografski i hidrološki faktori erozione produkcije i transporta nanosa; (c) pedološki uslovi, stanje vegetacije i način korišćenja zemljišta u slivu; (d) stanje, tipovi i intenzitet erozionih procesa u slivu; (e) morfološke, hidrološke i hidrauličke karakteristike vodotoka i (f) ljudski uticaj na erozione i transportne procese.

Slika 7.5: Fluvijalna erozija – rušenje obala (Izvor: IJČ)

Radi sagledavanja rasprostranjenosti i intenziteta erozije u rečnom slivu koristi se karta erozije [46]. Na karti se obeležavaju područja sa uočenim procesima ekscesivne, jake, srednje slabe i i vrlo slabe erozije (slika 7.6). Karta erozije se dobija dugogodišnjim kartiranjem erozionih procesa, koji vrše inženjeri šumarske struke i odgovarajućim proračunima.



Slika 7.6: Karta erozije u slivu Kolubare (Izvor: IJČ)

Sa hidrotehničkog aspekta, najopasnija je pojava akumulacije pokrenutog nanosa (slike 7.7 i 7.8) koja nanosi štete u rečnim dolinama i stvara probleme u korišćenju vodoprivrednih objekata (zasipanje vodozahvata, akumulacionih prostora, smanjenje proticajnog profila vodotoka zbog koga se javljaju češća izlivanja itd.).

Slika 7.7: Akumulacija nanosa pokrenutog bujičnom erozijom (Izvor: mrescience.com)

Slika 7.8: Akumulacija nanosa pokrenutog fluvijalnom erozijom(Izvor: IJČ)

7.3 Fizička svojstva rečnog nanosa

Karakteristike nanosa se mogu definisati na nivou pojedinačnog zrna i na nivou grupe zrna koja čini mešavinu nanosa. Naučna disciplina koja se time bavi zove se **psamologija**.

7.3.1 Fizička svojstva pojedinačnog zrna

Osnovna fizička svojstva pojedinačnog zrna su: gustina, krupnoća, oblik i brzina tonjenja (ili hidraulička krupnoća).

Gustina zrna je uslovljena mineralnim sastavom stena čijim razaranjem je nanos nastao. Najčešći mineral u sastavu nanosa je kvarc, a mogu se naći i minerali veće gustine. Ipak, vrednosti gustine nanosa kreću se u uskom opsegu (2,6-2,7 t/m^3), tako da se u proračunima najčešće usvaja vrednost ρ_s = 2,65 t/m^3=2650 kg/m^3.

U teorijskim razmatranjima se često koristi pogodna bezdimenziona veličina - **relativna gustina nanosa** u odnosu na gustinu vode. Izražava se kao:

$$s = \rho_s/\rho = 2{,}65 \qquad (7\text{-}1)$$

ili

$$\Delta = (\rho_s-\rho)/\rho = 1{,}65 \qquad (7\text{-}2)$$

gde je gustina vode ρ = 1 t/m^3=1000 kg/m^3.

Krupnoća nanosa se, polazeći od pretpostavke da je zrno sfernog oblika, opisuje karakterističnim prečnicima i karakterističnim brzinama tonjenja.

Karakteristični prečnici su nominalni prečnik (prečnik lopte koja ima istu masu i gustinu, odnosno zapreminu kao zrno nanosa), prečnik na situ (prečnik zrna koje prolazi kroz kvadratni otvor određenog sita), prečnik taloženja i standardni prečnik tonjenja.

Karakteristične brzine su brzina taloženja (uniformna brzina tonjenja pojedinačne čestice u mirnoj vodi neograničene zapremine) i standardna brzina tonjenja (uniformna brzina tonjenja pojedinačne čestice u mirnoj destilovanoj vodi neograničene zapremine, na temperaturi 24°C). Podela nanosa po krupnoći data je u tabeli 7.1.

Oblik zrna je važan za analizu nanosa u hidrodinamičkim uslovima. Pokazatelji oblika su faktor sferičnosti i faktor oblika koji su definisani pomoću 3 ortogonalne dužine zrna.

Brzina tonjenja ili **hidraulička krupnoća** nanosa predstavlja relativno kretanje čestice pod uticajem gravitacije, u neograničenoj zapremini mirne vode. Vrednost brzine tonjenja se može odrediti iz jednačine:

$$W = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{C_d} \cdot \Delta \cdot g \cdot d} \tag{7-3}$$

gde je: W – brzina tonjenja čestice (cm/s), C_d – koeficijent sile otpora, koji zavisi od oblika čestice, Δ – relativna gustina čestice, g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2) i d – prečnik zrna čestice (mm).

Tabela 7.1: Skala krupnoće zrna [32]

Naziv	Klasa	Krupnoća (mm)
Gromade	vrlo velike	4000-2000
	velike	2000-1000
	srednje velike	1000-500
	male	500-250
Obluci	veliki	250-130
	mali	130-64
Šljunak	vrlo krupan	64-32
	krupan	32-16
	srednje krupnoće	16-8
	fini	8-4
	vrlo fini	4-2
Pesak	vrlo krupan	2-1
	krupan	1-0,5
	srednje krupnoće	0,5-0,25
	fini	0,25-0,125
	vrlo fini	0,125-0,062
Prašina	krupna	0,062-0,031
	srednje krupnoće	0,031-0,016
	fina	0,016-0,008
	vrlo fina	0,008-0,004
Glina	krupna	0,004-0,002
	srednje krupnoće	0.002-0,001
	fina	0,001-0,0005
	vrlo fina	0,0005-0,00024

7.3.2 Fizička svojstva mešavine nanosa

Mešavina rečnog nanosa se sastoji od zrna različitih krupnoća, čija raspodela ima slučajan karakter. Osnovna fizička svojstva mešavine nanosa su granulometrijski sastav, poroznost, zapreminska masa i ugao unutrašnjeg trenja.

Granulometrijski sastav rečnog nanosa je procentualno učešće pojedinih klasa zrna (iz tabele 7.1) u mešavini. Predstavlja se u obliku granulometrijske krive (slika 7.18).

Poroznost (λ_0) je udeo zapremine pora ili šupljina (V_e) u zapremini uzorka (V), koji se izražava u procentima:

$$\lambda o = \frac{Ve}{V} \cdot 100\ (\%) \qquad (7\text{-}4)$$

Na poroznost utiču granulometrijski sastav, oblik zrna, zbijenost itd. Razlikuje se ukupna i efektivna poroznost. Prva podrazumeva sve pore, a druga samo međusobno povezane pore. Tabela 7.2. prikazuje zavisnost između efektivne poroznosti i krupnoće nanosa.

Tabela 7.2: Efektivna poroznost rečnog nanosa [26]

Vrsta materijala	Efektivna poroznost (%)
Krupnozrni pesak	36-40
Pesak srednje krupnoće	41-48
Sitnozrni pesak	44-49
Peskovita glina	50-54

Zapreminska masa predstavlja odnos mase uzorka nanosa (sa šupljinama) i njegove zapremine. Može se izraziti preko gustine nanosa i ukupne poroznosti:

- Zapreminska masa u suvom: $\rho_z = (1-\lambda_0) \cdot \rho_s$ (7-5)
- Zapreminska masa pod vodom: $\rho'_z = \lambda_0 \cdot \rho + (1-\lambda_0) \cdot \rho_s$ (7-6)

gde je: λ_0 – poroznost, ρ_z - gustina nanosa za suvu materiju (t/m^3), ρ_s - gustina nanosa bez šupljina (t/m^3), ρ'_z - gustina nanosa pod vodom (t/m^3).

Zapreminska masa krupnog peščanog i šljunčanog nanosa kreće se u granicama 1,5-2 t/m^3, dok je zapreminska masa finog nanosa istaloženog u akumulacijama često manja od 1 t/m^3.

Ugao unutrašnjeg trenja definiše stanje granične ravnoteže materijala, odnosno ono naponsko stanje pri kome zrna, usled narušene ravnoteže, postaju nestabilna. Razlikuje se ugao unutrašnjeg trenja suvog (F) i vlažnog materijala (F'). Na primer, kod peščanog nanosa je F=26-34° u suvom, a F'=15-25° u vlažnom stanju. Ugao unutrašnjeg trenja se povećava sa stepenom nepravilnosti oblika zrna. U stabilnim kosinama rečnog korita se vrednosti ugla unutrašnjeg trenja kreću između 30 i 45°, zavisno od krupnoće materijala (tabela 7.3).

Tabela 7.3: Vrednosti ugla unutrašnjeg trenja [26]

d (mm)	F' (°)	
	zrna sferičnog oblika	zrna nepravilnog oblika
< 1	30	35
5	32	37
10	35	40
50	37	42
>100	40	45

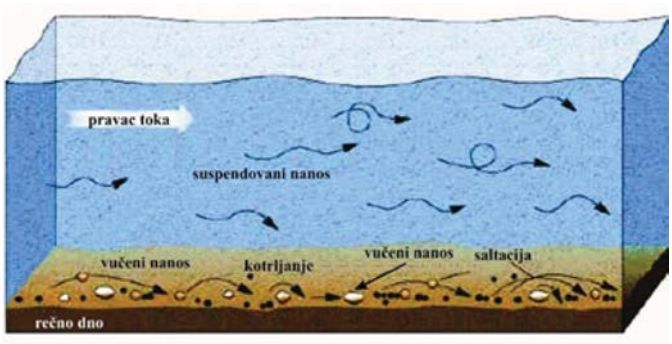
7.4 Podela rečnog nanosa

Vučeni nanos u vodotoku čine krupnije frakcije nanosa (obluci, šljunak i krupan pesak), koje se kreću po dnu kotrljanjem, saltacijama (skokovima) ili vučenjem (slika 7.9). Krupan vučeni nanos se ne kreće stalno, već postoje periodi kada miruje na dnu (pri malim vodama,

kada brzina toka nije dovoljna za pokretanje nanosa) i periodi kada se kreću velike količine nanosa (pri velikim vodama).

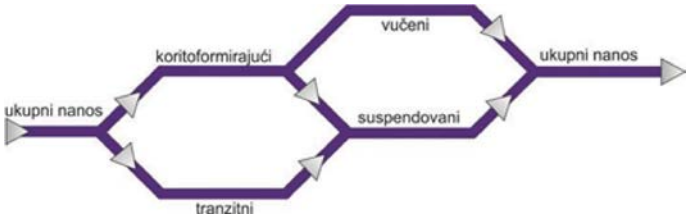
Finije frakcije nanosa (sitan pesak, prašina i glina) su suspendovane u vodi i nazivaju se **suspendovani nanos**. Suspendovani nanos se pronosi celom površinom poprečnog preseka toka, pri čemu je brzina kretanja čestica jednaka brzini vode.

Način kretanja nanosa zavisi od hidroloških uslova, tako da se isti nanos u različitim periodima može kretati i u vučenom obliku i u suspenziji.



Slika 7.9: Načini kretanja nanosa (Izvor: geography.unt.edu)

Šema na slici 7.10 prikazuje podelu nanosa u vodotoku, koja je dvojaka: po načinu kretanja se nanos deli na vučeni i suspendovani, a po ulozi u formiranju rečnog korita na koritoformirajući i tranzitni nanos.



Slika 7.10: Podela rečnog nanosa [5]

Koritoformirajući nanos je deo ukupnog nanosa vodotoka koji se nalazi u razmeni sa materijalom koji čini rečno dno, učestvujući u morfološkim procesima. Čine ga vučeni nanos i krupnije frakcije suspendovanog nanosa, odnosno čestice koje se mogu naći u uzorcima nanosa iz dna. Udeo koritoformirajućih frakcija u ukupnom nanosu vodotoka može se identifikovati upoređenjem granulometrijskih krivih nanosa iz dna i suspendovanog nanosa (slika 7.17). Na slici 7.17 se vidi da koritoformirajuće frakcije čine šljunak i pesak (krupan, srednji i nešto prašinastog peska).

Tranzitni nanos čine najsitnije frakcije suspendovanog nanosa, koje prolaze bez interakcije sa rečnim koritom (prema granulometrijskoj krivoj na slici 7.17 to su frakcije prašine i gline, kao i mali procenat prašinastog peska). Međutim, u akumulacijama ili lukama tranzitni nanos dobija ulogu u formiranju rečnog dna jer se istaložava zbog smanjenih brzina toka.

Prisustvo, količina i granulometrijski sastav koritoformirajućih frakcija suspendovanog nanosa zavise od turbulentnih i hidrauličkih karakteristika toka, sastava dna rečnog korita i njihovih promena duž toka i u vremenu, dok količina tranzitnog nanosa najviše zavisi od uslova u slivu.

Stroga podela između tranzitnih i koritoformirajućih frakcija suspendovanog nanosa ne može se uspostaviti, jer se odnosi menjaju kako na istom profilu u vremenu (zbog promene protoka) i duž toka zbog promena turbulentnih karakteristika (posebno u zonama pod usporom objekata ili pritoka, gde frakcije koje su u neusporenoj zoni reke imale karakter tranzitnih postaju koritoformirajuće).

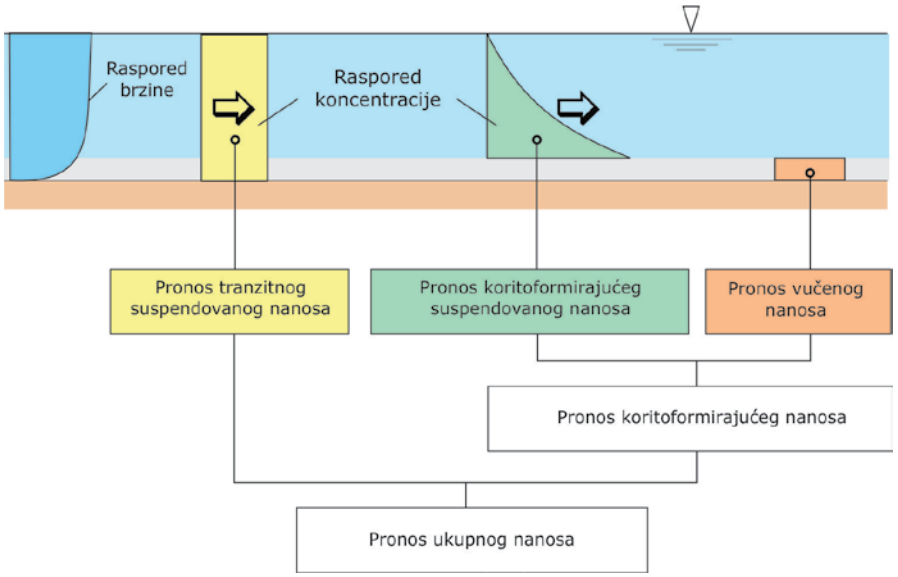
7.5 Koncentracija i pronos rečnog nanosa

Koncentracija nanosa je učešće čvrste faze u mešavini vode i nanosa. Može se izraziti kao zapreminska koncentracija (C = količniku zapremine suspendovanog nanosa i zapremine uzorka mešavine vode i nanosa) ili masena koncentracija (C_m):

$$C_m = \rho_s \cdot C \tag{7-7}$$

gde je: ρ_s - gustina nanosa (kg/m^3), C - zapreminska koncentracija (-) i C_m - masena koncentracija (kg/m^3).

Čestice različitih krupnoća imaju i različite profile koncentracije (slika 7.12). Fine čestice tranzitnog nanosa su raspoređene vrlo ujednačeno u vertikali i u poprečnom profilu rečnog toka. Zbog male krupnoće, fine čestice se sporo talože i u mirnoj vodi. Usled turbulencije koja nadjačava silu gravitacije, ove čestice su dispergovane u celom proticajnom profilu. S druge strane, na krupne čestice koritoformirajućeg nanosa znatno utiče gravitaciona sila. Sile turbulencije su u stanju da krupne čestice podignu samo do male visine iznad dna. Zbog toga je koncentracija krupnih čestica blizu površine daleko manja nego u blizini rečnog dna. U slučaju prirodnih tokova, sekundarna strujanja dovode do mešanja, naročito u krivinama, tako da su rasporedi krupnoće nanosa po vertikali manje pravilni.



Slika 7.11: Komponente pronosa rečnog nanosa [26]

Pronos nanosa (P) je količina nanosa koja prolazi kroz posmatrani poprečni presek vodotoka u jedinici vremena. Pronos nanosa se dobija kao proizvod koncentracije nanosa i protoka:

$$P = Q \cdot C_m \tag{7-8}$$

gde je: Q – protok (m^3/s) i C_m - masena koncentracija (kg/m^3).

Pronos nanosa se najčešće izražava u kg/s, dok se sumarni pronos nanosa za duži vremenski period izražava u tonama.

7.6 Merenja i analize nanosa

Fizička svojstva nanosa se određuju iz uzoraka nanosa koji se zahvataju iz rečnog toka i sa dna. Najčešće se uzorkovanje vrši radi određivanja granulometrijskog sastava nanosa. Granulometrijski sastav nanosa se, osim za rečno dno, određuje i za komponente nanosa u pokretu (najčešće samo suspendovanog nanosa).

Kako se krupnoća rečnog nanosa menja u prostoru (duž toka i po dubini korita) i u vremenu (sa promenom protoka u reci) za analizu njegovih karakteristika je potrebno zahvatiti što više uzoraka.

Dva različita vida kretanja nanosa - vučenjem po dnu i u obliku suspenzije imaju i različite instrumente i načine merenja na vodotoku.

Najčešće se posebno meri ili računa pronos vučenog i pronos suspendovanog nanosa. Ukupni pronos nanosa se dobija sabiranjem pronosa suspendovanog i pronosa vučenog nanosa ili se računa primenom empirijskih jednačina za proračun ukupnog koritoformirajućeg nanosa.

Merenja pronosa nanosa se vrše da bi se pripremili podaci za: (a) prognozu morfoloških promena u vodotoku pod uticajem regulacionih radova i (b) prognozu zasipanja akumulacija.

Prognoza morfoloških promena u vodotoku (zasipanje i erozija) zasniva se na formuli za pronos nanosa koja je primenljiva za posmatrani vodotok. U ovom slučaju se merenja vrše da bi se izabrala pogodna formula. Potom se formula koristi za prognozu pronosa nanosa, na osnovu hidrauličkih uslova u vodotoku. U ovom slučaju postoje dva osnovna zahteva:

(a) Merenja se moraju vršiti u uslovima mirnog, jednolikog tečenja, jer su formule razvijene za takve uslove i

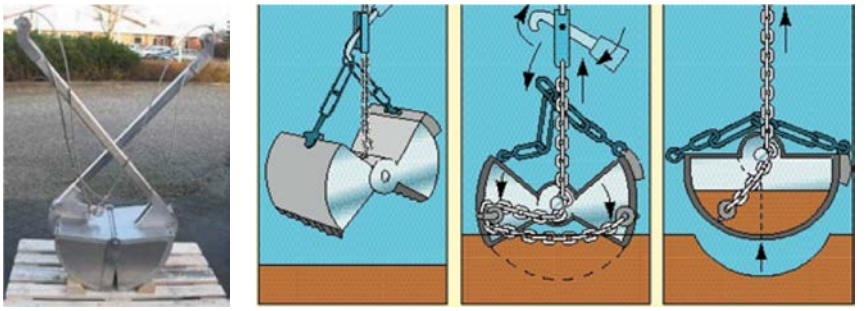
(b) Kako se formulama računa samo pronos koritoformirajućeg nanosa, potrebno je napraviti razliku između pronosa koritoformirajućeg i tranzitnog nanosa.

7.6.1 Nanos iz dna

7.6.1.1 Zahvatanje uzoraka nanosa iz dna

Zahvatanje uzoraka iz dna vodotoka se obavlja različitim mehaničkim uređajima. Najčešće se mehaničkom grabilicom zahvata **"poremećeni"** uzorak nanosa (slika 7.12). Čest problem kod mehaničkih grabilica je što se najsitnije čestice ispiraju i gube prilikom izvlačenja.

Ukoliko je potrebno da se, pored granulometrijskog sastava, odrede zapreminska masa po dubini nanosnih naslaga ili hemijski sastav istaloženog nanosa, iz dna se uzima **"neporemećeni"** uzorak određene dužine (slike 7.13 i 7.14). Kada se uzorak izvadi iz vode, moguće ga je podeliti na više delova i njih posebno analizirati. Ovakva istraživanja se češće rade na jezerima i akumulacijama, gde se u dnu nalaze glina, prašina ili pesak, nego na rekama.



Slika 7.12: Uređaj za zahvatanje poremećenog uzorka nanosa sa dna (Izvor: hydrologicalusa.com)

Slika 7.13: Uređaj za zahvatanje neporemećenog uzorka nanosa (Izvor: kwipped.com)

Slika 7.14: Neporemećeni uzorak nanosa sa dna akumulacije HE Đerdap 1 kod Donjeg Milanovca (Izvor: IJČ)

7.6.1.2 Određivanje krupnoće nanosa

Način određivanja krupnoće nanosa zavisi njegovih dimenzija. Kada je prečnik veći od 64 mm (vrlo krupan šljunak, obluci) određuje se krupnoća pojedinačnih komada. Krupnoća se definiše kao nominalni prečnik, i to indirektno, uranjanjem komada u vodu i merenjem njegove zapremine.

Kod materijala iz kategorije peska i šljunka krupnoća se određuje prosejavanjem. Prosejavanje se vrši na seriji sita od pletene žice, sa kvadratnim otvorima standardnih dimenzija (slika 7.15). Sita se postavljaju jedno na drugo, a na dnu se nalazi sud za prihvatanje najsitnijih čestica, koje su prošle kroz sva sita (slika 7.16). Krupniji (šljunčani) nanos se prosejava u vlažnom stanju na mestu zahvatanja, a sitniji (peščani) se suši pre prosejavanja.

Slika 7.15: Pojedinačna sita (Izvor: testsieves.org)

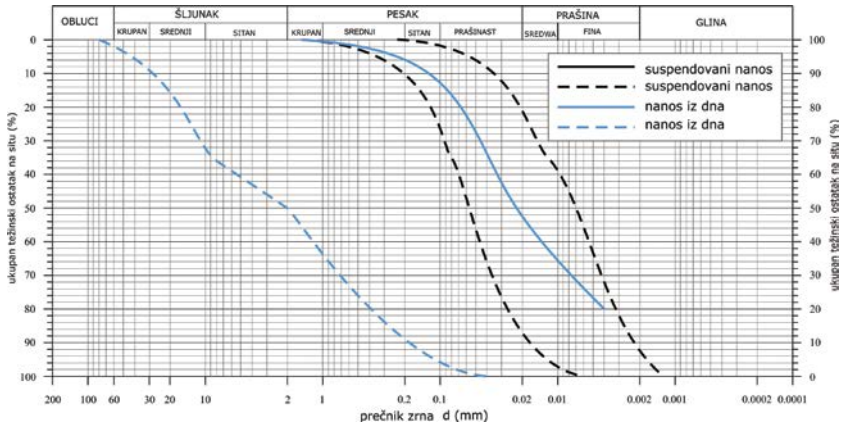
Slika 7.16: Kolona sita (Izvor: impact-test.co.uk)

Krupnoća vrlo sitnih čestica nanosa iz kategorije sitnog peska i prašine (krupnoće ispod 0,062 mm) se određuje indirektno, merenjem brzine slobodnog padanja čestica u mirnoj vodi ili **hidrauličke krupnoće** (W). Ovaj parametar ima dimenziju brzine (najčešće cm/s).

Hidraulička krupnoća se određuje metodama kumulativnog i frakcionog taloženja, u posebno opremljenim sedimentološkim laboratorijama. Poznat je frakciometar originalne konstrukcije (V. Antić, Institut "Jaroslav Černi"), na kome se direktno mere brzine padanja čestica na putu dužine 170 mm (visina stuba tečnosti). Čestice dospevaju u kasetice, koje se pomeraju u određenim, unapred odabranim vremenskim intervalima.

Nakon merenja se hidraulička krupnoća (W) preračunava u prečnik zrna (d) kako bi se odredila kriva granulometrijskog sastava celokupnog uzorka nanosa. Iako se preračunavanjem čini određena greška, za to se koriste empirijske zavisnosti W-d koje su uspostavili različiti istraživači (poznate su krive Sarkisian-a, 1958).

Rezultati analize krupnoće zrna se najčešće prikazuju u vidu granulometrijske krive (slika 7.17). Ova kriva ima oblik latiničnog slova S, a prikazuje procentualno učešće zrna čiji je prečnik veći od prečnika koji se nalazi na apscisi (ukupan težinski ostatak na situ).



Slika 7.17: Anvelope granulometrijskih krivih nanosa iz dna i suspendovanog nanosa reke Dunav (Izvor: IJČ)

Sa granulometrijske krive se mogu odrediti karakteristični prečnici kao što su d_{50}, d_{90}, d_{10}. Srednji prečnik nanosa (d_{sr}) se računa podelom uzorka na klasne intervale (frakcije), određivanjem odgovarajućih prečnika (d_i) i zastupljenosti (Δp_i), uz primenu sledeće formule:

$$d_{sr} = \frac{\sum d_i \cdot \Delta p_i}{100} \tag{7-9}$$

7.6.2 Suspendovani nanos

Osnovne karakteristike suspendovanog nanosa, koje su sastavni deo mnogih formula pomoću kojih se rešavaju inženjerski problemi, su njegova koncentracija i granulometrijski sastav.

Da bi se oni odredili potrebno je organizovati terenska merenja, dopremiti uzorke u laboratoriju i tu izvršiti odgovarajuće laboratorijske analize. Terenska merenja su dugotrajna i skupa, tako da ih treba pažljivo isplanirati da bi se mogle obezbediti reprezentativne vrednosti parametara nanosa.

7.6.2.1 Zahvatanje uzoraka suspendovanog nanosa

Zahvatanje uzoraka vode sa suspendovanim nanosom se obavlja pomoću specijalnih hvatača (**batometara**). Ono se vrši postepenim, kontrolisanim punjenjem boce određene zapremine, koja predstavlja osnovni deo hvatača.

Za zahvatanje uzoraka vode može se koristiti **hvatač integrator** (zahvata se jedan uzorak iz vertikale, pomeranjem od površine do dna rečnog toka) ili **hvatač za lokalno uzimanje uzoraka**, kojim se zahvata voda u više tačaka svake merne vertikale odnosno u svim tačkama u kojima se meri brzina vode [85].

Reprezentativnost uzorka suspendovanog nanosa obezbeđuje se zadovoljenjem kriterijuma matematske statistike, vodeći računa o hidrauličkim zakonima kretanja čestica u turbulentnom toku. Stoga se pri zahvatanju uzoraka suspenzije mora poštovati nekoliko osnovnih principa [5]:

- Zapremina uzorka mora biti dovoljna za tačno merenje težina čvrste faze. Ona je obrnuto srazmerna kvalitetu laboratorijskih uslova, pribora i usluga;
- Broj ponavljanja kod instrumenata sa trenutnim punjenjem, odnosno vreme zahvatanja suspenzije iz tačke kod instrumenata sa dužim punjenjem, moraju, kao i kod brzina, biti dovoljni za određivanje stvarne srednje vrednosti merene karakteristike;
- Brzina ulaženja suspenzije u hvatač treba da je jednaka brzini toka u mernoj tački;
- Batometri u kojima se uzorak direktno akumulira u mernoj tački, moraju da imaju hidraulički oblik, fiksiran položaj i ovazdušenje, a vreme držanja batometra u tački treba da približno odgovara vremenu punjenja;
- U batometrima u kojima se uzorak od merne tačke do mesta izlivanja transportuje kroz crevo na izvesnu daljinu i visinu (vakuumni batometri) treba stvoriti takve uslove proticanja na tom putu, da nema mogućnosti segregacije ili lokalnog zadržavanja nanosa.

U svetu je do danas razvijen veliki broj hvatača, od kojih su mnogi u standardnoj upotrebi. U nastavku su dati neki primeri.

Vakuum batometar konstruisan u Institutu “Jaroslav Černi” 1964. godine (VB) je hvatač kojim se uzimaju uzorci u više tačaka po vertikali. Razvijen je za velike ravničarske reke i može se koritiiti za brzine toka do 3 m/s i dubine do 50 m. Osnovne komponente instrumenta su vakuum pumpa, pretkomora za pražnjenje creva i komora zapremine 40 l (slika 7.18). Vakuum batometar hvata i najsitnije čestice nanosa, tako da se njime određuje ukupni pronos suspendovanog nanosa odnosno suma koritoformirajućeg i tranzitnog suspendovanog nanosa.

U SAD se, zavisno od dubina vodotoka, primenjuju različiti hvatači koje je razvila nacionalna geološka agencija. Hvatači-integratori nose oznaku US D i imaju veću zapreminu boce i težinu od hvatača lokalnih uzoraka (oznaka US P). Na slici 7.19 prikazan je US D-96, u koji se zahvata uzorak zapremine 3 l, a može se koristiti do dubine do 30 m.

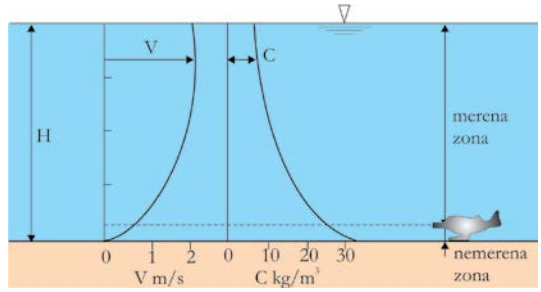
U Evropi se za direktno merenje vremenski osrednjenog pronosa suspendovanog nanosa koristi “Delftska boca” (Delft Bottle). Ovo je protočni hvatač u kome se čestice nanosa zadržavaju usled usporavanja vode (slika 7.20). Problem je što se najsitnije čestice nanosa ne zadržavaju u komori, tako da se pri merenju javlja određena greška.

Nijedan instrument ne može da meri koncentraciju suspendovanog nanosa pri samom dnu ni na samoj površini (slika 7.21). Visina vodenog stuba u kojoj se nanos ne može meriti zavisi od tipa instrumenta. Kako je u zoni blizu dna transport nanosa najintenzivniji, svako merenje ima određenu grešku. Na primer, vakuum batometar ne meri koncentraciju u zoni 20 cm od površine vode i 20 cm od dna. U slučaju sitnog nanosa i velikih dubina vodotoka, ova greška nije posebno značajna.

Slika 7.18: Vakuum batometar (Izvor: IJČ)

Slika 7.19: Hvatač US D-96 (Izvor: water.usgs.gov)

Slika 7.20: Delftska boca (Izvor: en.eijkelkamp.com)



Slika 7.21: Aproksimacija pri merenju suspendovanog nanosa [26]

7.6.2.2 Laboratorijska analiza suspendovanog nanosa

U laboratoriji se sadržaj nanosa u uzorku vode određuje metodom **isparavanja** ili metodom **filtriranja**. U prvoj metodi se sačeka da se nanos u uzorku vode istaloži, a zatim se čvrsta faza suši u sušnici i meri na analitičkoj vagi. U metodi filtriranja se za razdvajanje čvrste i tečne faze koriste papirni filtri – voda prolazi kroz filtar, a nanos se na njemu zadržava. Filtri se suše u sušnici i mere na analitičkoj vagi, tako da se masa nanosa dobija kao razlika mase filtera pre i posle merenja. Rezultati u velikoj meri zavise od korektnog sprovođenja postupka pri analizi, s obzirom na veliku higroskopiju filtera.

Postupak određivanja hidrauličke krupnoće odnosno granulometrijskog sastava suspendovanog nanosa je opisan u poglavlju 7.6.1.2.

7.6.2.3 Terensko merenje pronosa suspendovanog nanosa

Pronos suspendovanog nanosa se određuje računskim putem, na osnovu podataka o izmerenim koncentracijama suspendovanog nanosa i brzinama vode. Na isti način se određuje pronos vučenog nanosa, ako su vršena odgovarajuća merenja u prirodi.

Merenje pronosa suspendovanog nanosa je zasnovano na istom principu kao i merenje protoka vode (merenje u više vertikala i više tačaka u svakoj vertikali). Pri merenju se u tačkama u kojima se mere brzine vode, zahvataju i uzorci suspendovanog nanosa specijalnim hvatačima. Zato se ovaj tip merenja naziva **kompletno merenje vode i nanosa**. Da bi se merenjem obezbedile reprezentativne vrednosti merenih parametara, rad na terenu pri svakom kompletnom merenju treba da obuhvati: (a) geodetsko snimanje hidrometrijskog profila; (b) merenje brzine vode u više vertikala; (c) zahvatanje uzoraka vode i nanosa u svakoj mernoj vertikali i (d) zahvatanje uzoraka materijala iz dna rečnog korita.

Pronos nanosa se određuje obradom podataka dobijenih merenjima (slika 7.22). Najpre se definišu brzine vode (V), koncentracija suspendovanog nanosa (C_s) i specifični pronos nanosa ($C_s \cdot V$) u svakoj mernoj tački. Zatim se integracijom određuju srednje vrednosti brzine vode i koncentracije suspendovanog nanosa ($\overline{V}$ i $\overline{C}$) u vertikali u kojoj je dubina vode h (m), kao i jedinični protoci vode q ($m^3/s \cdot m$) i nanosa q_s (kg/s·m). Jedinični pronos suspendovanog nanosa je:

$$q_s = \overline{V} \cdot h \cdot \overline{C} \tag{7-10}$$

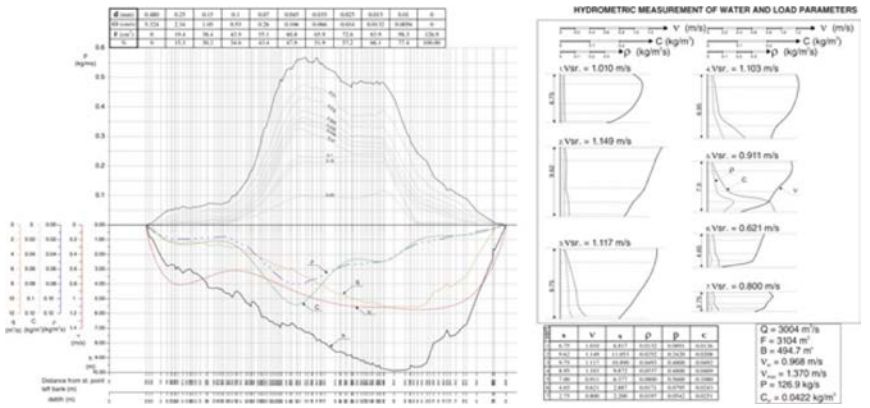
Integracijom po širini rečnog toka određuju se srednje profilske vrednosti površine i dubine toka, brzine vode, koncentracije suspendovanog nanosa, protok vode Q (m^3/s) i suspendovanog nanosa P (kg/s). Ukupni pronos nanosa je:

$$P = \int_0^B q_s(y)dy \tag{7-11}$$

Srednja profilska koncentracija:

$$C_s = \frac{Q}{P} \tag{7-12}$$

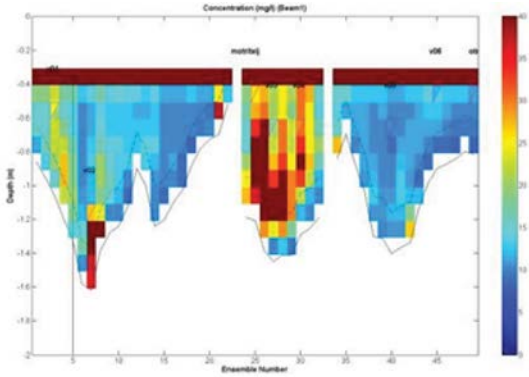
Primer: Institut „Jaroslav Černi“ već više od 40 godina meri suspendovani nanos na mernim profilima na sektorima Dunava, Save i Tise u akumulaciji HE Đerdap 1. Za merenja se primenjuje posebna metodologija koja podrazumeva: (a) merenje brzine vode u 7 do 10 vertikala, u po pet tačaka svake merne vertikale, u trajanju od najmanje 5 minuta, (b) zahvatanje vakuum batometrom 25 uzoraka vode i nanosa (u po 5 tačaka na 5 mernih vertikala), svaki uzorak od oko 40 l i (c) zahvatanje uzoraka materijala iz dna rečnog korita u svakoj mernoj vertikali, u težini oko 5 kg. Evidentno je da primena ovakve metodologije podrazumeva znatne troškove radi angažovanja plovila i radne snage na samom merenju, transportu i laboratorijskoj analizi uzoraka. Stoga se ovakva merenja organizuju samo 1 do 2 puta godišnje.



Slika 7.22: Rezultati kompletnog merenja vode i nanosa na Dunavu, po metodologiji Instituta „Jaroslav Černi“

U novije vreme se pokušava merenje pronosa suspendovanog nanosa pomoću **ADCP uređaja**, postavljenog na plovilu, dnu ili obali vodotoka. Iako ADCP nije uređaj kojim se može direktno meriti koncentracija nanosa, on se može koristiti kao surogat, tako što se koristi poseban softver koji preračunava broj povratnih signala u koncentraciju nanosa. Na slici 7.23 prikazan je rezultat merenja suspendovanog nanosa na Savi, koje je izvršila hrvatska hidrometeorološka služba [85].

Da bi se merenja pomoću ADCP uređaja verifikovala, neophodno je izvršiti seriju simultanih merenja pronosa suspendovanog nanosa ADCP uređajem i nekom od pomenutih konvencionalnih metoda, na istom profilu i u istim hidrološko-hidrauličkim uslovima. Međutim, može se očekivati da će se u budućnosti dalje razvijati softveri koji na osnovu signala ADCP uređaja određuju koncentraciju nanosa, jer je takvo merenje znatno jednostavnije i jeftinije od konvencionalnog zahvatanja uzoraka i obrade merenja.

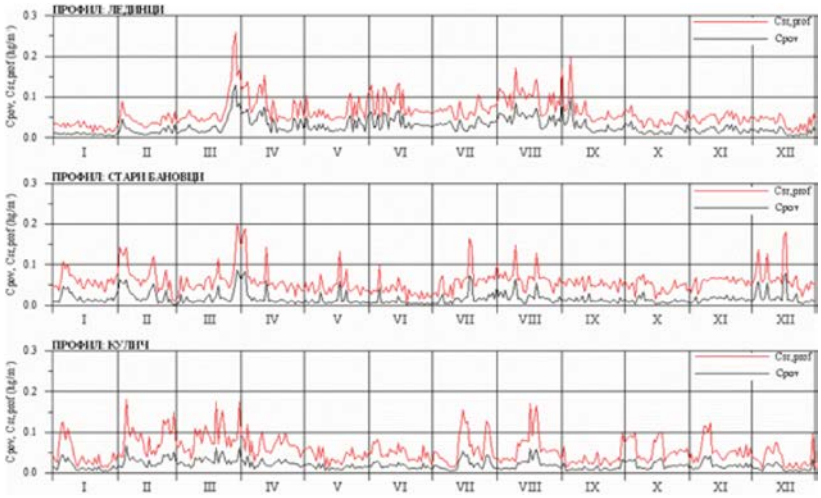


Slika 7.23: Poprečni profil koncentracije suspendovanog nanosa (mg/l) meren pomoću ADCP uređaja na Savi kod Podsuseda [85]

7.6.2.4 Monitoring suspendovanog nanosa

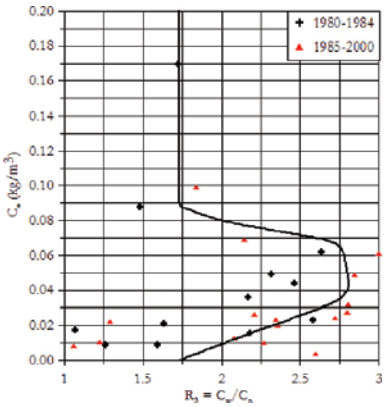
U okviru monitoringa režima nanosa, hidrometeorološke službe i istraživački instituti najčešće mere samo količine suspendovanog nanosa. Konstatovano je, naime, da vučeni nanos u ukupnom pronosu nanosa učestvuje sa 5 do 10% tako da se on na većini reka ne meri.

Monitoring se sastoji u zahvatanju površinskih uzoraka vode (najčešće samo u profilima hidroloških stanica ili u mernim profilima za praćenje bilansa nanosa na vodotoku) i to jednom dnevno (slika 7.24). Broj uzorkovanja može biti veći u talasima velikih voda. Uzorci se zahvataju u određenoj (referentnoj) tački, koja se najčešće nalazi na površini vode, a iz njih se u laboratoriji određuje površinska koncentracija nanosa C_{pov}.



Slika 7.24: Površinske i srednje profilske koncentracije suspendovanog nanosa (kg/m^3) na Dunavu (Izvor: IJČ)

Osnovni zadatak periodičnih kompletnih merenja parametara vode i nanosa je da se definiše korelaciona veza između površinske koncentracije suspendovanog nanosa u određenoj tački mernog profila i srednje profilske koncentracije suspendovanog nanosa. Naime, dnevne vrednosti površinske koncentracije (C_{pov}) suspendovanog nanosa se preračunavaju u srednje profilske vrednosti ($C_{sr,prof}$) pomoću redukcione krive, formirane na bazi kompletnih merenja (slika 7.25).



Slika 7.25: Redukciona kriva za profil Kulič na Dunavu(Izvor: IJČ)

Oblik redukcione krive zavisi od mesta zahvatanja uzorka u poprečnom profilu.

Kvalitet podataka monitoringa bitno zavisi od toga da li je referentna tačka iz koje se uzimaju svakodnevni uzorci dobro izabrana, kao i od zapremine uzorka (od 1 do 10 l, zavisno od veličine reke). Preporučuje se da se uzorak ne uzima sa površine, nego sa dubine 0,35-0,4 h, jer se tako dobija približno srednja koncentracija u toj vertikali.

Pronos suspendovanog nanosa se računa iz:

$$P = Q \cdot C_{pov} \cdot R = Q \cdot C_{sr,prof} \qquad (7\text{-}13)$$

gde je: P – pronos nanosa (kg/s), Q - protok vode (m^3/s), C_{pov} - dnevna vrednost površinske koncentracije suspendovanog nanosa (kg/m^3), R – koeficijent redukcije (-), $C_{sr,prof}$ - srednje profilska vrednost koncentracije suspendovanog nanosa (kg/m^3).

U novije vreme za monitoring suspendovanog nanosa počinju da se koriste različite surogat tehnike (akustične, laserske, optičke). Na primer, monitoring se može bazirati na praćenju mutnoće vode pomoću **fotoelektričnog turbidimetra**, koji meri smanjenje svetlosti pri prolazu kroz vodu sa nanosom. Da bi ovakav monitoring bio moguć, potrebno je najpre uspostaviti zavisnost između koncentracije suspendovanog nanosa (određene zahvatanjem uzoraka vode i nanosa u istoj tački reke) i fotoelektričnog efekta. Ova alternativna metoda može koristiti samo na rekama gde je krupnoća suspendovanog nanosa relativno ujednačena i koncentracija mala.

7.6.3 Vučeni nanos

Za merenje pronosa (transporta) vučenog nanosa koriste se: (a) mehanički hvatači, (b) razne vrste obeleživača i (c) akustični senzori.

Mehanički hvatači su pokretni uređaji koji se prilikom merenja spuštaju na rečno dno. Na prednjoj strani imaju otvor kroz koji u hvatač ulazi voda i nanos. Posle određenog perioda uređaj se vadi iz reke, a zahvaćeni uzorak meri. Vreme zahvatanja zavisi od količine nanosa i kreće se od 0,5 do 15 minuta. Nanos se u jednoj vertikali meri više puta.

Do sada je u svetu razvijeno preko 20 tipova hvatača. Po karakteristikama se razlikuju hvatači namenjeni rekama sa krupnim nanosom (slika 7.26 levo) i hvatači namenjeni rekama sa peščanim nanosom (kutija sa čvrstim zidovima – slika 7.26 desno).

Slika 7.26: Mehanički hvatači za merenje pronosa vučenog nanosa (Izvor:water.usgs.gov)

Tačnost rezultata merenja pronosa vučenog nanosa pomoću mehaničkog hvatača je ograničena, zbog brojnih problema. Najpre, hvatač je glomazan i težak za rukovanje (slika 7.27), mali u odnosu na vodotok, tako da se merenje protoka vrši "tačkasto" i samo u određenim vremenskim presecima. Prilikom postavljanja hvatača na dno nije siguran njegov pravilan položaj u odnosu na kretanje nanosa, što je posebno značajno ako se nanos kreće u vidu dina. Takođe, pri vađenju hvatača iz vode dolazi do ispiranja zahvaćenog materijala.

Iskustva pokazuju da je primena klasične metode merenja pomoću hvatača veoma skupa i naporna, dok rezultati često nisu zadovoljavajući. Zbog toga se stalno ispituju nove metode merenja vučenog nanosa, posebno na brdsko-planinskim tokovima jer je na njima najznačajniji vučeni nanos, dok je kretanje nanosa u suspenziji sekundarni fenomen.

Merenja kretanja nanosa pomoću **obeleživača (trasera)** su dosta komplikovana i relativno retko se koriste i to samo na vodotocima koji transportuju krupan nanos. U ovoj metodi se zrna nanosa obeležavaju fluorescentnom bojom (slika 7.28), vraćaju u rečni tok i prate, kako bi se stekao uvid u dinamiku njihovog kretanja.

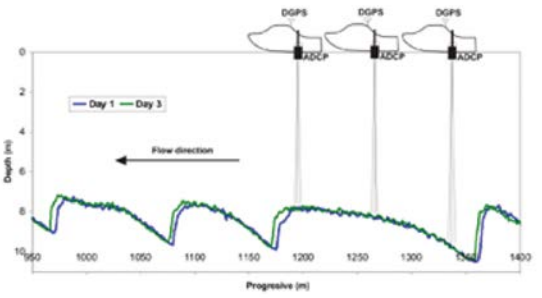
Slika 7.27: Hvatač vučenog nanosa sa dizalicom [85]

Slika 7.28: Zrna vučenog nanosa obeležena bojom (Izvor: wsl.ch)

Akustične metode indirektno mere transport vučenog nanosa. Akustični senzor postavljen na dnu ili kosini vodotoka (najčešće na nekom objektu) beleži buku koju pravi nanos koji se kreće (slika 7.29). Istovremeno, nanos se hvata u posebnu mrežastu kutiju i meri njegova težina. Između izmerene buke i merenih količina nanosa se uspostavlja korelacija, koja se zatim koristi za procenu pronosa tokom perioda velikih voda, kada se vučeni nanos masovno kreće.

Akustična metoda se može primeniti za merenje kretanja dina, koje su osnovni vid kretanja vučenog nanosa u rekama sa peščanim nanosom. Najčešće se na dno postave 2 električne sonde. Na sondama se registruje izdizanje i spuštanje dna u toku vremena, a pronos vučenog nanosa se određuje na osnovu prosečne brzina kretanja posmatrane dine i njenih dimenzija.

Slika 7.29: Akustični senzor postavljen na bok bujične pregrade i mrežasti hvatač u sredini profila (Izvor: wsl.ch)

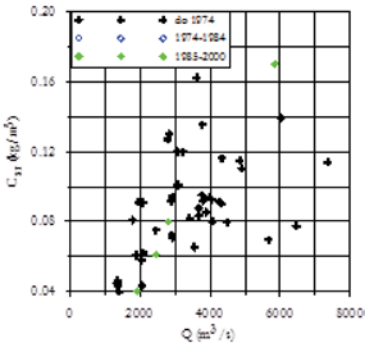


Slika 7.30: Merenje kretanja dina ADCP uređajima [85]

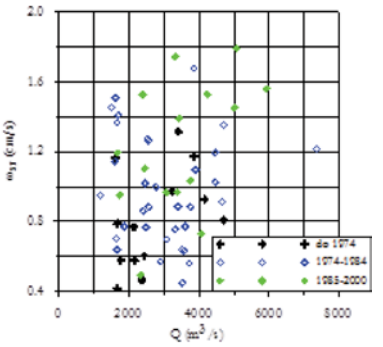
Podaci o kretanju vučenog nanosa u vidu dina se mogu dobiti i uzastopnim snimanjima rečnog dna po unapred definisanoj ruti (slika 7.30).

7.6.4 Analiza podataka merenja nanosa

Svrha merenja je uspostavljanje korelacione zavisnosti između parametara režima nanosa (koncentracije C, hidrauličke krupnoće W, pronosa P) i protoka vode (Q) u određenom profilu reke. Na slikama 7.31 i 7.32 su prikazane takve zavisnosti za jedan sektor reke Dunav. Vidi se da se parametri nanosa pri istom protoku veoma razlikuju, jer zavise od uslova u slivu i na uzvodnim sektorima vodotoka.

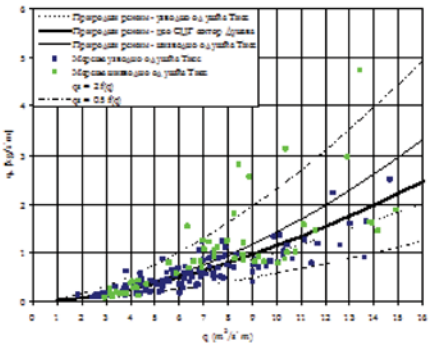


Slika 7.31: Zavisnost koncentracije suspendovanog nanosa od protoka vode [5]



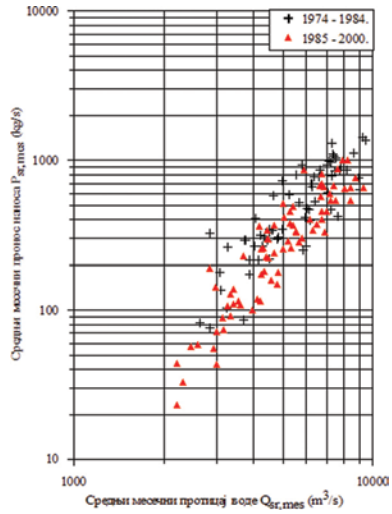
Slika 7.32: Zavisnost hidrauličke krupnoće suspendovanog nanosa od protoka vode [5]

Merenja se mogu iskoristiti za formiranje zavisnosti jediničnog pronosa suspendovanog nanosa q_s (ili koncentracije C) od parametara rečnog toka, kao što su q (protok po jedinici širine), V (brzina toka), J (pad toka), τ (vučna sila) itd. Na slici 7.33 prikazana je zavisnost jediničnog pronosa suspendovanog nanosa od jediničnog protoka vode $q_s(q)$ za reku Dunav.



Slika 7.33: Zavisnost jediničnog pronosa suspendovanog nanosa od jed. protoka vode [5]

Za uspostavljanje kvalitetne korelacione veze između protoka vode i pronosa nanosa potrebno je obezbediti svakodnevna merenja koncentracije tokom nekoliko godina. Najkvalitetnije su korelacije između srednjih mesečnih vrednosti protoka vode i pronosa nanosa (slika 7.34). One se mogu koristiti za proračun krive trajanja pronosa nanosa na osnovu krivih trajanja protoka vode.



Slika 7.34: Korelacija srednjeg mesečnog protoka vode i srednjeg mesečnog pronosa nanosa [5]

7.7 Pokretanje rečnog nanosa

7.7.1 Parametri koji utiču na kretanje rečnog nanosa

Fenomen kretanja rečnog nanosa je povezan sa mnogim promenljivim veličinama. U literaturi se navode sledeći najznačajniji parametri od kojih zavisi pronos nanosa kroz poprečni profil vodotoka [5]:

- **Svojstva vode i nanosa**: gustina vode (ρ), gustina nanosa (ρ_s), viskoznost vode (najčešće se izražava pomoću kinematičkog koeficijenta viskoznosti);
- **Krupnoća i granulometrijski sastav nanosa**: srednja krupnoća nanosa u dnu (d_{sr}), karakteristični prečnik nanosa u dnu (d), srednja hidraulička krupnoća nanosa (W_{sr});
- **Parametri oblika rečnog korita**: površina poprečnog preseka rečnog toka (A), širina vodnog ogledala (B), srednja dubina toka (h);
- **Hidrauličke karakteristike rečnog toka**: protok vode (Q ili q), srednja brzina toka (V) i hidraulički gradijent (J), kao i neke izvedene veličine, kao što su tangencijalni napon (τ) i brzina trenja (V_*).

Ovi parametri i različiti bezdimenzioni brojevi u kojima se oni kombinuju čine osnov za definisanje uslova pokretanja nanosa sa rečnog dna i funkcija kojima se opisuje transport nanosa u rečnom koritu.

Opšta dimenzionalna zavisnost je:

$$f(\rho,V,h,\rho_s\text{-}\rho,d,g,q)=0 \tag{7-14}$$

odakle se transformacijom parametara dobija izraz:

$$f\left(\frac{g\cdot\Delta\cdot d}{V^2},\frac{h}{d},\frac{q}{V\cdot h}\right)=0 \tag{7-15}$$

a zatim:

$$f\left(\frac{d\cdot V_*}{\nu},\frac{\tau}{g\cdot(\rho_s-\rho)\cdot d},\frac{q}{\sqrt{g\cdot\Delta\cdot d^3}}\right)=0 \tag{7-16}$$

odnosno:

$$f(Re_*,\Theta,\Phi)=0 \tag{7-17}$$

gde je: Re_* - Rejnoldsov broj zrna

$$Re_* = \frac{d \cdot V_*}{\nu} \tag{7-18}$$

Θ - bezdimenzioni tangencijalni napon, parametar pokretanja nanosa (Šildsov broj),

Φ - parametar transporta ili intenzitet transporta.

Oblik funkcije se određuje laboratorijskim ekperimentima i prezentira u vidu korelacionih dijagrama.

7.7.2 Početak kretanja vučenog nanosa

Čestica nanosa počinje da se kreće tek u trenutku kada hidraulički parametri u blizini dna (brzina ili tangencijalni napon) dostignu određenu vrednost, koja se naziva kritičnom (oznaka kr). Poznavanje početka kretanja nanosa je vrlo značajno, jer ove veličine učestvuju u skoro svim obrascima za proračun transportne sposobnosti rečnog korita u pogledu nanosa.

7.7.2.1 Kritična brzina

Da bi se odredila **kritična brzina toka** pri kojoj dolazi do pokretanja nanosa, u laboratorijskim uslovima se utvrđuje empirijska veza dva bezdimenziona broja:

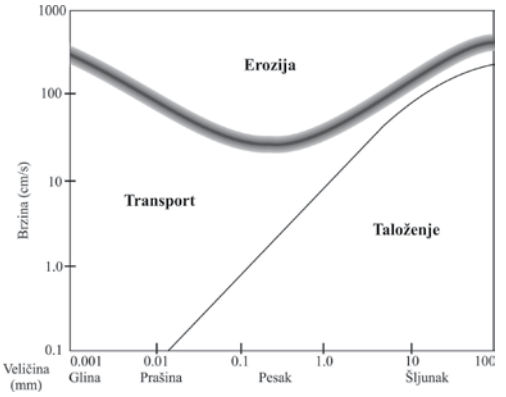
$$\frac{V}{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot d}} = f\left(\frac{h}{d}\right) \tag{7-19}$$

Jedan od najpoznatijih izraza za kritičnu brzinu toka ($V_{kr,}$ m/s) definisao je **Gončarov**:

$$V_{kr} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_s - \rho)}{3{,}5 \cdot \rho}} \cdot \sqrt{g \cdot d_{sr}} \cdot \log\left(\frac{8{,}8 \cdot h}{d_{90}}\right) \tag{7-20}$$

gde je: h - srednja dubina (m), d_{sr} - srednji prečnik zrna nanosa (m), d_{90} - prečnik zrna nanosa zastupljenosti 90% (m), ρ - gustina vode (kg/m^3), ρ_s - gustina nanosa (kg/m^3).

Često se koriste empirijski dijagrami koji povezuju brzinu toka i krupnoću nanosa. Slika 7.35 prikazuje poznate krive Hjulstroma (1935), od kojih gornja definiše pokretanje nanosa, a donja taloženje nanosa. Iako je Hjulstromov dijagram veoma jednostavan, u današnje vreme se više koristi drugi način definisanja uslova pokretanja nanosa, preko kritičnog tangencijalnog napona.



Slika 7.35: Dijagram Hjulstroma za određivanje kritične brzine u vodi dubine h=1 m (Izvor: alevelrivers.weebly.com)

U praksi se za preliminarne procene koriste podaci o maksimalnoj dozvoljenoj brzini neobloženih kanala, dobijeni merenjima (tabela 7.4).

Tabela 7.4: Maksimalne dozvoljene brzine u pravolinijskim neobloženim kanalima [26]

Vrsta materijala	V_{max} (m/s)	Vrsta materijala	V_{max} (m/s)
Fini pesak	0,75	Aluvijalna prašina	1,50
Peščana glina	0,75	Škriljci	1,80
Prašinasta glina	0,90	Sitan šljunak	1,50
Aluvijalna prašina	1,00	Krupan šljunak	1,80
Tvrda glina	1,00	Vrlo krupan šljunak	1,70

U literaturi se mogu naći podaci o kritičnoj brzini za pokretanje nanosa, koji se mogu koristiti za projektovanje regulacionih građevina (tabela 7.5). Kritične brzine u tabeli 7.5 su date za dubinu vode od 1m, a mogu se preračunati pomoću tabele 7.6 u odgovarajuće vrednosti za dubine vode 0,3 do 3 m.

Tabela 7.5: Kritična brzina osrednjena po vertikali u vodi dubine 1m [76]

Materijal	Otvor na situ D (mm)	Kritična brzina (m/s)
veoma krupan šljunak	200-150	3,9-3,3
	150-100	3,3-2,7
krupan šljunak	100-75	2,7-2,4
	75-50	2,4-1,9
	50-25	1,9-1,4
	25-15	1,4-1,2
	15-10	1,2-1,0
	10-5	1,0-0,8
šljunak	5-2	0,8-0,6
krupan pesak	2-0,5	0,6-0,4
fini pesak	0,5-0,1	0,4-0,25
vrlo fini pesak	0,1-0,02	0,25-0,20
prašina	0,02-0,002	0,20-0,15

Tabela 7.6: Korekcioni faktor [76]

Dubina (m)	0,3	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
K1	0,8	0,9	1,0	1,1	1,15	1,20	1,25

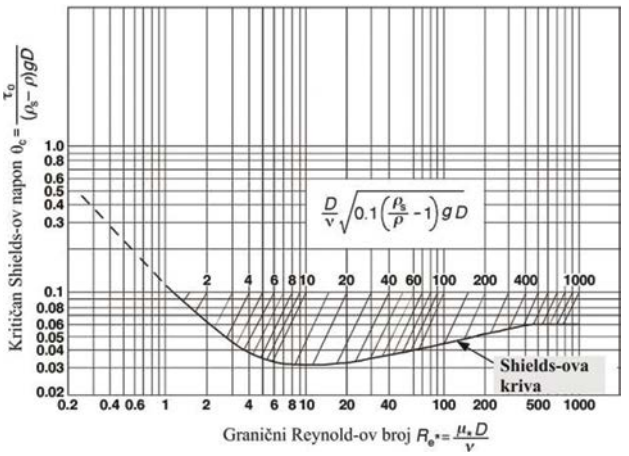
7.7.2.2 Kritični tangencijalni napon

Šilds (Shields, 1936) je merenjima definisao vezu između Šildsovog broja (bezdimenzioni tangencijalni napon Θ) i Rejnoldsovog broja zrna nanosa (Re*), koja je prikazana na slici 7.36.

$$\Theta = \frac{\tau}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d} = \frac{V_*^2}{g \cdot \Delta \cdot d} = f(Re_*) \qquad (7\text{-}21)$$

gde je: τ – tangencijalni napon (KN/m^2), ρ - gustina vode (kg/m^3), ρ_s - gustina nanosa (kg/m^3), d - prečnik zrna nanosa (m), $\Delta=(\rho_s-\rho)/\rho$, V_* - brzina trenja (m/s) i g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2).

Oblast mirovanja nanosa ($\tau_{kr}/\tau > 1$) se nalazi ispod krive, dok je oblast kretanja nanosa ($\tau_{kr}/\tau < 1$) iznad nje. Dijagram se može direktno koristiti ako se za poznati prečnik zrna nanosa (d_{sr}) sračunaju Θ i Re_*.



Slika 7.36: Šildsov dijagram (Izvor: rpitt.eng.ua.edu)

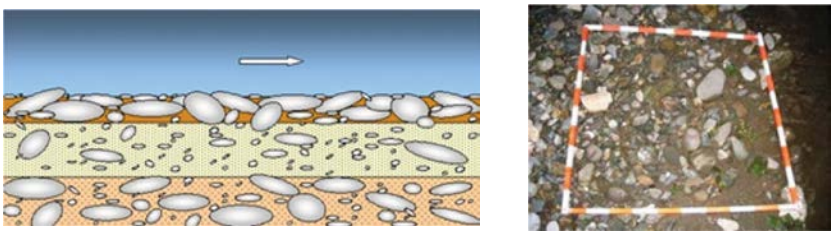
Radi lakšeg korišćenja u kompjuterskim proračunima, Šildsov dijagram je transformisan u funkcije u kojima se umesto Re_* pojavljuju druge promenljive. Na primer, ako se kao nova promenljiva uvede bezdimenzioni prečnik zrna D* [42]:

$$D_* = d \cdot \left(\frac{g \cdot \Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} \tag{7-22}$$

Šildsova zavisnost se može iskazati u sledećem obliku:

$$\Theta_{kr} = \begin{cases} 0{,}24 \cdot D_*^{-1} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & 1 < D_* \le 4 \\ 0{,}14 \cdot D_*^{-0{,}64} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & 4 < D_* \le 10 \\ 0{,}04 \cdot D_*^{-0{,}1} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & 10 < D_* \le 20 \\ 0{,}013 \cdot D_*^{029} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & 20 < D_* \le 150 \\ 0{,}056 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & D_* > 150 \end{cases} \tag{7-23}$$

Napominje se da je Šilds istraživao pokretanje pojedinačnih zrna na ravnom dnu. Međutim, dno prirodnih vodotoka nije ravno, niti je granulometrijski sastav nanosa uniforman. Neuniformnost granulometrije bitno utiče na pokretanje zrna nanosa, jer su sitnije frakcije pokrivene krupnijim, tako da je njihova pokretljivost manja nego da su direktno izložene uticaju rečnog toka. Kako se sitnije frakcije lakše odnose, nastaje segregacija nanosa po krupnoći, tako da na površini rečnog korita ostaju najkrupnije frakcije. Ova pojava se naziva **armiranje** ili **samopopločavanje dna** (slika 7.37).



Slika 7.37: Samopopločavanje rečnog dna (Izvor: IJČ)

7.7.3 Početak kretanja nanosa u suspenziji

Sa povećanjem brzine toka i tangencijalnog napona povećava se broj zrna nanosa koje se kreću u skokovima. Dužina skokova se povećava sve dok se oblak čestica ne podigne u vodeni stub i počne da kreće u suspenziji.

Gruba procena trenutka u kome vučeni nanos počinje da se **kreće u suspenziji** može se dati na osnovu krupnoće zrna. Brojni autori su u laboratorijskim uslovima ispitivali ovaj fenomen i definisali kriterijume koji uvek imaju oblik [26]:

$$\frac{V_*}{W} = \text{const} \tag{7-24}$$

gde je: $V_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ brzina trenja ili smičuća brzina (m/s), W – brzina tonjenja čestice nanosa (m/s).
Na osnovu različitih istraživanja definisan je približni kriterijum:

$$\frac{V_*}{W} > 0{,}2 - 2 \tag{7-25}$$

7.8 Proračun pronosa nanosa

U praksi postoji širok dijapazon zadataka u kojima je potrebno odrediti pronos nanosa u prirodnim vodotocima sa pokretnim dnom (aluvijalnim vodotocima). To su, na primer, analize i proračuni zasipanja akumulacija, erozije dna nizvodno od brane, lokalne erozije ili zasipanja oko regulacionih građevina, efekata eksploatacije peska i šljunka, uticaja morfoloških promena na nivoe voda itd.

Proračun pronosa nanosa predstavlja jednu od najznačajnijih i najosetljivijih komponenti rečne hidraulike. Naime, različite formule kojima se definiše transportni kapacitet za nanos daju različite rezultate, a velike margine greške dovode u pitanje svrhu razvoja složenijih modela proračuna kojima se rešavaju važni inženjerski zadaci.

Postoji veliki broj formula za proračun pronosa vučenog nanosa, suspendovanog nanosa i ukupnog koritoformirajućeg nanosa, koje su razvijene posle pojave prve formule Du Boys-a (1879). Sve te, potpuno različite i uglavnom empirijske formule, nastale su uspostavljanjem korelacija između parametara kojima se opisuju svojstva fluida i nanosa, njihovo kretanje i interakcije. I pored velikih napora koji su do sada uloženi u istraživanje parametara koji utiču na izuzetno složen proces transporta nanosa, univerzalno primenljiva rešenja nisu nađena i istraživanja se nastavljaju [5].

7.8.1 Pronos vučenog nanosa

Za proračun pronosa vučenog nanosa se koriste brojne empirijske formule, koje su izvedene skoro isključivo na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja. Poznato je, naime, da su merenja kretanja vučenog nanosa u prirodnim vodotocima opterećena velikim greškama, a praktično nemoguća u periodima velikih voda, kada se jedino i pokreću značajnije količine nanosa. Zbog toga jedinu podlogu za razvoj formula predstavljaju podaci laboratorijskih merenja (vršenih u kontrolisanim, približno jednolikim uslovima tečenja), kao i određene racionalne pretpostavke o režimu kretanja nanosa.

U raspoloživoj svetskoj literaturi navodi se veliki broj formula za proračun pronosa vučenog nanosa [5]. Najpoznatije formule definisali su Majer-Peter-Miler (Meyer-Peter-Muller, 1948), Engelund-Hansen (1967), Bagnold (1980), Šoklič (Schoklitch, 1962), Jang (Yang, 1984), Ajnštajn (Einstein, 1942), Ajnštajn-Braun (Einstein-Brown, 1950), Van Rajn (van Rijn, 1984), Jalin (Yalin, 1963), Karaušev (Karaushev, 1969), Šamov (Shamov, 1954), Gončarov (Goncharov, 1962), ali postoje i mnoge druge. Izuzetno velika pažnja se već decenijama posvećuje upoređenju rezultata proračuna primenom različitih formula i rezultata merenja vučenog nanosa u prirodi. Osnovno je naravno da se formule koriste za uslove slične onima za koje su razvijene.

Najpoznatija je formula **Majer-Peter-Milera** (skraćeno MPM), koja se uobičajeno koristi za proračun transporta nanosa na vodotocima sa šljunčanim dnom. Bazira se na kritičnom tangencijalnom naponu (τ_{kr}, KN/m^2):

$$\frac{\tau_{kr}}{(\rho_s-\rho)\cdot g\cdot d}\approx \text{const}\approx 0{,}047 \tag{7-26}$$

gde je: ρ_s – gustina nanosa = 2650 (kg/m^3), ρ - gustina vode (kg/m^3), g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2), d – srednji prečnik zrna nanosa (m).

Autori su merenjima uspostavili sledeću linearnu zavisnost između intenziteta transporta Φ i Šildsovog broja Θ [26]:

$$\Theta = 0{,}047 + 0{,}25\cdot\Phi^{2/3} \tag{7-27}$$

gde je 0,047 odsečak na ordinati Θ, a=0,25 nagib prave.

Ukoliko se na vodotoku izvrši dovoljan broj merenja, moguće je uspostaviti sličnu linearnu zavisnost, koja je prilagođena tom vodotoku.

Gornja jednačina se transformiše u izraz za jedinični pronos vučenog nanosa q_v (kg/ms):

$$q_v = C_{mp}\cdot(\tau_0-\tau_{kr})^{3/2} \tag{7-28}$$

gde je: τ_{kr} – kritični tangencijalni napon (kN/m^2), τ_0 – tangencijalni napon koji se računa iz izraza:

$$\tau_0=\left(\frac{n_r}{n}\right)^{3/2}\cdot\left(\frac{Q_s}{Q}\right)\cdot\rho\cdot g\cdot h\cdot J \tag{7-29}$$

gde je: n_r – koeficijent rapavosti koji zavisi od krupnih zrna nanosa ($n_r=\frac{d_{90}^{1/6}}{26}$), n – koeficijent rapavosti po Maningu (m$^{-1/3}$ s), Q_s – deo protoka koji utiče na transport nanosa (m^3/s), h – srednja dubina ili hidraulički radijus (m), J – pad linije nivoa (-). Konstanta C_{mp} se računa iz:

$$C_{mp}=\frac{a^{-3/2}}{g\cdot\sqrt{\rho}}\cdot\left(\frac{\rho_s}{\rho_s-\rho}\right) \tag{7-30}$$

Obrazac **Gončarova** je namenjen vodotocima sa sitnim peščanim nanosom, krupnoće ispod 1,5 mm, a zasniva se na kritičnoj brzini pri kojoj dolazi do kretanja nanosa. Jedinični pronos vučenog nanosa (q_v, kg/ms) se računa na osnovu sledeće jednačine:

$$q_v=\rho_s\cdot 2\cdot(1+\alpha)\cdot d\cdot V_{kr}\cdot\left(\frac{V}{V_{kr}}-1\right)\cdot\left[\left(\frac{V}{V_{kr}}\right)^3-1\right] \tag{7-31}$$

gde koeficijent α zavisi od krupnoće nanosa:

d50 (mm)	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5
"α"	7,30	3,25	2,09	1,67	1,42	1,25	1,15	1,02

Ukupan pronos vučenog nanosa kroz poprečni presek (G_v kg/s) je:

$$G_v = q_v \cdot B_v \tag{7-32}$$

gde je B_v - širina pojasa u kome se kreće vučeni nanos (m), a zavisi od hidrološko-hidrauličkih uslova. Približno je jednaka širini vodnog ogledala za malu vodu.

7.8.2 Pronos suspendovanog nanosa

Za razliku od čisto empirijskog pristupa u slučaju vučenog nanosa, proučavanje suspendovanog nanosa se bazira na teoriji turbulencije i pouzdanim merenjima u laboratoriji i u prirodi.

Ukoliko se usvoji da raspored brzine ima oblik logaritamske funkcije, raspored koncentracije suspendovanog nanosa C(z) se može odrediti na osnovu jednačine **Rausa** (Rouse)[26]:

$$\frac{C(z)}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a}\right)^{Z^*} \tag{7-33}$$

gde je: z – rastojanje od dna, a – referentno rastojanje od dna (približno), h – dubina vode, Z^* - bezdimenzioni eksponent koji se naziva Rausov ili suspenzioni broj i računa iz:

$$Z^* = \frac{W}{\beta \cdot \kappa \cdot V_*} \tag{7-34}$$

gde je: W – brzina tonjenja čestice nanosa, β – koeficijent (može se usvojiti da je $\beta \approx 1$), κ – fon Karmanova konstanta (κ=0,2 do 0,4), V_* – brzina trenja.

Na osnovu Rausovog broja se može proceniti vid kretanja nanosa u rečnom koritu [26]. Ako je $Z^* > 2,5$ ukupan nanos se kreće u obliku vučenog nanosa; ako je $1,2 < Z^* < 2,5$ oko 50% nanosa se kreće u suspenziji; ako je $0,8 < Z^* < 1,2$ ukupan nanos se kreće u suspenziji; ako je $Z^* < 0,8$ postoji samo tranzitni nanos, odnosno nema interakcije nanosa u kretanju sa rečnim dnom.

Jedinični pronos suspendovanog nanosa (q_s, kg/ms) može se dobiti integracijom po dubini toka (slika 7.39):

$$q_s = \int_a^H C(z) \cdot V(z) \cdot dz \tag{7-35}$$

gde je: C – koncentracija nanosa (kg/m^3), V – brzina (m/s) i z – rastojanje od dna (m).

Ukupni pronos nanosa dobija se integracijom jediničnog pronosa po širini korita.

7.8.3 Pronos ukupnog koritoformirajućeg nanosa

U novije vreme koriste se i formule za proračun "ukupnog nanosa" odnosno ukupne količine nanosa koji učestvuje u morfološkim procesima (koritoformirajući nanos, q_t). U ovu grupu spadaju poznate formule Engelund-Hansen, Akers-Vajt (Ackers-White), Jang (Yang), Braunli (Brownlie), van Rajn (van Rijn) i druge [5]. One su u potpunosti empirijskog karaktera,

iako se u njihovom razvoju polazi od određenih teorijskih postavki. Pronos suspendovanog nanosa dobija se integracijom koncentracije po vertikali, s tim što se koncentracija pri dnu rečnog toka određuje na bazi pronosa vučenog nanosa.

U nastavku su, kao primer, date uprošćene verzije formula van Rajna (1984) za određivanje jediničnog pronosa vučenog nanosa (q_b) i jediničnog pronosa suspendovanog nanosa (q_s). Ove formule su razvijene za proračun pronosa nanosa u rekama sa peščanim dnom [42].

$$\frac{q_b}{V\cdot h}=0{,}005\cdot\left(\frac{V-V_{kr}}{(\Delta\cdot g\cdot d_{50})^{0,5}}\right)^{2,4}\cdot\left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{1,2}$$

$$\frac{q_s}{V\cdot h}=0{,}012\cdot\left(\frac{V-V_{kr}}{(\Delta\cdot g\cdot d_{50})^{0,5}}\right)^{2,4}\cdot\left(\frac{d_{50}}{h}\right)\cdot D_*^{0,6}$$

$$D_*=d_{50}\cdot\left((\Delta-1)\cdot\frac{g}{\nu^2}\right)^{1/3} \qquad (7\text{-}36)$$

$$V_{kr}=0{,}19\cdot(d_{50})^{0,1}\cdot\log\left(\frac{12\cdot h}{3\cdot d_{90}}\right) \qquad 0{,}1\text{mm}<d_{50}<0{,}5\text{mm}$$

$$V_{kr}=8{,}5\cdot(d_{50})^{0,6}\cdot\log\left(\frac{12\cdot h}{3\cdot d_{90}}\right) \qquad 0{,}5\text{mm}<d_{50}<2\text{mm}$$

gde je: q_s - pronos suspendovanog nanosa ($m^3/m\cdot s$), q_b – pronos vučenog nanosa ($m^3/m\cdot s$), V – srednja brzina toka (m/s), h - srednja dubina toka (m), d_{50}, d_{90} – karakteristična zrna nanosa iz dna (m), V_{kr} - kritična brzina za pokretanje nanosa (m/s).

Postoji i više formula za proračun ukupnog nanosa, koje su razvijene primenom regresione analize na velike baze podataka (Karim-Kennedy, Yang i druge).

7.8.4 Preporuke

Kada se javi potreba da se praktično primeni neka formula, istraživač/projektant se suočava sa brojnim teorijama o transportu nanosa, od kojih je svaku pojedinačno razvio kompetentan autor, ali često na bazi ograničenog obima podataka. Postavlja se pitanje: Koja formula za pronos nanosa bi najviše odgovarala konkretnim uslovima na posmatranom sektoru vodotoka?

U literaturi se može naći prikaz veoma velikog broja formula za određivanje pronosa nanosa, kao i uporedne analize formula. U većini uporednih analiza ispitivana je tačnost formula na osnovu određene baze podataka laboratorijskih i terenskih merenja, uglavnom bez davanja detaljnih informacija o izmerenim hidrauličkim parametrima i karakteristikama nanosa. Rezultati uporednih analiza pokazuju da, zavisno od uslova, formule mogu dati izuzetno velike razlike u odnosu na merene vrednosti (u nekim slučajevima je odnos 10 puta). Nijednoj od postojećih formula se ne može dati prednost i tvrditi da je univerzalno primenljiva.

U program HEC-RAS ugrađene su formule Ackers-White, Engelund-Hansen, Laursen-Copeland, Meyer-Peter-Muller, Toffaleti, Yang, Wilcock, koje se standardno koriste u USA i Evropi [74]. Korisniku programa se prepušta da odluči koju će izabrati, u skladu sa raspoloživim podacima (tabela 7.7) i tipom vodotoka.

Tabela 7.7: Pregled potrebnih ulaznih podataka za proračun pronosa nanosa [5]

Autor	Godina	Karakteristike			Zavisno promenljiva
		nanosa	fluida	toka	
Ackers-White	1973	d_{35}, ρ_s	ρ, ν	V, H, u∗ (ili J)	q_t
Einstein-Brown	1950	d_{50}, ρ_s	ρ, ν	V∗$_b$ (ili R_b i J)	q_b
Engelund-Fredsoe	1976	d_{50}, ρ_s	ρ, ν	V, H, J	q_s i q_b
Engelund-Hansen	1976	d_{50}, ρ_s	ρ	V, V∗ (ili R i J)	q_t
Inglis-Lacey	1968	d_{50}, ρ_s	ρ, ν	V, H	q_t
Karim-Kennedy	1981	d_{50}, ρ_s	ρ, ν	H, q, J	q_t
Meyer-Peter-Muller	1948	d_{90}, d_{si}, ρ_s, p_i	ρ, ν	V, V∗$_b$ (ili Rb i J)	q_b
van Rijn	1984	d_{16},d_{50},d_{84},d_{90}, ρ_s	ρ, ν	V, H, J	q_s i q_b
Schoklitch		d_{si}, p_i	-	q, J	q_b
Toffaleti	1969	d_{65}, ρ_s , d_{si}, p_i	ρ, ν, T	V, H, J	q_s i q_b
Yang	1976	d_{50}, ρ_s	ρ, ν	V, H, J	q_t

Najbolji način za izbor odgovarajuće formule je sledeći:

(a) odrediti koja se vrsta podataka može obezbediti terenskim merenjima u okviru predviđenog vremena, sredstava i drugih ograničenja;

(b) pregledati sve raspoložive formule i izabrati formule sa nezavisnim promenljivima koje se mogu odrediti u okviru planiranog obima terenskih merenja;

(c) uporediti stanje na terenu i ograničenja razmatranih formula. Ako se u datim uslovima može koristiti više formula, posle njihove primene treba uporediti rezultate;

(d) posle upoređenja sa terenskim merenjima pronosa nanosa odlučiti koja formula daje najbolje rezultate i nju primeniti za proračun pronosa nanosa u drugačijim uslovima, kada nije moguće izvršiti merenja.

S druge strane, ukoliko se pokaže da ni jedna od postojećih formula za proračun pronosa nanosa ne daje zadovoljavajuće rezultate, treba iskoristiti rezultate merenja i formirati zavisnost q_s (ili C_s) od jednog od sledećih parametara: q, V, J, H, τ, V.τ (ili V.J). Krivu koja ima najmanje rasipanje tačaka, bez sistematskog odstupanja od merenih vrednosti, treba usvojiti kao merodavnu za determinisanje pronosa nanosa na posmatranoj deonici vodotoka.

Primer: Opisana metodologija primenjena je za definisanje jednodimenzionalne relacije za proračun transporta nanosa na Dunavu kroz Srbiju, na sektoru uzvodno od akumulacije HE Đerdap 1 i u zoni koja je pod usporom hidroelektrane [5]. To je omogućio veliki fond podataka kompletnih merenja suspendovanog nanosa, koje je Institut "Jaroslav Černi" vršio na Dunavu tokom više od 40 godina uz primenu iste tehnologije merenja i obrade podataka.

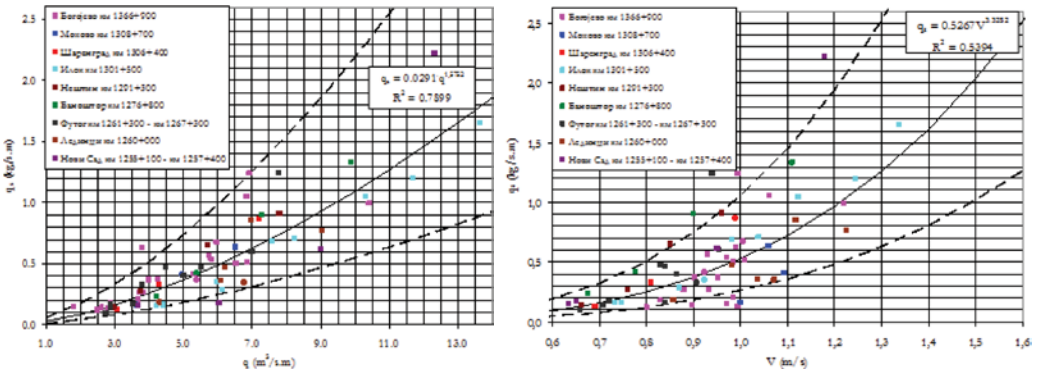
Najpre su formirane jednodimenzionalne regresione zavisnosti jediničnog pronosa nanosa q_s (kg/s·m) od jediničnog protoka vode q (m^3/s·m) na osnovu podataka merenja u prirodnom režimu vodotoka po sektorima Dunava (broj podataka mora biti veći od 15 da bi se niz koristio za statističku analizu) i za prirodni režim na celom srpskom sektoru Dunava, uz korišćenje celog niza od 262 podatka. U tabeli 7.8 prikazani su parametri regresionih zavisnosti i procenat vrednosti koeficijenta $r = \frac{C_{rač}}{C_{mer}}$, koji ukazuje na kvalitet uspostavljenih zavisnosti. Konstatuje se da se u granicama 0,5 do 2 od merene vrednosti nalazi 91 do 98% sračunatih vrednosti.

Tabela 7.8: Parametri regresionih zavisnosti qs=f(q) za prirodni režim r. Dunav [5]

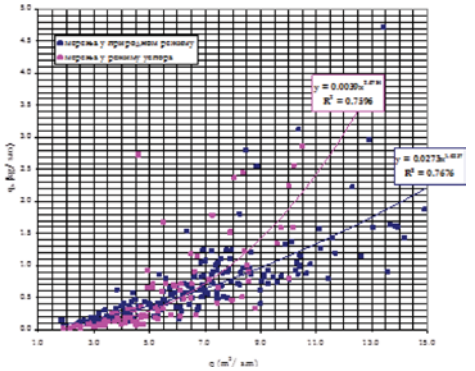
Sektor reke Dunav	$0,5 < \frac{C_{rač}}{C_{mer}} < 2$	$q_s = a \cdot q^b$			
		a	b	R^2	R
Uzvodno od Drave (km 1433-1382)	98,21	0,0347	1,4263	0,7252	0,8516
Od Drave do Novog Sada (km 1382-1255)	95,24	0,0291	1,5752	0,7899	0,8888
Uzvodno od Tise (km 1433-1215)	95,67	0,0328	1,4855	0,7753	0,8805
Od Tise do Save (km 1215-1170)	91,67	0,0393	1,5215	0,7248	0,8514
Od Save do Morave (km 1170-1105)	95,00	0,0119	2,0686	0,8470	0,9203
Nizvodno od Tise (km 1215-1086)	90,91	0,0225	1,8021	0,7744	0,8800
Prirodni režim (km 1433-1086)	94,41	0,0274	1,6237	0,7676	0,8763

Na isti način formirana je regresiona zavisnost q_s=f(V), koja uspostavlja vezu između jediničnog pronosa nanosa q_s (kg/s·m) i srednje profilske brzine vode V (m/s). Pokazatelji njenog kvaliteta su nešto lošiji (83 do 96% računskih vrednosti je u granicama 0,5 do 2 merene vrednosti). Obe regresione krive prikazane su na slici 7.38.

Međutim, na deonicama koje su pod uticajem uspora brane HE Đerdap 1 nije pogodno koristiti jednodimenzionalne zavisnosti jer se dobija da je u režimu uspora veći pronos suspendovanog nanosa nego u prirodnim uslovima (za isti protok) što nije logično (slika 7.39). Stoga se može zaključiti da ovakvoj analizi transporta nanosa treba pristupiti sa velikim oprezom, vodeći računa o prirodnim uslovima.



Slika 7.38: Regresione krive za proračun pronosa suspendovanog nanosa Dunava između ušća Drave i Novog Sada, sa intervalima poverenja [5]



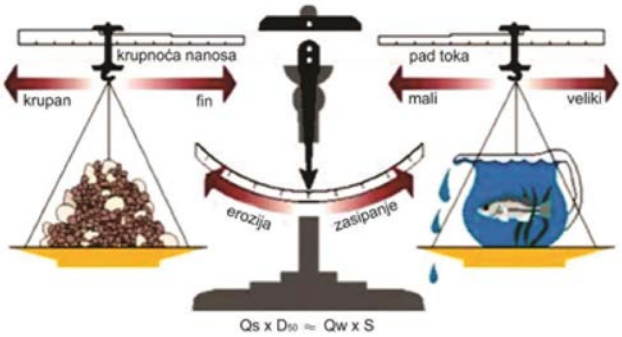
Slika 7.39: Zavisnosti q_s=f(q) u prirodnom režimu i režimu uspora [5]

8 DEFORMACIJA REČNOG KORITA

8.1 Dinamička ravnoteža aluvijalnog vodotoka

Morfološki oblici aluvijalnog rečnog korita zavise pre svega od uzajamne interakcije rečnog toka (tečna faza), rečnog nanosa u pokretu i pokretnog materijala u kome je formirano dno korita (čvrsta faza).

U prirodnom rečnom toku postoji veoma osetljiva dinamička ravnoteža između protoka, brzina i dubina vode, koncentracije i krupnoće nanosa, morfoloških karakteristika vodotoka (oblik i dimenzije poprečnog profila, pad dna, oblik trase) i hidrauličkih otpora. Slika 8.1 ilustruje dinamičku ravnotežu, koja prema Lejnu (Lane, 1955) postoji ako je proizvod transporta nanosa (Q_s) i krupnoće nanosa (D_{50}) približno jednak proizvodu pada rečnog dna (S) i protoka vode (Q_w). Ako se iz bilo kog razloga poremeti ravnoteža između režima vode i nanosa, dolazi do deformacije korita.



Slika 8.1: Koncept dinamičke ravnoteže aluvijalnog vodotoka (Izvor: www.nrcs.usda.gov)

Poremećaj dinamičke ravnoteže se može javiti u podužnom pravcu (na primer kada se izgradi brana ili pregrada, koja zaustavlja nanos) ili u poprečnom pravcu (uslovljava promenu poprečnih preseka, premeštanje matice i pomeranje rečnog korita u planu). Poremećaj se manifestuje kao zasipanje ili erozija korita.

8.2 Opšta deformacija rečnog korita

Opšta deformacija je posledica uzajamnog dejstva rečnog toka i rečnog korita, na dužoj rečnoj deonici, a nastaje usled izmene režima nanosa ili regulacionih radova.

Analiza opšte deformacije se sastoji u proceni promena koje će se desiti u vodotoku, usled nekog od sledećih razloga: (a) izgradnje brane, kada treba definisati veličinu erozije rečnog korita nizvodno od brane i promene usled zasipanja akumulacije; (b) izgradnje mostovskog suženja; (c) prolaska poplavnog talasa; (d) regulacije korita; (e) bagerovanja ili (f) promena režima nanosa u rečnom slivu. Međutim, u velikom broju slučajeva opšta deformacija nastaje usled kombinacije više uticaja, kao što su na primer uređenje sliva (promena režima nanosa), bagerovanje i regulacija korita.

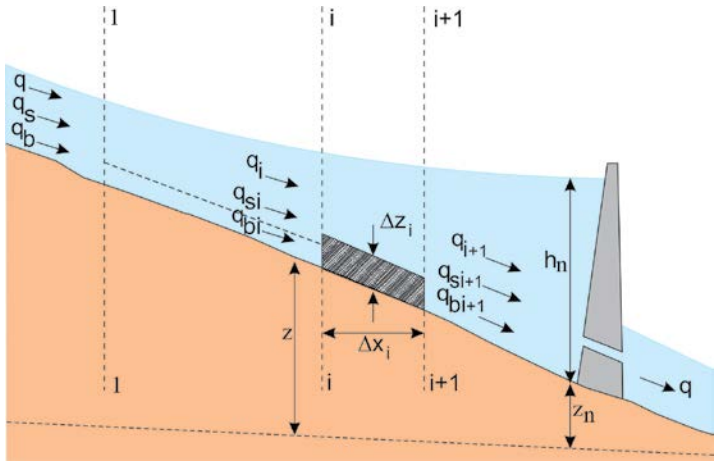
Za analizu opšte deformacije najčešće se koriste matematički modeli, u kojima se rešavaju osnovne jednačine koje opisuju kretanje mešavine vode i nanosa iznad pokretnog rečnog dna i pomoćne jednačine koje opisuju kretanje nanosa. Posle definisanja početnih i graničnih uslova, sistem jednačina se rešava primenom odgovarajućih numeričkih metoda i uz određene pretpostavke i uprošćenja.

Na deonici između uzvodnog profila (i) i nizvodnog profila (i+1) se, na osnovu razlike ulaza i izlaza nanosa u određenom periodu vremena, računa promena kote dna (Δz_i):

$$\Delta z_i = \frac{(q_{s,i} - q_{s,i+1}) + (q_{b,i} - q_{b,i+1})}{\Delta x_i \cdot g \cdot \rho_s} \Delta t \qquad (8\text{-}1)$$

gde je: q_s – pronos suspendovanog nanosa (kg/s), q_b – pronos vučenog nanosa (kg/s), Δx – dužina deonice (m), Δt – period vremena za koji se računa deformacija korita.

Ako su količine nanosa koje ulaze na rečnu deonicu veće od izlaznih, rečno korito se zasipa i deformacija ima pozitivan znak (**zasipanje** ili **agradacija**). U suprotnom se korito erodira i deformacija ima negativan znak (**erozija** ili **degradacija**). Šematizacija procesa opšte deformacije korita na potezu akumulacije je prikazana na slici 8.2.



Slika 8.2: Šema proračuna opšte deformacije korita - primer zasipanja akumulacije (Izvor: IJČ)

U novijoj svetskoj literaturi se može naći opis velikog broja matematičkih modela opšte deformacije (posebno za prognozu zasipanja akumulacija), koji se razlikuju po primenjenim formulama za proračun pronosa nanosa, pretpostavkama i empirijskim koeficijentima, numeričkim metodama itd.

8.2.1 Opšta deformacija rečnog korita na potezu akumulacije

Izgradnja brane sa akumulacijom izaziva poremećaj dinamičke ravnoteže u kojoj se nalazi prirodni vodotok, sa efektima koji se osećaju u prostoru akumulacije i propagiraju uzvodno i nizvodno od profila brane.

U prostoru same akumulacije i u zoni prostiranja uspora od brane odvija se proces taloženja nanosa. Naime, na ulazu u prostor akumulacije se rečni tok širi. Brzine vode i transportni kapacitet za nanos se sve više i više smanjuju duž akumulacije. Kako se gotovo sav nanos

koga je vodotok uneo u akumulaciju istaložava u njenom prostoru, akumulacija se može smatrati velikom taložnicom.

Položaj i oblik nanosnih naslaga u akumulaciji zavisiće od njene veličine, oblika i pada dna; izvora, količina i karakteristika nanosa; režima rada akumulacije; veličine, učestalosti i redosleda pojavljivanja poplavnih talasa; pojave konsolidacije naslaga; prisustva vegetacije; karakteristika ispusnih objekata na brani (vrste i položaja ispusta) i drugih karakteristika akumulacije.

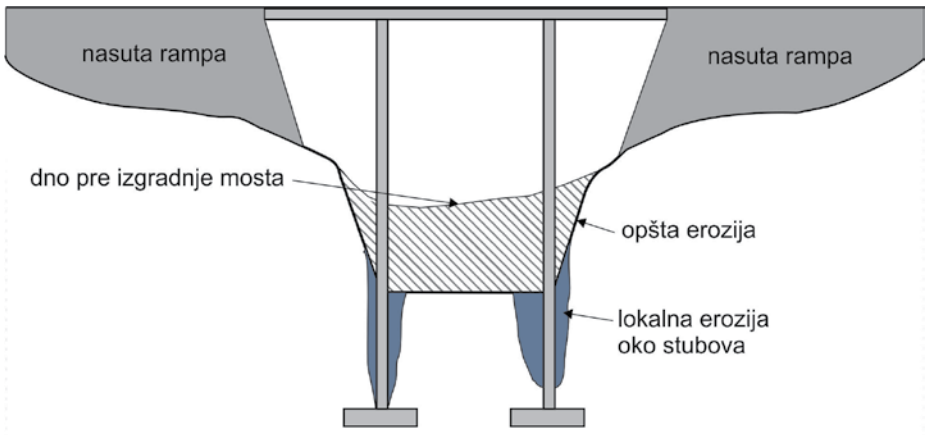
Više o procesima u akumulaciji i merama za kontrolu procesa zasipanja dato je u poglavlju 20.

8.2.2 Opšta deformacija rečnog korita u zoni mostovskog suženja

Opšta deformacija korita u zonama mostova javlja se kao posledica smanjenja proticajnog profila za velike vode. Izaziva je više faktora (slika 8.3): oslonci mosta koji ulaze u korito, stubovi koji blokiraju deo proticajnog profila i prilazne rampe koje zatvaraju korito za veliku vodu.

Smanjenje proticajnog profila dovodi do povećanja prosečne brzine i vučne sile toka u mostovskom suženju, tako da dolazi do erozije (više nanosa se pokreće nego što dolazi). Proces erozije se odvija sve dok se ne uspostavi novo ravnotežno stanje, kada je količina nanosa koji ulazi u deonicu izjednačena sa izlaznim količinama.

Ovaj vid opšte deformacije prolazi kroz ciklične promene – erozija je izražena tokom velikih voda, dok se korito zasipa u periodu malih voda.



Slika 8.3: Erozija rečnog korita u zoni mosta [26]

Prema američkim standardima, metod proračuna opšte erozije u zoni mosta zavisi od toga da li se ona odvija u uslovima „čiste vode“ (kada je u koritu vrlo krupan nanos ili je došlo do „samopopločavanja“ dna) ili postoji kretanje nanosa.

Opšta erozija korita u kome se odvija transport nanosa, što je najčešći slučaj u prirodnim vodotocima, računa se na osnovu sledećih jednačina **Laursen**-a (1960):

$$h_s = h_2 - h_o \qquad h_2 = h_1 \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{6/7} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{k_1} \tag{8-2}$$

gde je: h_s - produbljenje korita (m), h_o - srednja dubina toka pre izgradnje mosta (m), h_1 - srednja dubina toka u osnovnom koritu, uzvodno od suženja (m), h_2 - srednja dubina toka u suženju (m), Q_1 - protok u osnovnom koritu uzvodno od suženja (m^3/s), Q_2 - protok u suženju (m^3/s), B_1 - širina dna uzvodno od suženja (m), B_2 - širina dna u suženju, umanjena za širinu stubova (m).

Vrednost koeficijenta k_1 zavisi od odnosa brzine trenja na uzvodnom profilu V_* (m/s) i hidrauličke krupnoće nanosa u dnu W (m/s) - tabela 8.1.

Tabela 8.1: Vrednosti eksponenta k_1 [26]

V_*/W	k_1	Vid transporta nanosa
< 0,5	0,59	Uglavnom vučeni nanos
0,5 to 2,0	0,64	Nešto suspendovanog nanosa
> 2,0	0,69	Uglavnom suspendovani nanos

Pre korišćenja Lausen-ove jednačine za pokretno rečno dno, treba ispuniti uslov da srednja brzina u uzvodnom poprečnom profilu na čije tečenje konstrukcija ne utiče, bude veća od kritične brzine za pokretanje nanosa:

$$V_{kr} = 6{,}36 \cdot h_1^{1/6} \cdot d_{50}^{1/3} \tag{8-3}$$

gde je: V_{kr} - kritična brzina (m/s), h_1 - srednja dubina na uzvodnom poprečnom profilu, gde konstrukcija ne utiče na tok (m), d_{50} - karakteristično zrno sa granulometrijske krive (m).

Ukoliko taj uslov nije ispunjen, opšta erozija se računa po formuli Laursen-a za uslove čiste vode:

$$h_2 = 0{,}215 \cdot \left(\frac{Q^2}{d_{50}^{2/3} \cdot B_2^2} \right)^{\frac{3}{7}} \tag{8-4}$$

gde je: h_2 – srednja dubina u suženju, uključujući i eroziju (m), Q – proticaj u glavnom koritu (m^3/s), d_{50} – srednji prečnik zrna (m), B_2 - širina dna u suženju, umanjena za širinu stubova (m).

U ruskoj literaturi se može naći preporuka da se opšta erozija na dužoj deonici u zoni mosta procenjuje na bazi pretpostavke da će se u zoni mosta, nakon erozije, uspostaviti iste brzine koje su postojale u prirodnom koritu (tzv. **Postulat Beleljubskog**). Na osnovu ovog postulata definiše se vrednost koeficijenta opšte erozije, kao odnos brzina neposredno posle izgradnje mosta (V_2) i pre izgradnje mosta (V_1), odnosno odnos između preseka nakon erozije (F_2) i u postojećem stanju (F_1).

$$P = \frac{F_1}{F_2} = \frac{V_2}{V_1} \tag{8-5}$$

Ovom metodom dobija se maksimalna veličina opšte erozije, što je na strani sigurnosti. Međutim, treba naglasiti da je primenjeni metod originalno razvijen za vodotoke sa koritom u zemljanom ili peščanom materijalu, tako da u slučaju reka čije je korito formirano u krupnom materijalu daje veće vrednosti opšte erozije u zoni mosta od onih koje se u prirodi mogu pojaviti.

8.2.3 Drugi vidovi opšte erozije

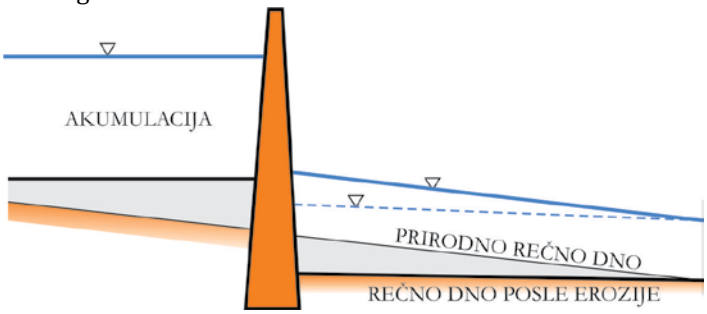
8.2.3.1 Erozija korita tokom prolaska poplavnih talasa

Erozija korita tokom prolaska poplavnih talasa je posledica značajnog povećanja protoka i brzina, usled kojih dolazi do pokretanja nanosa. Za analize ovakvih procesa potrebni su vrlo složeni hidraulički i psamološki modeli. Primeri erozije korita Likodre tokom prolaska poplavnog talasa u maju 2014. godine dati su na slici 8.4.

Slika 8.4: Erozija rečnog korita Likodre u Krupnju (Izvor: IJČ)

8.2.3.2 Erozija rečnog korita nizvodno od brane

Analiza erozije rečnog korita nizvodno od brane (slika 8.5) se radi za izabrani merodavni protok, koji je jednak protoku koji puni osnovno korito vodotoka ili maksimalnom protoku povratnog perioda 2 godine.



Slika 8.5: Šematski prikaz erozije rečnog korita nizvodno od brane [26]

Dubina erozije će zavisiti od sastava rečnog dna, jer se smatra da će pojava „samopopločavanja dna" zaustaviti njen dalji razvoj. „Samopopločavanje dna" se može javiti samo ako u granulometrijskom sastavu nanosa u dnu postoji bar 10% zrna koja se ne mogu pokrenuti pri merodavnom protoku (tzv. **armirajući sloj**).

Srednja krupnoća zrna nanosa u armirajućem sloju (d_a) se može odrediti iz uslova pokretanja po Majer-Peter-Mileru [26]:

$$d_a = \left(\frac{d_{90}^{1/6}}{26} \cdot \frac{1}{n} \right)^{3/2} \cdot \frac{h \cdot J}{0{,}047 \cdot \Delta} \qquad (8\text{-}6)$$

gde je: d_{90} – krupnoća zrna nanosa zastupljenosti 90% na granulometrijskoj krivoj nanosa (m), h – normalna dubina (m) pri merodavnom protoku (pretpostavlja se jednoliko tečenje), J – pad dna (-), n – koeficijent otpora, Δ - relativna gustina nanosa.

Veličina produbljenja dna (h_e) se računa iz:

$$h_e = h_a \cdot \left(\frac{1}{\Delta p} - 1 \right) \tag{8-7}$$

gde je: h_a – debljina armirajućeg sloja (m), približno $h_a = (1 \text{ do } 3)\, d_a$; Δp – zastupljenost prečnika zrna nanosa većih od srednje krupnoće u armirajućem sloju (d_a) na granulometrijskoj krivoj nanosa iz rečnog dna.

U slučaju da nema dovoljno krupnog materijala u rečnom dnu za „samopopločavanje dna", deformacija dna nizvodno od brane će prestati tek kada se uspostavi ravnotežni nagib dna. **Ravnotežni nagib dna** se takođe određuje na osnovu jednačine Majer-Peter-Milera:

$$J_d = \left(\frac{d_{90}^{1/6}}{26} \cdot \frac{1}{n} \right)^{-3/2} \cdot \frac{0{,}047 \cdot \Delta \cdot d_{50}}{h} \tag{8-8}$$

gde je: d_{50} – krupnoća zrna nanosa zastupljenosti 50% na granulometrijskoj krivoj nanosa (m).

8.2.3.3 Erozija izazvana regulacionim radovima

Erozija izazvana regulacionim radovima nastaje kao reakcija na veštački izazvane promene hidrauličkog režima vodotoka. Najveće promene izaziva prosecanje rečnih krivina, jer se dužina korita smanjuje i povećava pad dna. Ako se dužina rečne deonice skrati sa L_0 na L_1, uzdužni nagib se povećava [26]:

$$J_1 = J_0 \cdot \frac{L_0}{L_1} \tag{8-9}$$

gde je: J_0 – pad dna pre intervencije, pri kome su vladali ravnotežni uslovi, J_1 – pad dna posle prosecanja krivina, L_0 – dužina korita pre reguacije, L_1 – dužina korita posle regulacije.

Reka će težiti da ponovo uspostavi ravnotežni pad dna, pa će se zato javiti regresivna erozija (erozija u uzvodnom smeru). Produbljenje korita posle regresivne erozije (ΔZ) će iznositi:

$$\Delta Z = J_0 \cdot (L_0 - L_1) \tag{8-10}$$

8.2.3.4 Erozija izazvana bagerskim radovima

Bagerovanje utiče na opštu deformaciju rečnog korita, ako se u dužem periodu uklanjaju velike količine materijala iz rečnog korita. Naime, tada se rečno korito nizvodno od zone intenzivnog bagerovanja mora prilagoditi smanjenim količinama vučenog nanosa, što je moguće na dva načina: (a) Ukoliko obale nisu podložne eroziji, doći će do promene podužnog nagiba dna sa J_0 na J_1, uz produbljenje korita ΔZ; (b) Ukoliko su obale podložne eroziji, ravnotežni pad će se uspostaviti povećanjem dužine toka, kroz eroziju obala i meandriranje.

8.2.3.5 Erozija izazvana promenama u rečnom slivu

Smanjenje količina nanosa koje dospevaju iz sliva je sve češće uzrok opšte erozije rečnih korita. Protiverozioni radovi u slivu utiču na smanjenje erozione produkcije nanosa, a deo nanosa zaustavljaju hidrotehnički objekti (brane, pragovi i dr.), tako da se generalno smanjuje ulaz i transport nanosa u vodotocima.

Takođe, promene u načinu korišćenja zemljišta u slivu imaju direktan uticaj na vodotok. Bitne su ne samo promene količine nanosa koji stiže u vodotok, već i promene karakteristika

nanosa, a posebno razlika u dinamici pristizanja nanosa iz sliva u reku nakon kišnih epizoda (Sayre and Kennedy, 1978). Urbanizacija ima uticaja na hidrološke uslove i morfologiju vodotoka jer bitno povećava frekvenciju velikih voda, tako da je interakcija toka sa aluvijalnim slojevima znatno češća.

8.2.4 Moguće mere za kontrolu procesa opšte deformacije rečnog korita

Primer vodotoka na kome je došlo do opšte deformacije korita je Velika Morava, sa generalnim produbljenjem korita duž celog toka (dužine 180 km) od oko 3 m. Verovatno je kombinacija više faktora, i to antropogenih, dovela do degradacije korita Velike Morave. Trend erozije rečnog dna je posledica regulacionih radova (prosecanje većeg broja rečnih krivina sa konsekventnim povećanjem uzdužnog pada korita), smanjenog ulaza nanosa iz sliva (usled izgradnje akumulacija i izvođenja antierozionih radova) i stalnog bagerovanja šljunka iz rečnog korita.

Slučaj degradacije korita Velike Morave nije izuzetan jer se ovaj problem, kao posledica različitih kombinovanih antropogenih uzroka, javlja na brojnim velikim rekama u Evropi i SAD (Misuri). Brojni državni i privatni subjekti su analizirali procese i preduzimali mere za zaustavljanje ovog procesa degradacije reka:

- Na Rajni su vršena kompleksna istraživanja procesa koji su doveli do produbljenja rečnog korita i konstatovano je da se erozija može zaustaviti dodavanjem vrlo krupnih frakcija nanosa, jer će to imati efekat „popločavanja“ rečnog dna.
- Na mađarskom sektoru Dunava su identifikovana tri osnovna uzroka korita erozije na: (1) regulacija korita, (2) bagerovanje i (3) smanjen transport nanosa (Goda, Kalocsa, Tamás, 2007).
- Na austrijskom sektoru Dunava je prisutna degradacija rečnog korita, kao posledica zaustavljanja vučenog nanosa u akumulacijama hidroelektrana i regulacionih radova. Kao rešenje izabrana je mera „poboljšanje granulometrije dna“. Ta mera podrazumeva da se u rečno korito baca prirodni šljunak (krupnoće 40 do 70 mm), koji je znatno krupniji od materijala prisutnog u rečnom dnu. Od 1996. godine je u korito deponovano 7500 to 190000 m^3 šljunka godišnje.
- Na nemačkom sektoru Dunava (u državi Baden-Virtenberg) se od 1988. godine primenjuju mere za ublažavanje procesa degradacije dna, nastalog kao posledica skraćenja rečnog toka prosecanjem krivina. Zbog toga je restauriran rečni meander, a izvedene su i dve građevine za kontrolu podužnog pada. Takođe, bagerovanje je dozvoljeno samo u ograničenim količinama, radi održavanja plovidbenih uslova i protočnosti rečnog korita.
- Korito reke Elbe se produbljuje prvenstveno zato što je regulacionim objektima korito bitno suženo, a samim tim povećane brzine i transportni kapacitet za nanos. Drugi uzrok produbljenja dna je izgradnja brana, koje prekidaju kretanje nanosa. I na ovom vodotoku je primenjena mera dodavanja krupnog nanosa u rečno korito (242.000 t u periodu 1996-2002.).

Kao što je verovatno da ne samo jedan, već brojni faktori izazivaju degradaciju korita, takođe je verovatno da će se najefikasnije rešenje postići kombinacijom mera za kontrolu ovog procesa.

U cilju uspostavljanja ravnotežnog pada mogu se izgraditi poprečni objekti, kao što su pregrade i pragovi. Pregrade imaju visinu iznad rečnog dna i menjaju liniju energije rečnog

toka, dok su pragovi objekti koji nemaju visinu, već samo stabilizuju uzdužni profil korita. Istraživanja su, međutim, pokazala da poprečne građevine mogu da efikasno smanje degradaciju korita samo lokalno. Najefikasnije su kada se koriste za kontrolu regresivne erozije, u zoni preloma pada. Poprečni objekti ne mogu da reše problem ako je u pitanju generalni manjak u bilansu nanosa ili povećane vučne sile u suženom rečnom koritu. Takođe, može se javiti erozija dna nizvodno od objekta, koja ga može ugroziti. U slučaju veće visine, pregrade su problem jer mogu sprečiti migraciju riba.

Primer mere za kontrolu degradacije korita je pregrada izgrađena 2007. godine u koritu Velike Morave nizvodno od Markovačkog drumsko-železničkog mosta (slika 8.6). Pregrada je morala biti izgrađena radi obezbeđenja vodosnabdevanja TE Morava. Naime, TE je morala da prekida rad tokom malovodnih perioda, s obzirom da su, usled produbljenja dna, nivoi vode bili niži od vodozahvata. Pregrada je u potpunosti ispunila planiranu namenu, jer se vrlo brzo iza nje formirao zaplav koji je podigao nivo vode kod vodozahvata. Stanje objekta i rečnog korita se permanentno prati kako bi se preduzele eventualne dopunske mere.

Slika 8.6: Pregrada u koritu Velike Morave (Izvor: IJČ)

8.3 Lokalna deformacija rečnog korita

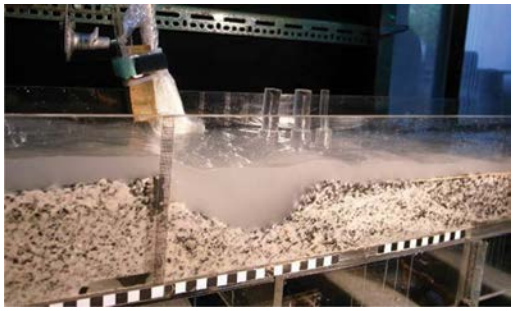
Lokalna deformacija je posledica naglog poremećaja polja brzina, koji je koncentrisan na jednom lokalitetu. Pojavljuje se najčešće na lokalitetima sa nepovoljnim morfološkim karakteristikama rečnog korita (na pr. oštra krivina, suženje korita), kao i u zonama gde regulacione građevine (naperi, pragovi, pregrade) i objekti u koritu (mostovski stubovi, vodozahvati, ispusti) lokalno menjaju strujnu sliku.

8.3.1 Lokalna deformacija rečnog korita u zoni mostovskih stubova

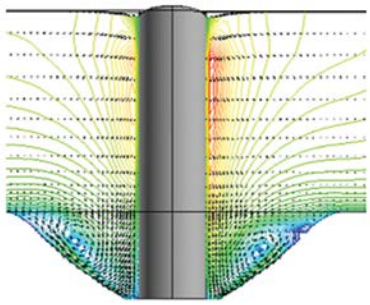
Lokalna erozija u zoni mostovskih stubova nastaje zato što lokalni transportni kapacitet vodotoka prevazilazi priliv nanosa. Vodotok teži da uspostavi novo ravnotežno stanje tako što produbljuje korito, naročito u zoni uticaja čvrste konture stubova. Primeri stubova ugroženih erozijom su dati na slici 8.7.

Slika 8.7: Lokalna erozija oko mostovskih stubova (Izvori: fhwa.dot.gov, hydrolab.illinois.edu)

Dubina lokalne erozije se meri na hidrauličkim modelima sa pokretnim dnom (slika 8.8), kako bi se proučio mehanizam erozije i definisao izraz za određivanje maksimalne dubine erozije. U novije vreme se za proračune koriste i računski modeli (slika 8.9).

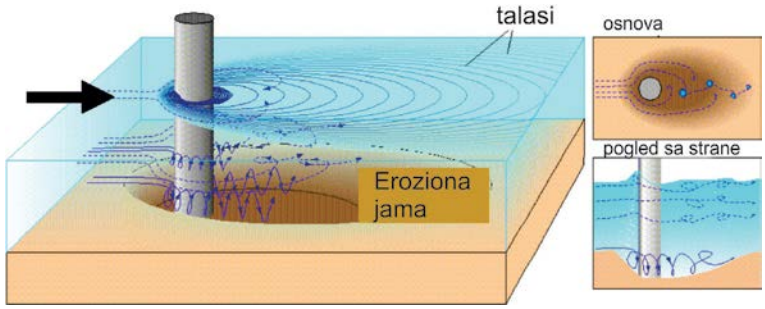


Slika 8.8: Model sa pokretnim dnom za ispitivanje erozije oko mostovskog stuba (Izvor: ce.ntu.edu.tw)

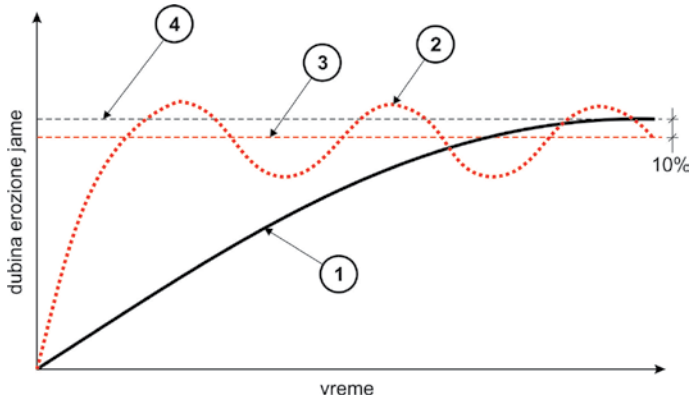


Slika 8.9: Rezultati numeričkog modela defomacije oko mostovskog stuba (Izvor: comphydrotech.com)

Istraživanja su pokazala da je lokalna erozija posledica složenog vrtložnog strujanja oko stuba (slika 8.10), koji ima oblik potkovice.



Slika 8.10: Vrtlog u obliku potkovice se stvara pri opstrujavanju mostovskog stuba (Izvor: usgs.gov)



Slika 8.11: Rast erozione jame (Izvor: mdpi.com)

Eroziona jama raste do određene ravnotežne dubine, koja zavisi od uslova u kojima se proces odvija. Ako se odvija u uslovima „čiste vode“ (odnosno ako nema kretanja nanosa u vodotoku), jama kontinuirano raste dokle god postoje uslovi za izbacivanje nanosa iz nje (slika 8.11, linija 1), sve do ravnotežne veličine (linija 4). Ako se odvija u uslovima „pokretnog dna“, dubina jame se brzo povećava (slika 8.11, linija 2), a ravnotežna dubina (linija 3) se postiže kada se izjednače ulaz i izlaz nanosa iz jame.

Erozija oko mostovskih stubova je funkcija više parametara, uključujući oblik i dimenzije stubova, njihovu lokaciju u odnosu na mostovski profil, dubinu vode na mestu stuba, brzinu, granulometrijski sastav materijala u kome je stub fundiran, lokaciju stuba u odnosu na glavni tok. Većina ovih nepoznatih je prikazana preko koeficijenata u jednačinama za izračunavanje erozije oko mostovskih stubova. Treba napomenuti da su ove jednačine razvijene u laboratorijskim uslovima, zbog nemogućnosti da se određene hidrauličke veličine izmere na terenu u vreme velikih voda.

U literaturi postoji veliki broj empirijskih obrazaca za proračun lokalne deformacije oko mostovskih stubova. Najpoznatiji obrazac, koji je godinama potvrđivan u svetskoj praksi, je **obrazac CSU** (Colorado State University):

$$\frac{h_e}{h} = 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \left(\frac{b_s}{h}\right)^{0,65} \cdot Fr^{0,43} \qquad (8\text{-}11)$$

gde je: h_e – najveća eroziona dubina u odnosu na referentno dno korita, h – lokalna dubina u neporemećenom strujnom polju uzvodno od stuba, b_s – širina stuba (m), $Fr = V/\sqrt{g \cdot h}$ - lokalni Frudov broj, V – brzina toka osrednjena po dubini h (m/s), g – gravitaciono ubrzanje, K_1 – koeficijent oblika stuba (tabela 8.2), K_2 – koeficijent koji odražava uticaj napadnog ugla pod kojim tok deluje na stub, K_3 – koeficijent koji opisuje stanje rečnog dna (tabela 8.3), K_4 – koeficijent koji definiše mogućnost „samopopločavanja dna".

Tabela 8.2: Vrednosti koeficijenta K_1 [26]

Oblik prednjeg dela stuba	K_1
Četvrtast	1,1
Okrugli	1,0
Cilindrični	1,0
Grupa cilindara	1,0
Oštroivični	0,9

Koeficijent K_2 se računa po formuli:

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{b_s} \cdot \sin\theta\right)^{0,65} \qquad (8\text{-}12)$$

gde je: θ - ugao koji stubovi zahvataju sa pravcem rečnog toka, L – dužina stubova (m), b_s – širina stuba (m).

Tabela 8.3: Vrednosti koeficijenta K_3 [26]

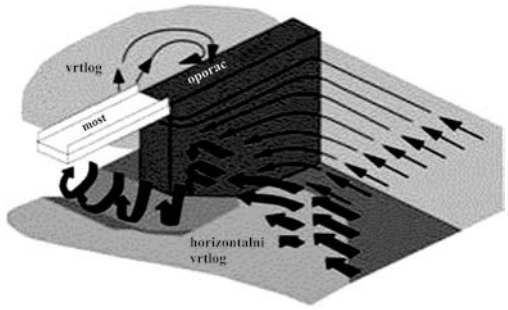
Stanje dna	K_3
Erodirano	1,1
Ravno dno ili antidine	1,1
Male dine	1,1
Srednje dine	1,1-1,2
Velike dine	1,3

Koeficijent K_4 se određuje preko kritične brzine za pokretanje nanosa iz dna. Za proračun lokalne erozije merodavan je protok koji puni osnovno korito.

Za proračun erozije oko stubova na osnovu **Froehlich-ove jednačine** koriste se poznate vrednosti dubine i brzine u uzvodnom preseku, kao i podatak o širini stuba. Jednačina ima oblik [26]:

$$h_e = 0{,}32 \cdot \phi \cdot (b_s')^{0{,}62} \cdot h^{0{,}47} \cdot Fr_1^{0{,}22} \cdot d_{50}^{-0{,}09} + b_s \qquad (8\text{-}13)$$

gde je: h_e – dubina erozione jame (m), h – dubina u preseku uzvodno od stuba (m), ϕ – koeficijent oblika stuba (ukoliko su stubovi cilindrični ϕ=1), Fr_1 – Frudov broj u preseku uzvodnom od stuba, b_s' – projekcija širine stuba na pravac tečenja, b_s – širina stuba, d_{50} – srednji prečnik zrna nanosa u dnu.



Slika 8.12: Opstrujavanje poprečne građevine (Izvor: IJČ)

Slika 8.13: Oštećenje oporca mosta usled lokalne erozije (Izvor: noscour.com)

8.3.2 Lokalna deformacija rečnog korita u zoni poprečnih građevina

Lokalna erozija se javlja pri opstrujavanju poprečnih građevina (oporci mosta, naperi, strujne građevine, itd.).

Na uzvodnom delu oporca mosta eroziju prouzrokuje brzina čiji pravac nije paralelan rečnom toku. Pravci brzina u tom delu imaju oblik potkovice, pa se takva brzina naziva potkovičasta brzina i ona je po pravcu slična brzinama koje se javljaju kod stubova. Na nizvodnom kraju oporca formiraju se vrtlozi. Strujno polje koje dovodi do erozije je ilustrovano slikom 8.12, a posledice slikom 8.13.

Za procenu konačne dubine erozione jame se može naći u literaturi više empirijskih obrazaca [26]. Empirijske obrasce su predložili:

Liu (1961):
$$\frac{h_e}{h} = C_2 \cdot \left(\frac{L_e}{h}\right)^{2/5} \cdot Fr^{1/3} \qquad \frac{L_e}{h} < 25 \qquad (8\text{-}14)$$

gde je: h_e – dubina erozije (m), h – dubina vode (m), L_e – dužina poprečnog objekta u rečnom koritu (m); koeficijent C_2=1,1 ako su stranice poprečne građevine zakošene, C_2=2,15 ako su vertikalne, F_r - Frudov broj za suženi presek mosta.

Froliš (Froelish, 1987):
$$h_e = h \cdot 2{,}27 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{L'}{h}\right)^{0{,}43} \cdot Fr^{0{,}61} + 1 \qquad \frac{L_e}{h} < 25 \qquad (8\text{-}15)$$

gde je: h_e – dubina erozije (m), L' – normalna projekcija oporca na rečni tok (m), h – srednja dubina na mestu oporca u uzvodnom poprečnom profilu (m), K_1 –koeficijent oblika oporca (K_1~1,0), K_2 –koeficijent ugla koji oporac zaklapa sa pravcem rečnog toka, F_r - Frudov broj za suženi presek mosta.

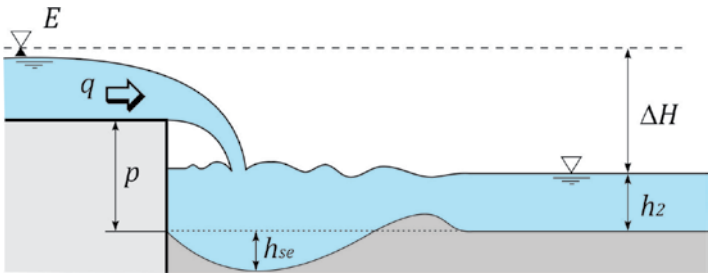
Ričardson (Richardson, 1975): $\frac{h_e}{h} = 4 \cdot Fr^{1/3}$ $\frac{L_e}{h} > 25$ (8-16)

Jednačina HIRE (Richardson, Simons, Julien, 1990):

$$h_e = h \cdot 4 \cdot Fr_1^{0,33} \cdot \left(\frac{K_1}{0,55} \right) \cdot K_2 \quad \frac{L_e}{h} > 25 \tag{8-17}$$

8.3.3 Erozija nizvodno od poprečnih objekata

Prilikom prelivanja preko poprečnih objekata u rečnom koritu (kaskade i pregrade) javlja se vrtlog sa horizontalnom osovinom (slika 8.26) i dolazi do erozije, čija se veličina može odrediti pomoću empirijskih jednačina.



Slika 8.14: Lokalna erozija nizvodno od poprečnog objekta u dnu vodotoka [26]

Prvu od njih je 1932. godine definisao **Šoklič** (Schoklitch) na osnovu stotina merenja u laboratorijskom kanalu [26]:

$$h_{se} + h_2 = \frac{4,75 \cdot \Delta H^{0,20} \cdot q^{0,57}}{d^{0,32}} \tag{8-18}$$

gde je: h_{se} - ravnotežna dubina erozione jame (m), h_2 - dubina donje vode (m), ΔH - denivelacija između gornje i donje vode na objektu (m), q - jedinični protok (m^2/s), d = d_{90} (mm).

9 REGULACIONE GRAĐEVINE

9.1 Podela i osnovni pojmovi

Rečne regulacione građevine su hidrotehnički objekti koji se izvode u priobalju ili samom koritu reke da bi se uticalo na režim tečenja vode, nanosa i leda i na taj način ostvarili planirani ciljevi uređenja vodotoka.

Regulacione građevine u priobalju se najčešće izvode radi zaštite od poplava. U osnovnom koritu reke se izvode različiti tipovi regulacionih građevina, pri čemu izbor tipa građevina zavisi od cilja uređenja vodotoka, koji može biti:

- povećanje erozije korita i njegovo produbljivanje,
- omogućavanje protoka vode i pronosa nanosa bez smetnji,
- smanjenje erozije obale,
- izazivanje taloženja nanosa na određenim mestima,
- povećanje protočnosti korita,
- kombinacija prethodnih namena.

Regulacione građevine ne treba posmatrati kao pojedinačne objekte, već kao deo vodotoka koji će posle izvođenja radova imati promenjene karakteristike. Odgovarajućim proračunima treba predvideti promene u vodotoku, kako bi se postigao željeni krajnji cilj uređenja vodotoka.

Do dimenzija i dispozicije regulacionih građevina dolazi se kroz hidrauličke i morfološke analize.

Izbor optimalne konstrukcije građevina se zasniva na tehno-ekonomskoj analizi koštanja radova (slika 9.1) u kojoj se upoređuju troškovi izvođenja i održavanja u periodu eksploatacije objekta.

Slika 9.1: Tehno-ekonomska analiza varijantnih rešenja

Građevine za uređenje vodotoka su skupe, zbog velikog obima radova i specifičnih uslova njihovog izvođenja. Stoga se traže jeftina tehnička rešenja i to u dva smera:

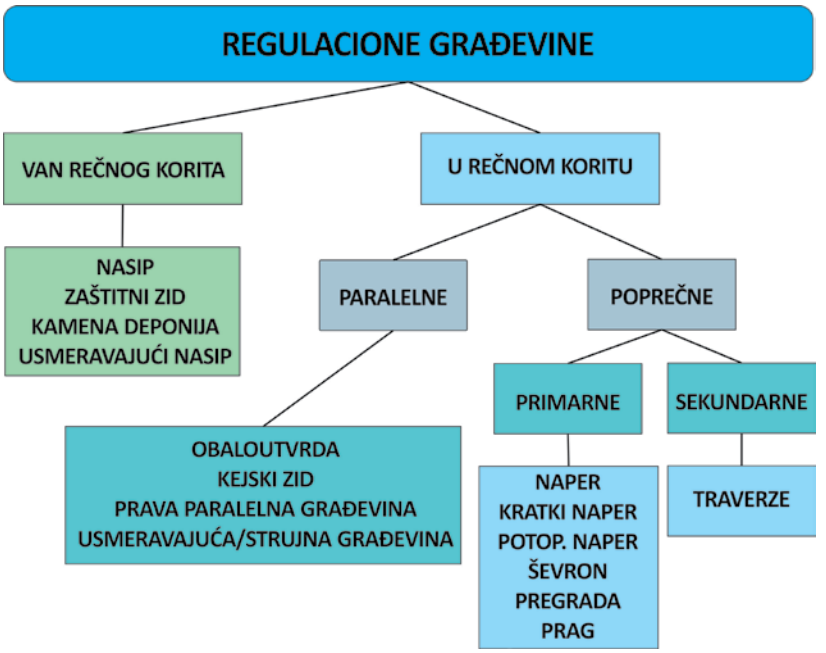
- koriste se uglavnom prirodni materijali kojih ima u blizini gradilišta,
- koristi se sposobnost vodotoka da sam formira svoje korito. To znači da se manjim zahvatima usmerava tok vode tako da erodira deo korita koji je potrebno produbiti (ili proširiti), odnosno usporava tok na onim mestima gde je potrebno da se korito zaspe nanosom vodotoka.

Konstrukcije regulacionih građevina su jednostavne. Međutim izbor tipa, raspored građevina u prostoru i njihovo oblikovanje predstavlja složen inženjerski zadatak.

Posle izvođenja regulacionih objekata, neophodno je njihovo kontinuirano održavanje u funkcionalnom stanju. Održavanje svake vrste objekata i radova ima svoje specifičnosti.

Specifičnost regulacionih građevina leži u činjenici da deo objekta treba izvoditi u tekućoj vodi (jedino je kod malih vodotoka moguće privremeno skrenuti tok i izvoditi radove u suvom). U slučaju regulacionih zahvata na rekama to nije moguće, već se često moraju koristiti polufabrikati koji se kao elementi ugrađuju na projektovanu poziciju u vodi.

Relativno je veliki broj tipova regulacionih građevina proizašao iz različitih potreba za uređenje vodotoka i različitih uslova u kojima se izvode građevine. Njihova osnovna podela data je na slici 9.2.



Slika 9.2: Vrste regulacionih građevina

9.2 Raspored regulacionih građevina u rečnom koritu

9.2.1 Izbor regulacionih elemenata

Regulacioni elementi su osnovne karakteristike regulisanog korita: trasa (zakrivljenost trase, dužina i broj hodova, veličina centralnih uglova), uzdužni profil (pad dna), poprečni profili (dimenzije osnovnog korita i korita za veliku vodu) i regulacione građevine (dispozicija, tipovi, osnovne dimenzije, karakteristične kote).

Kako regulacione radove po pravilu karakteriše veliki utrošak materijala, radne snage i energije, određivanje optimalnih regulacionih elemenata je jedan od osnovnih ciljeva u izradi projekta uređenja vodotoka, jer se time mogu postići velike uštede. Takođe, regulacione elemente treba definisati tako da se u što manjoj meri poremeti životna sredina.

U izboru regulacionih elemenata se koristi više pristupa, zavisno od cilja koji treba postići radovima. U osnovi svih pristupa stoji princip da se **regulacionim merama ne može postići ništa što je protivno prirodi vodotoka**, ukoliko se suštinski ne menja prirodni režim (na primer kanalisanjem vodotoka).

Samo u naturalnom uređenju manjih vodotoka mogu, pored pomenutih analiza, da se koriste i uprošćene empirijske formule **"teorije režima"** u kojima se regulacioni elementi određuju na osnovu protoka [32]:

$$B=a_1 \cdot Q^{b_1}$$
$$h=a_2 \cdot Q^{b_2}$$
$$V=a_3 \cdot Q^{b_3}$$

gde je: h = A/B – srednja dubina toka, B – širina korita, Q – merodavni protok, V – brzina toka, a i b empirijski koeficijenti.

Ove uprošćene relacije imaju ograničenu primenu jer ne obuhvataju sve faktore koji utiču na formiranje aluvijalnog korita. Vrednosti empirijskih koeficijenata nisu univerzalno primenljive, jer su dobijene analizom parametara reka na određenim područjima (Leopold – reke u SAD, Blenč – reke u Indiji i Pakistanu, Ribkin – Rusija).

Korišćenje empirijskih formila "teorije režima" ne može se preporučiti za definisanje regulacionih elemenata u slučaju ozbiljnijih zahvata na rekama. Tu se regulacioni elementi moraju definisati na osnovu hidrauličke i morfološke analize.

9.2.1.1 Korišćenje hidrauličke analize za izbor regulacionih elemenata

Za hidrauličku analizu mogu da se koriste numerički ili fizički modeli. **Numerički modeli** se koriste za:

- proračun linija nivoa vodnog ogledala (određivanje krive protoka u izabranim rečnim profilima) odnosno izbor karakterističnih kota i dimenzija regulisanog korita i regulacionih građevina;
- proveru hidrauličkih uslova za izabrane regulacione elemente i upoređenje sa uslovima koje treba postići (na primer, da ne dolazi do izlivanja usvojene merodavne velike vode);
- proveru stabilnosti regulisanog korita (kontrola brzina tečenja i tangencijalnih napona u regulisanom koritu; oni ne smeju da pređu kritične vrednosti, jer bi to ugrozilo stabilnost korita i objekata);
- proračun deformacije regulisanog korita.

Fizički modeli se ređe koriste za izbor dispozicije regulacionih građevina, već uglavnom za analizu razvoja deformacije korita pod njihovim uticajem ili analizu razvoja proseka.

9.2.1.2 Korišćenje morfološke analize za izbor regulacionih elemenata

Morfološke analize se koriste za: (1) izbor uglednih deonica i definisanje osnovnih morfoloških karakteristika na uglednim deonicama, kao i korelativnih veza između pojedinih morfoloških parametara; (2) izbor deonica na kojima treba preduzeti regulacione mere; (3) utvrđivanje obima regulacionih radova i (4) analizu elemenata trase rečnog korita.

Metoda uglednih deonica u suštini predstavlja prenošenje prirodnih uslova sa deonica na kojima vladaju pogodni uslovi sa stanovišta regulacije vodotoka (ugledne deonice) na deonice vodotoka na kojima postoje problemi. Izbor uglednih deonica vrši se na osnovu morfoloških analiza, obavlja se hidraulička analiza ugledne deonice, usvajaju se hidraulički odnosi koje regulacionim radovima treba ostvariti i prenose na deonicu regulacije.

Druga metoda izbora regulacionih elemenata se bazira na **morfološko-hidrauličkim analizama.** Najpre se radi morfološka analiza deonice koja se reguliše i na osnovu rezultata analize usvajaju regulacioni elementi, a zatim se obavlja hidraulička analiza radi provere usvojenih regulacionih elemenata.

U slučaju potpune izmene prirodnog režima vodotoka, metoda uglednih deonica i morfološko-hidraulička analiza nemaju smisla. Zato se obavlja samo hidraulička analiza za više pretpostavljenih varijanti regulisanog korita i bira najpovoljnija varijanta sa aspekta postavljenih ciljeva regulacije.

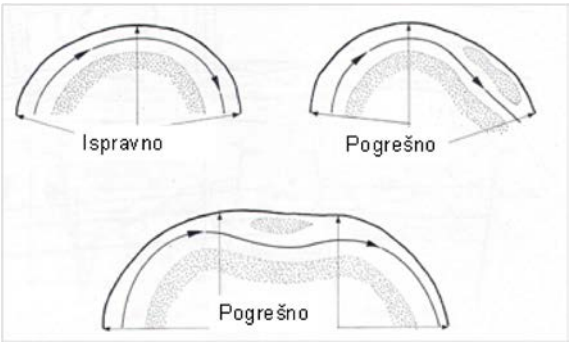
9.2.2 Primeri dobre prakse

9.2.2.1 Trasa regulisanog korita

U projektovanju rečne trase poseban problem predstavlja određivanje najvećeg radijusa krivina. Takođe, značajni su minimalna dužina krivine i dužina prelaznih deonica (pravaca između dve krivine).

Minimalni centralni ugao krivine određuje potreba da se razvije helikoidalno strujanje, takvo da sprud na konveksnoj obali bude stabilan [25]. Eksperimenti pokazuju da je minimalni ugao oko 50°.

Regulisano korito ima naizmenične krivine, sa prelaznim deonicama između njih. Najbolje je da krivine budu jednostavne, kružne, sa prelaznim deonicama dužine 1-2 širine reke. Ako su prelazne deonice duže, korito može da postane nestabilno zbog nastanka naizmeničnih sprudova. Ukoliko je krivina veoma duga, radijus na njenom nizvodnom kraju treba da bude manji nego na uzvodnom kraju (slika 9.3).



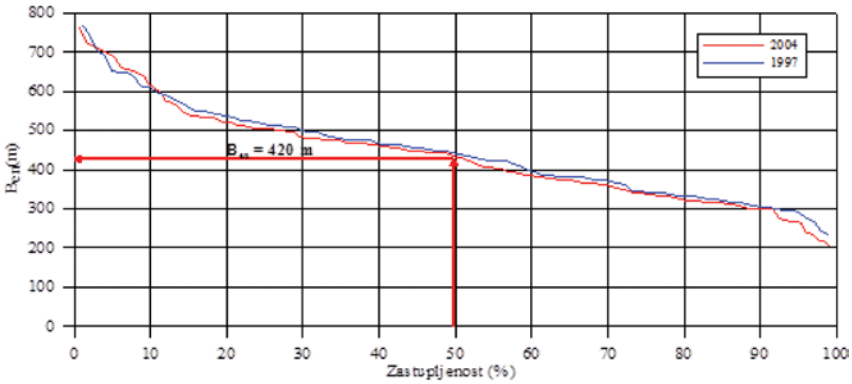
Slika 9.3: Ispravno i pogrešno trasiranje rečnih krivina [25]

9.2.2.2 Širina regulisanog korita

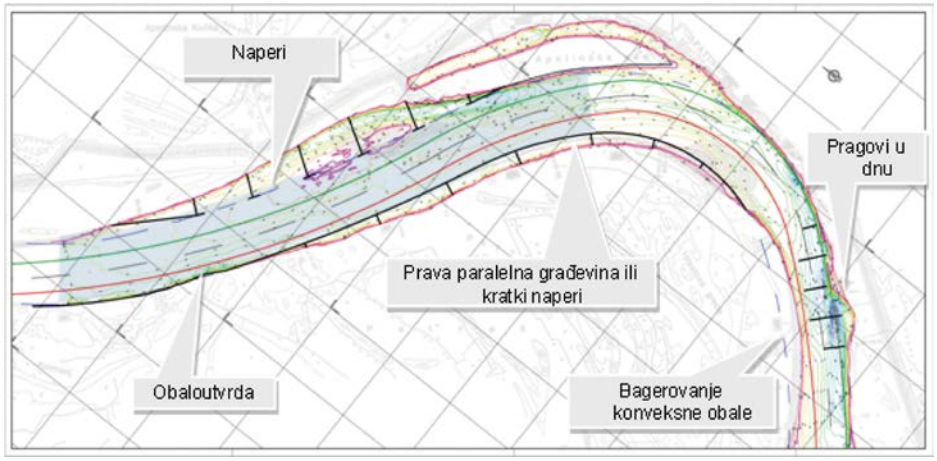
Širina regulisanog korita na potezu intervencije se može odrediti na osnovu analize morfoloških uslova na dužem potezu istog vodotoka, ukoliko postoje podaci snimanja.

Primer. Na Dunavu kod Apatina se u širokom rečnom koritu stvara veliki sprud koji ometa plovidbu, a pri malim vodama plovidba mora da se prekine (slika 4.41). Rešenje ovog problema je regulacija korita za malu vodu, odnosno suženje korita izgradnjom regulacionih građevina na obe obale. Razmak regulacionih građevina jednak je širini korita pri niskom plovidbenom nivou (na Dunavu ovaj nivo odgovara protoku trajanja 98%).

Za određivanje širine regulisanog korita korišćeni su podaci snimanja poprečnih profila Dunava na sektoru od ušća Drave do granice sa Mađarskom (dužine oko 150 km). Na svakom profilu je hidrauličkim proračunom određen nivo vode za analizirani uslov najnižeg protoka pri kome je moguća plovidba (niski plovidbeni nivo, Q=1150 m^3/s) i određena širina vodnog ogledala. Na ovaj niz su primenjene metode matematičke statistike i dobijena je kriva zastupljenosti širina korita (slika 9.4). Konstatovano je da se najčešće javlja širina od 420 m, koja je usvojena za regulaciju kritičnog sektora kod Apatina i predstavlja razmak između regulacionih građevina na levoj i desnoj obali (slika 9.5).



Slika 9.4: Kriva zastupljenosti širina korita Dunava pri najnižem plovnom nivou (Izvor: IJČ)



Slika 9.5: Rešenje uređenja deonice Dunava kod Apatina (Izvor: IJČ)

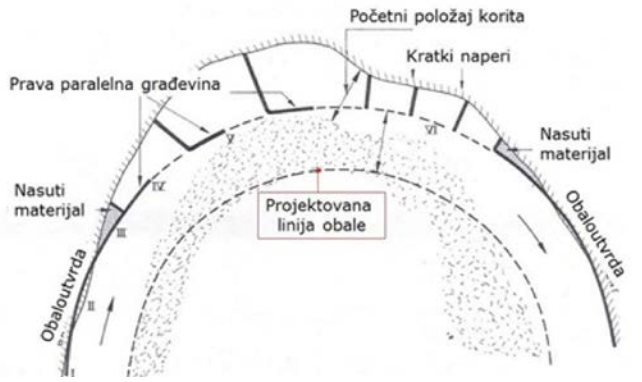
9.2.2.3 Tip i raspored regulacionih građevina

Izbor tipa i dispozicije (položaja) regulacionih građevina zavisi od postavljenog cilja regulacionih radova:

- Produbljenje korita: suženje proticajnog profila (izgradnjom napera ili paralelnih građevina) ili povećanjem uzdužnog pada (prosecanjem krivina).
- Ujednačen protok vode i pronos nanosa se: ispravno trasiranje regulacionih linija i održavanje potrebnih brzina toka.
- Smanjenje erozije: proširenje proticajnog profila, smanjenje uzdužnog pada, povećanje otpora tečenju, pomeranje matice vodotoka od obale.

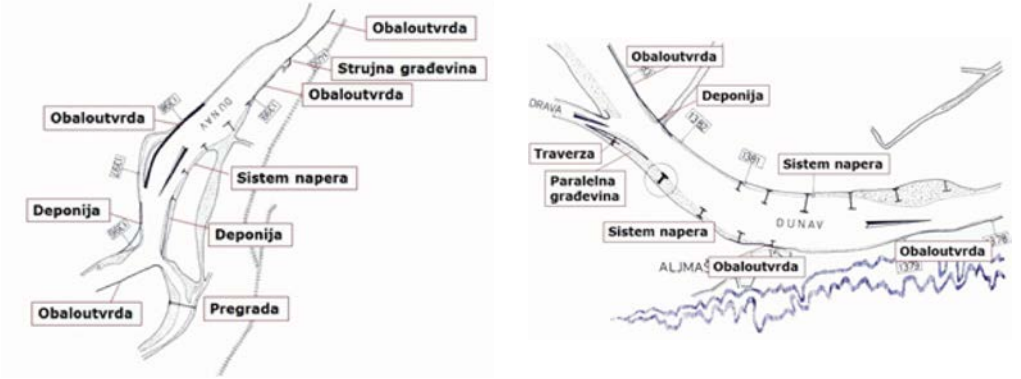
- Povećanje protočnosti: uklanjanje naglih promena morfologije korita, povećanje proticajnog profila ili povećanje uzdužnog pada.

Na slici 9.6 prikazan je primer rasporeda regulacionih građevina u oštroj rečnoj krivini [25]. Problem erozije konkavne obale nije mogao biti rešen izgradnjom obaloutvrde, jer je linija obale bitno promenjena, već je projektovano više regulacionih građevina, radi pomeranja matice vodotoka od obale.



Slika 9.6: Regulacija rečne krivine [25]

Na slici 9.7 su dati neki primeri kombinacija regulacionih građevina na Dunavu. Cilj ovih radova bilo je obezbeđenje plovidbenih uslova (produbljenje korita je postignuto suženjem proticajnog profila za malu vodu izgradnjom napera i paralelnih građevina), ujednačavanje protoka vode i nanosa, zaštita obala od erozije (obaloutvrde) i povećanje protočnosti (pregrađivanje rukavaca, kako bi se protok koncentrisao u osnovno korito vodotoka).



Slika 9.7: Sistemi regulacionih građevina na dva poteza graničnog sektora reke Dunav između Srbije i Hrvatske (Izvor: IJČ)

9.3 Preporuke za projektovanje regulacionih građevina

Projektovanje regulacionih građevina predstavlja, u većini slučajeva, samo jednu etapu u izradi projekta uređenja vodotoka. Ovoj etapi prethode specifični istražni i studijski radovi za definisanje hidroloških, morfoloških, hidrauličkih, psamoloških i drugih karakteristika vodotoka, kao i usvajanje ciljeva, kriterijuma i uslova koje treba da ispuni uređeno korito.

Generalno, izrada projekta uređenja vodotoka po postojećoj trasi podrazumeva sledeće faze:

1. Hidraulička i morfološka analiza vodotoka u postojećem stanju;
2. Izbor regulacione širine;
3. Definisanje trase, uzdužnog i poprečnih profila (odnosno visine i dužine regulacionih građevina);
4. Hidraulička analiza vodotoka u regulisanom stanju;
5. Eventualne izmene prvobitnih parametara regulisanog korita odnosno vrsta, lokacija i kontura regulacionih građevina. Izmene se vrše u slučaju da hidrauličko-psamološki proračuni ne daju rezultate koji su u skladu sa postavljenim ciljevima uređenja vodotoka;
6. Nova hidraulička analiza za definitivno usvojene lokacije, tipove i gabarite regulacionih građevina;
7. Ekonomsko-tehnička analiza radi izbora materijala i tehnologije izvođenja regulacionih radova i građevina;
8. Dimenzionisanje sastavnih elemenata i provera stabilnosti regulacionih građevina;
9. Predmer i predračun radova.

Rečne regulacione građevine su specifični objekti koji se grade i funkcionišu u specifičnim uslovima, pod uticajem vode i atmosferskih uslova. Pri razmatranju problema stabilnosti i funkcionalnosti regulacionih građevina treba imati u vidu sledeće okolnosti:

- Regulacione građevine mogu imati različite namene, ali im je zajedničko to da svojim postojanjem izazivaju određene promene u koritu vodotoka (opšta i lokalna erozija), a da te promene povratno utiču na same građevine,
- U toku izgradnje i eksploatacije građevine su izložene brojnim opterećenjima i uticajima koji su vrlo promenljivi, a mnogi od njih imaju slučajni karakter;
- U većini slučajeva regulacione građevine ostvaruju svoju ulogu u zajedničkom delovanju istih ili različitih građevina na jednoj deonici vodotoka.

Tempo i redosled izgradnje regulacionih građevina mogu u velikoj meri da utiču na njihovu stabilnost i funkcionalnost, naročito ukoliko se izvodi više građevina na relativno kratkoj deonici jer su tada međusobni uticaji veoma izraženi. U takvim uslovima je izbor adekvatne tehnologije i organizacije izvođenja radova od velikog značaja.

Na osnovu dosadašnjih iskustava, najčešći uzroci oštećenja i rušenja regulacionih građevina su:

- **Negativni uticaj opšte i lokalne erozije na stabilnost građevine.** Ako se ne poznaje ili pogrešno prognozira proces erozije koji će se odvijati u rečnom koritu tokom izgradnje i funkcionisanja regulacionih građevina neće se predvideti adekvatne mere zaštite i neće biti obezbeđena stabilnost građevina;
- **Neadekvatna rešenja za sprečavanje unutrašnje erozije materijala (sufozije)**. Erozija se može javiti u samom telu građevine, filtru ili podlozi regulacione građevine. Ako se ne izuči mogućnost pojave i intenziteta sufozije u konkretnim uslovima, biće projektovana rešenja koja ne obezbeđuju filtracionu stabilnost;
- **Nedovoljne dimenzije građevina i njihovih elemenata.** Može se desiti da opterećenja koja se javljaju tokom eksploatacije građevina nisu dobro određena, zbog primene neadekvatnih metoda za dimenzionisanje građevina ili njihovih elemenata, nedostatka ili nedovoljne pouzdanosti podataka. Takođe je činjenica da u oblasti projektovanja regulacionih građevina nema propisa i standarda;
- **Za izgradnju nije korišćen odgovarajući materijal;**
- **Radovi nisu kvalitetno izvedeni**.

Prva dva uzroka su specifična za regulacione građevine, dok se ostali uzroci rušenja i oštećenja mogu javiti kod svih vrsta građevinskih objekata.

Potrebno je da se u projektu analizira niz stalnih, promenljivih, povremenih i kratkotrajnih opterećenja i uticaja. Uobičajeno je da se opterećenja dele na osnovna, posebna i dopunska.

Osnovna opterećenja su od:

- sopstvene težine građevine, kao i eventualno stalno korisno opterećenje,
- hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska u normalnim uslovima eksploatacije građevina,
- pritiska zemlje,
- filtracionih pritisaka pri normalnim uslovima eksploatacije građevina,
- leda,
- talasa,
- rečnog nanosa,
- snega.

Posebna opterećenja nastaju od:

- hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska pri posebnim uslovima eksploatacije građevine,
- seizmičkih potresa tla,
- udara plovila ili santi leda u regulacione građevine,
- neravnomernog sleganja podloge i tela građevine.

Dopunska opterećenja se javljaju zbog:

- kretanja vozila i mehanizacije tokom izgradnje i eksploatacije građevine;
- temperaturnih promena itd.

Pored navedenih opterećenja, na regulacione građevine deluju i brojni uticaji, koji se često ne mogu brojčano izraziti ali su veoma bitni za stabilnost, trajnost i funkcionalnost ovih objekata. To su:

1. uticaj opšte deformacije korita,
2. uticaj lokalne deformacije korita,
3. dejstvo vode, sunčevog zračenja, vetra i drugih meteoroloških pojava na trajnost i postojanost materijala ugrađenih u regulacionu građevinu,
4. dejstvo različitih hemijskih supstanci koje mogu da dođu u dodir sa regulacionom građevinom putem vode, zemljišta ili na drugi način i ugroze postojanost u nju ugrađenih materijala,
5. abrazivno dejstvo tvrdih čestica nanosa u pokretu,
6. nepovoljni uticaji flore i faune,
7. nepoželjno delovanje neodgovornih lica,
8. incidenti kao što su požari, eksplozije i sl.

Na projektantu je da učini sve da ispravno projektuje građevine, kako bi one u planiranom periodu ispunile svoju funkciju, bez oštećenja i rušenja.

9.4 Materijali za izvođenje regulacionih građevina

Izbor materijala i prefabrikata koji će se koristiti za izgradnju regulacionih građevina je od značaja za stabilnost i trajnost objekata jer će oni biti izloženi uticaju praktično svih meteoroloških pojava, u celokupnom dijapazonu njihove promene. Pored toga, materijali mogu biti izloženi i drugim nepovoljnim uticajima kao što su abrazivno dejstvo nanosa u pokretu, agresivno delovanje hemijski zagađene vode itd.

Polazeći od toga, definisana su sledeća osnovna načela za izbor materijala za izvođenje regulacionih građevina:

- da materijal bude otporan na uticaje kojima će biti izložen posle ugradnje (otpornost na fizičke, hemijske i biološke uticaje, otpornost na mraz, poroznost, stišljivost, hidrofobnost i hidrofilnost, gipkost, žilavost, čvrstoća, tvrdoća, otpornost na habanje),
- da se lako ugrađuje,
- da je jeftin.

Cilj je što veća primena prirodnog materijala koji se nalazi u blizini gradilišta, kako bi se smanjili troškovi izgradnje. Zato se u praksi još uvek najviše primenjuju tradicionalni materijali kao što su kamen, šljunak, pesak, drvo.

Osnovna podela materijala za izvođenje regulacionih građevina je na prirodne i veštačke. U prirodne materijale spadaju kamen, šljunak i pesak, glina i ilovača, zemlja, drvo i biljni materijali, dok su veštački materijali: beton, čelik i sintetički materijali.

9.4.1 Prirodni materijali

9.4.1.1 Kamen

Kamen je još uvek najčešće korišćen materijal u projektima uređenja vodotoka, a koristi se za izradu tela i obloge regulacionih građevina. Potrebno je da kamen bude: jedar, bez pukotina, primesa gline i mekih delova, tvrd (minimalno marke 30), težak (zapreminska masa preko 2100 kg/m^3), nehigroskopan (upijanje vode manje od 0,6%), otporan na dejstvo mraza, habanje i dejstvo agresivnih hemijskih materija u rečnom toku. Zbog svojstava je najpodesniji kamen od eruptivnih (magmatskih) i sedimentnih stena.

Krupnoća kamena se određuje proračunima, zavisno od opterećenja i uticaja kojima će komadi kamena biti izloženi pri izgradnji i funkcionisanju regulacionih građevina.

Kamen se najčešće koristi u sledećim oblicima:

1. Tesani kamen za izradu obloga, obaloutvrde, zidane pregrade itd;
2. Lomljeni kamen za izradu završnog sloja regulacionih građevina i tepiha ispod građevina;
3. Drobljeni i mleveni kamen za izradu betona i filtarskih slojeva.

Pre ugradnje obavezno je ispitivanje kvaliteta kamena prema važećim standardima.

9.4.1.2 Šljunak i pesak

Šljunak i pesak čine čvrste čestice mineralnog (najčešće kvarcnog) sastava. Klasifikaciju se prema krupnoći zrna na sitan, srednji i krupan šljunak odnosno pesak. Koriste se kao prirodna mešavina ili se mešavina separiše u frakcije koje se koriste za određenu namenu.

U regulacijama aluvijalnih vodotoka imaju široku primenu zbog blizine nalazišta (u koritu i dolini vodotoka) i male cene. Koriste se kao ispuna regulacionih građevina, za izradu posteljice, filtarskih i tamponskih slojeva, betona, maltera... Krupan šljunak se može koristiti i za ispunu gabiona i u drugim prefabrikatima.

Pozitivne osobine ovih materijala su sledeće: lako se ravnomerno razastiru, dobro ispunjavaju šupljine, brzo se sležu i imaju relativno malu stišljivost.

Poželjno je da pre ugrađivanja budu isprani od organskih primesa. Pre ugradnje je obavezno ispitivanje kvaliteta prema važećim standardima.

9.4.1.3 Glina, ilovača, humus i drugi zemljani materijali

Glina, ilovača i drugi zemljani materijali neorganskog sastava se u regulacijama najčešće koriste za izgradnju nasutih objekata (nasipa, nasutih pregrada i brana). Zavisno o konstruktivnog rešenja, od ovih materijala može biti izveden ceo objekat ili njegov deo.

Glina je praktično vodonepropusan materijal, ukoliko se pri ugradnji sabije na propisan način. Zato se koristi izgradnju vodonepropusnih delova nasipa (ekran ili jezgro), ukoliko je telo nasipa izvedeno od vodopropusnih materijala (kamena, šljunka) ili celog tela nasipa manjih dimenzija. Takođe, glina se koristi za vodonepropusne obloge kanala i zagate. Osnovna pretpostavka za kvalitetno izvođenje vodonepropusnog glinenog sloja je optimalna vlažnost gline pri ugradnji (18 do 20 %).

Ilovača je zemljani materijal, koji zavisno od lokacije pozajmišta može imati u svom sastavu različite odnose gline, peska i prašine. Da bi se utvrdilo da li je ilovača dobar ili loš materijal za određenu namenu, potrebno je ispitati njene geomehaničke karakteristike pre ugradnje. Ukoliko je povoljnog sastava, ilovača se koristi za iste namene kao i glina.

Zemljani materijali lošijeg kvaliteta se koriste za nasipanje depresija u blizini rečnog korita i formiranje obala regulisanog korita.

Humus je zemljani materijal sa velikim procentom organskih materija. Sloj humusa debljine do 0,5 m se koristi se za humuziranje kosina i krune nasipa ili kosina uređene obale. Po razastiranju humusa, kosine se zatravljuju pogodnom smešom trava. Međutim, kako trava ne može duže vreme da se održi pod vodom, humuziranje se uglavnom primenjuje samo u gornjoj zoni objekta, koja je izložena vodi najviše do 30 dana godišnje.

9.4.1.4 Drvo

Drvo se u regulacijama reka koristi u više oblika: cela stabla, kao obla, tesana, cepana i rezana građa, pruće ili šiblje, kolje. Drvo se koristi za zaštitu obala od erozije ili se ugrađuje u regulacione građevine.

Generalno, potrebno je da drvo bude trajno, žilavo, gipko i otporno na delovanje insekata i gljivica. Ukoliko je drvo stalno potopljeno u vodu, njegov vek je praktično neograničen jer je zaštićeno od insekata i gljivica. S druge strane, trajnost drveta postavljenog u zoni čestih oscilacija nivoa vode je ograničena (zavisno od vrste 2 do 20 godina).

Pruće je jeftino, elastično i lako za ugradnju, pa se veoma često koristi u regulacijama reka. Pruće treba da bude vitko, sveže i ravno, s optimalnom debljinom 3 do 4 cm na debljem kraju. Najčešće se koristi pruće vrba, breza, jasika, jova, topola i jablana, starosti 1 do 3 godine. Seče se u vanvegetacionom periodu i treba da se koristi odmah posle seče.

Kolje najčešće ima dužinu 1,0 do 1,6 m i debljinu 5 – 15 cm. Za izradu kolja se koriste iste vrste drveća kao i za pruće.

9.4.1.5 Biljni materijal

U regulacijama reka se koriste različiti biljni materijali:

- Trava se seje u proleće, zaliva dok se ne ukoreni i razvije, održava redovnim košenjem;
- Busen se koristi ako nema dovoljno vremena da se do nailaska velikih voda razvije zasejani travnati pokrivač;
- Trska se koristi za zaštitu obala od erozionog dejstva talasa, posebno na plovnim rekama;
- Sadnice vrbe, leske, jasike, johe i topole se sade u zoni od nivoa srednje do nivoa srednje velike vode.

Radovi sa biljnim materijalima - **biotehnički radovi**, se izvode radi:

- Zaštite kosina obala, nasipa i delova korita izloženih erozionom dejstvu vode. Splet korenja čini živu oblogu koja se bolje odupire eroziji od nevezanog tla. Travnati pokrivač može izdržati vučne sile do 20 N/m^2, ako nije duže vreme pod vodom.
- Postizanja estetskih efekata.

9.4.2 Veštački materijali

U projektima uređenja vodotoka se sve češće, a ponekad i neopravdano, koriste brojni veštački materijali. U tu grupu spadaju: beton, metal (čelik) i drugi veštački materijali: keramika, opeka, neorganska veziva (cement), organska veziva (katran, bitumen), asfaltne mešavine i sintetički materijali.

9.4.2.1 Beton

Laki i obični **beton**, armirani ili nearmirani, se koristi se za izradu obloga i upornih greda obaloutvrda u naseljima i pristaništima, na plovnim kanalima i jezerima. Postoji tendencija da se sve više koriste gotovi betonski i armirano-betonski elementi umesto ugrađivanja betona na licu mesta. Od gotovih elemenata se najviše koriste blokovi i ploče različitih oblika i dimenzija, šipovi, talpe, valobrani itd. S obzirom da kod većine regulacionih građevina može doći do sleganja podloge ili tela građevine, ne preporučuju se betonske ploče velikih dimenzija.

Potrebna svojstva betona su: odgovarajuća čvrstina (ne manja od MB 20 do 25), minimalna poroznost, otpornost na mraz, abraziju i agresivno delovanje hemijskog zagađenja.

9.4.2.2 Čelik

Najčešće se čelik koristi u vidu profilisanih talpi za priboje, a čelična žica za vezivanje pruća ili izradu žičanih korpi (gabiona). Da bi se obezbedila trajnost proizvoda od čelika, oni se moraju zaštititi od korozije. Na primer, čelična žica za gabione mora biti dva puta pocinkovana da bi bila otporna na koroziju.

9.4.2.3 Sintetički materijali

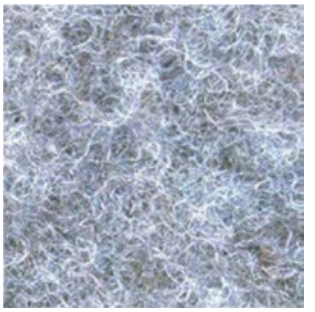
U grupu sintetičkih materijala spadaju: tkani i netkani geotekstili, armirajuće mreže i membrane.

Osnovne prednosti **geotekstila** su uniforman kvalitet, mogućnost deformacija bez kidanja i mogućnost lakog i kvalitetnog spajanja elemenata u veće površine. U pitanju su najčešće poliestri i polipropileni, koji su otporni na vodu sa pH vrednostima 3 -11. Geotekstili mogu da se koriste za:

- Odvajanje slojeva različitih materijala, pri čemu propuštaju tečnost, ali zadržavaju čestice tla. To znači da se koriste kao filtarski sloj umesto klasičnog filtra od šljunka;
- Izradu podloge regulacione građevine. U tu svrhu se koriste ojačani geotekstili – geokompoziti, koji se postavljaju u vidu madraca (tepiha);
- Izradu elemenata različitih oblika, koji se koriste kao delovi regulacionih ili zaštitnih građevina.

Slika 9.8: Tkani geotekstil

Geotekstili mogu biti tkani ili netkani. Tkani geotekstil se proizvodi konvencionalnim tkanjem pojedinih vlakana. Pri kraju procesa dobija se mrežasta struktura (slika 9.8). Netkani geotekstil je tanka struktura proizvedena tehnologijom iglanja ili termičkim povezivanjem neprekidnih polimernih vlakana (slika 9.9). Netkani geotekstil poseduje specifičan polimerni sastav od polipropilenskog vlakna sa polietilenskim omotačem. Slična kombinacija polimera garantuje odlične karakteristike polipropilena u pogledu jačine, kao i izuzetnu hemijsku i biološku otpornost polietilena. Geotekstili se odlikuju izotropnim ponašanjem, visokom otpornošću na proboj, visokim drenažnim karakteristikama i UV stabilnošću.



Slika 9.9: Netkani geotekstil

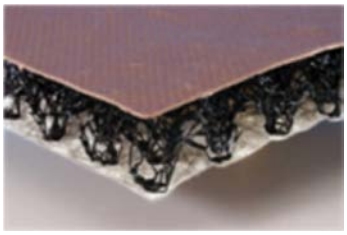
Na primer, od tkanog polipropilena se izrađuju geokontejneri (slika 9.10), koji se lako postavljaju i na suvi i na podvodni teren i pune materijalom iz rečnog korita (slika 9.11).

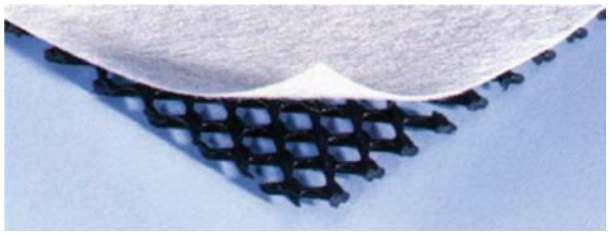
Slika 9.10: Cevasti geokontejner (Izvor: Maccaferi)

Slika 9.11: Punjenje geokontejnera postavljenog na projektovanu trasu refulisanim peskom (Izvor: Maccaferi)

Geokompoziti (slika 9.12) su proizvodi koji se sastoje od kombinacije dve ili više geosintetičkih komponenti, a namenjeni su da ispune neku specifičnu funkciju ili više njih

– na primer ojačanje slabonosivog rečnog dna i njegovo razdvajanje od kamene regulacione građevine.

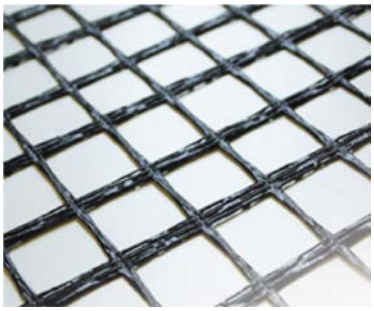




Slika 9.12: Primeri geokompozita

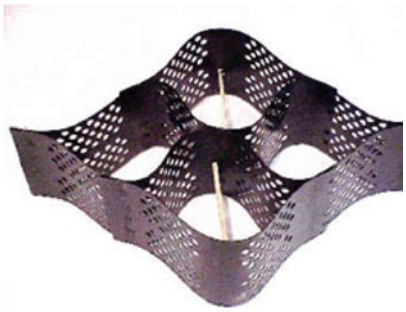
Geonet mreža (slika 9.13) se koristi za ojačanje obala. To je pljosnata struktura od međusobno povezanih geosintetičkih traka, koja se može postaviti sama ili punjena lomljenim kamenom (slika 9.14).

Geocel mreže su dvodimenzionalne strukture, sastavljene od širih geosintetičkih traka (slika 9.15). Mreže se pune kamenom ili zemljom (slika 9.16).



Slika 9.13: Geonet mreža

Slika 9.14: Geonet mreža punjena lomljenim kamenom (Izvor: germes-online.com)



Slika 9.15: Geocel mreža

Slika 9.16: Geocel mreža punjena kamenom na rečnoj obali

Vodonepropusne membrane su fleksibilni, kontinualni čaršavi napravljeni od jednog ili više sintetičkih materijala. Najčešće se koriste za oblogu kanala, ukoliko je potrebno sprečiti procurivanje (slika 9.17). Kada se postave, sastavi se lepe ili vare (slika 9.18) kako bi se obezbedila vodonepropusnost.

Slika 9.17: Postavljena vodonepropusna membrana (Izvor: boomenviro.com)

Slika 9.18: Varenje spojeva (Izvor: qlining.com)

9.4.2.4 Biotekstil

Za prirodan izgled uređenih obala koriste se posebne obloge (biotekstil), koje se izrađuju od prirodnih vlakana (kokos i/ili slama) povezanih mrežom od sintetičkog materijala (polipropilen) ili nekog prirodnog materijala (juta). Biotekstil (slike 9.19 i 9.20) je biorazgradiva podloga, koja zadržava vlagu i stvara povoljne uslove za razvoj vegetacije.

Slika 9.19: Biotekstil postavljen na obali reke (Izvor: fullservice-it.com)

Slika 9.20: Biotekstil od slame (Izvor: fibromat.com.my)

9.4.3 Prefabrikati

Za izvođenje regulacionih građevina mogu da se koriste različiti specifični elementi nastali kombinacijom prirodnih i veštačkih materijala [32].

U praksu se sve više vraćaju u jednom periodu zaboravljeni prefabrikati od pruća i kamena, kao što su pletenice, fašine, savijače (kobe), tonjače (punjene fašine), punjeni valjci, punjene košare, platna, fašinski madraci (splavovi od fašina) i pleteri (popleti). Ponekad se kombinuju sa modernim materijalima - geotekstilima.

U grupu prefabrikata spadaju i gabioni, odnosno žičane korpe punjene krupnim šljunkom ili lomljenim kamenom, koji su postali standard za izvođenje regulacionih građevina.

Prefabrikate odlikuje niska cena, jer se izvode od priručnog materijala (pruće, kamen, žica). Međutim, za njihovu pripremu i postavljanje je potrebna obučena radna snaga.

9.4.3.1 Prefabrikati od prirodnih materijala

Pletenice se koriste za vezivanje umesto užadi i žice. Pletu se od svežeg i vitkog pruća, dužine 4 do 5 m. Osnovnu pletenicu čine najmanje tri pruta. Tri osnovne pletenice se upletu u konačnu pletenicu.

Fašine su povezani snopovi pruća žicom, dužine 3,0 do 4,0 m, debljine 0,30 do 0,35 m (slike 9.21 i 9.22). Rade se na postoljima od kolja pobijenog u zemlju (slika 9.23). Povezuju se užetom, žicom ili prućem.

Slika 9.21: Fašine (Izvor: commons.wikimedia.org)

Slika 9.22: Armiranje kosina nasipa i kanala pomoću fašina (Izvor: markpine.de)

Savijače (kobe) su tanke fašine, prečnika 0,1 do 0,2 m, dužine 15 do 40 m. Izrađuju se na isti način kao fašine, a služe za povezivanje fašina.

Tonjače (punjene fašine) su fašine sa ispunom ili jezgrom od kamena (tucanika) ili krupnog šljunka. Debljina omotača od fašina je 10 cm, a prečnik zavisi od punjenja (od krupnog agregata – 1,1 do 1,2 m, a od sitnog 0,7 do 1,6 m. Dužina nije ograničena i zavisi od potrebe. Tonjače suveoma otporne i dosta elastične. Lako se prilagođavaju različitim oblicima dna i obala korita vodotoka, pa se koriste za fundiranje regulacionih građevina.

Punjeni valjak je punjena fašina ograničene dužine 3,5 do 6 m (slike 9.25 i 9.26).

Slika 9.23: Izrada fašina (Izvor: in-polen.pl)

Slika 9.24: Obala malog vodotoka uređena pomoću fašina i kolja (Izvor: commons.wikimedia.org)

Slika 9.25: Punjeni valjak (Izvor: bestmann-green-systems.de)

Slika 9.26: Punjeni valjak u nožici kosine (Izvor: faschinen.de)

Punjene korpe se mogu formirati u najrazličitijim oblicima, zavisno od potrebe.

Različite vrsta **platna** se koriste za zaštitu kosina. Platna od fašina (slika 9.27) čine snopovi pruća, koja se vezuju žicom. Imaju proizvoljne dimenzije. Platna od pruća mogu biti savitljiva (tanji sloj pruća povezan sa žičanom mrežom - slika 9.28) ili nesavitljiva (umesto žičane mreže koristi se žica i drvene motke koje čine platno nesavitljivim u smeru postavljanja motki). Platna se pletu od pruća na mestu ugradnje.

Slika 9.27: Platno od fašina
(Izvor: bender-rekultivierungen.de)

Slika 9.28: Platno od pruća
(Izvor: hubpages.com)

Fašinski madrac (splav od fašina) je veliko paralelopipedno telo, dužine do 100 m, širine do 20,0 m, debljine 1,0 do 1,5 m. Formira se od nekoliko slojeva fašina na ramu od drvenih oblica, koji je postavljen na obali (slika 9.29). Potapa se na rečno dno na mestu regulacione građevine (slika 9.30) tako što se pažljivo i ravnomerno nanosi sloj kamena debljine 20 do 30 cm. Fašinski madrac služi kao podloga – oslonac preko koga se težina građevine prenosi na slabo nosivo tlo.

Slika 9.29: Fašinski madrac na obali
(Izvor: griendhouthandel.nl)

Slika 9.30: Postavljanje madraca
(Izvor: griendhouthandel.nl)

Pleteri (popleti) se najčešće izvode od vrbovog kolja i pruća u redovima, razmaknutim 0,5-1,0 m i postavljenim paralelno sa obalom. Razlikuju se:

(a) Obični pleter, od kolja prečnika 6 do 15 cm i dužine 1,5 m koje se pobija na udaljenosti 30-50 cm, tako da viri iznad tla 50 do 60 cm. Kolje treba da bude sveže i s izdancima da bi se primilo, a između kolja upliće se, s preklapanjem, sveže vrbovo pruće debljine do 2 cm.

Slika 9.31: Zaštita obale pleterom
(Izvor: salixrw.com)

(b) Krstasti pleter, koji se izvodi od redova kolja u obliku krsta, koje formira pregrade veličine 0,5x0,5 m. Pregrade se humuziraju i zasejavaju travom ili, u slučaju većih brzina toka, ispunjavaju krupnijim šljunkom ili tucanikom.

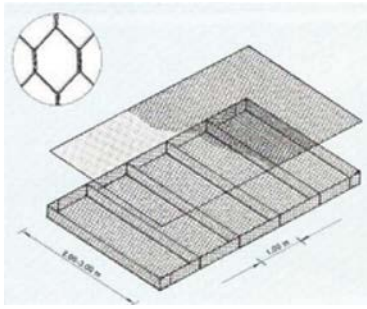
9.4.3.2 Gabioni

Gabioni su žičane korpe ispunjene krupnim šljunkom ili kamenom. Korpe su najčešće paralelopipedi (slike 9.32 - 9.35) ili cilindri (slike 9.36 i 9.37) različitih dimenzija. Dužina je najčešće do 6,0 m.

Kostur korpe sandučastog gabiona se izrađuje od betonskog gvožđa ∅ 4 do 5 mm. Oko kostura se plete pocinkovana ili plastična mreža, ∅ niti 2 do 3 mm. Veličina okana zavisi od krupnoće ispune i retko prelazi 15 cm.

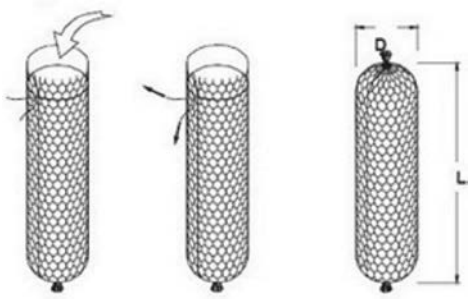
Slika 9.32: Sandučasti gabion (Izvor: maccaferi.com)

Slika 9.33: Postavljanje sandučastih gabiona(Izvor: devronltd.com)



Slika 9.34: Gabionski ili reno madrac (Izvor: temkaltd.gr)

Slika 9.35: Postavljeni reno madraci (Izvor: newgabiontechnologies.com)



Slika 9.36: Cevasti gabion (Izvor: gabionmattress.net)

Slika 9.37: Postavljanje cevastih gambiona (Izvor: gabionbasket.info)

Gabioni se pune krupnijim šljunkom i sitnijim kamenom ili na mestu ugradnje ili na separaciji. Pri transportu i ugradnji treba voditi računa o nosivosti žičanog omotača. Zbog lakšeg rukovanja su cevasti gabioni povoljniji od sandučastih. Radi povećanja stabilnosti, gabioni se na mestu ugradnje međusobno povezuju žicom.

Gabioni od metalne žice su osetljivi na koroziju i mehaničko oštećenje žice. Zato se sve češće se koriste korpe od sintetičkog materijala, jer on nije podložan koroziji.

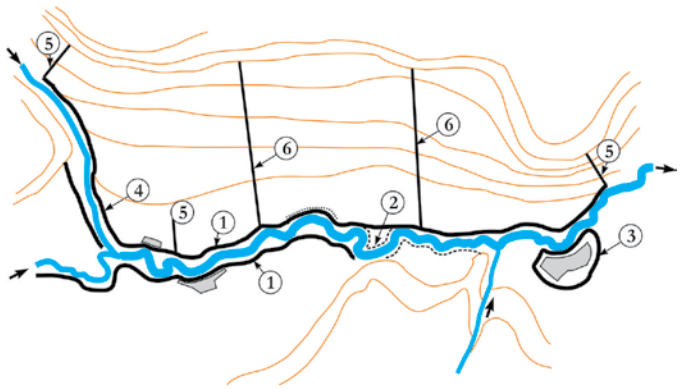
10 NASIPI I DRUGI OBJEKTI VAN REČNOG KORITA

10.1 Nasip

Nasipi su najznačajnije regulacione građevine, kojima se korito za veliku vodu sužava i tako sprečava plavljenje šireg priobalja u kome su izgrađena naselja, industrija ili je uređeno poljoprivredno zemljište. Izgradnja nasipa je višedecenijski poduhvat, koji se nastavlja cikličnim rekonstrukcijama.

10.1.1 Podela i osnovne karakteristike nasipa

Na slici 10.1 prikazani su nasipi različitih namena: (1) glavni nasip, (2) letnji nasip, (3) obodni nasip, (4) usporni nasip, (5) priključni nasip i (6) poprečni nasip.

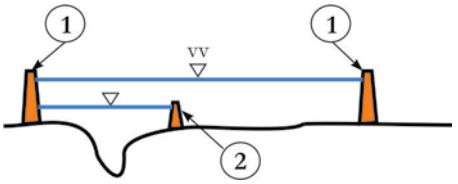


Slika 10.1: Nasipi različitih namena [31]

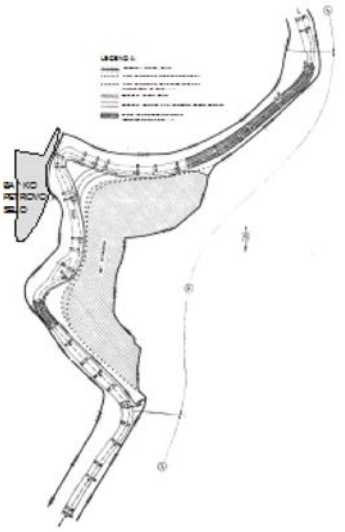
Glavni nasipi su objekti veće dužine, koji brane veliko područje u zaleđu od plavljenja tokom velikih voda. Po visini dimenzionišu tako da spreče izlivanje „merodavne“ velike vode, čiji se povratni period T (odnosno verovatnoća pojave p%) bira u zavisnosti od vrednosti branjenog područja odnosno šteta koje bi nastale pri plavljenju. Za to se u projektu koristi tehno-ekonomska analiza. Naime, zaštita od izlivanja velikih voda koje se retko javljaju zahteva veće investicije i više troškove održavanja (veće su dimenzije nasipa), ali su štete od plavljenja manje.

Izgradnja glavnih nasipa dovodi do izmena režima velikih voda na dužem potezu vodotoka. U zoni izgradnje i uzvodno se povišava nivo velike vode, jer je na potezu nasipa smanjen proticajni profil izgradnjom nasipa. Nizvodno se poplavni talas „ubrzava“ usled koncentracije toka u manjem prostoru, što znači da se pik poplavnog talasa javlja za kraće vreme.

Letnji nasip (slike 10.2 i 10.3) se gradi između rečnog korita i glavnog nasipa i štiti deo inundacije sa poljoprivrednim zemljištem od velike vode koja se može javiti tokom vegetacionog perioda. Ima znatno manje dimenzije nego glavni nasip. Nivo „merodavne“ velike vode, koja se obično javlja u vanvegetacionom periodu, viši je od krune letnjeg nasipa. Stoga se tada nasip preliva i ruši, ukoliko nema uređene zone za upuštanje i ispuštanje vode u prostor između letnjeg i glavnog nasipa.



Slika 10.2: Glavni (1) i letnji (2) nasip [31]



Slika 10.3: Glavni i letnji nasipi na Tisi (Izvor: IJČ)

Obodni nasip štiti manje naselje, industriju ili slične vredne sadržaje. Gradi se po obodu nekog vrednijeg područja. To je jeftinije rešenje od glavnog nasipa, koji uvek ima veliku dužinu. Takođe, obodni nasip ne izaziva značajne promene režima velikih voda.

Usporni nasip je nasip uz pritoku u zoni uspora glavnog toka. Ovaj nasip ima iste karakteristike poprečnog profila kao glavni nasip uz recipijent. Ukoliko velike vode pritoke i glavnog toka ne koincidiraju jer su veličine sliva bitno različite, ne grade se usporni nasipi, već se pritoka uvodi u glavni tok kroz propust sa nepovratnim („žabljim“) poklopcem, koji se automatski zatvara kada se u glavnom toku javi velika voda.

Priključni nasip spaja glavni nasip sa visokim terenom.

Transverzalni (poprečni) nasipi se grade da bi podelili branjeno područje na manje kasete. Podelom se povećava sigurnost zaštite od poplava, jer ako popusti glavni nasip štete od poplava će biti nanete samo u tom delu.

Sekundarni (lokalizacioni) nasip je druga linija odbrane, ukoliko popusti glavni nasip.

10.1.2 Projekat nasipa

Projekat nasipa obuhvata definisanje: (1) trase, (2) dimenzija (visina krune, širina krune, nagib kosina, položaj i širina bankina i berme) i (3) karakteristika konstrukcije nasipa (materijali, slojevi, debljina slojeva).

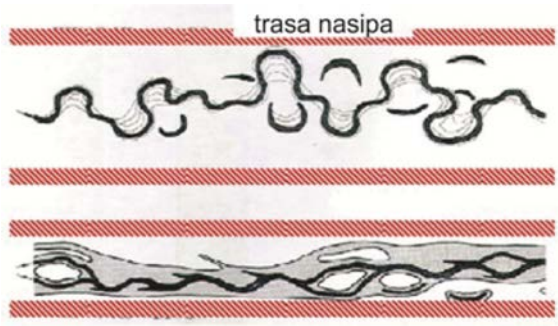
Osnovne dimenzije i razmak nasipa se određuju na osnovu rezultata hidroloških, hidrauličkih i tehno-ekonomskih analiza, uzimajući u obzir značaj branjenog područja odnosno merodvnu veliku vodu od koje se područje štiti.

Materijal za izgradnju (pesak, šljunak, glina, humus) se uzima iz pozajmišta u neposrednoj blizini nasipa, kako bi se smanjili transportni troškovi. Zbog toga je sastavni deo projekta nasipa geotehnički elaborat, u kome se istraživanjima na terenu ispituju karakteristike terena na kome će nasip biti fundiran ali i položaj i karakteristike materijala za izgradnju nasipa.

10.1.2.1 Trasa nasipa

Trasa glavnog nasipa mora biti ispruženija od trase osnovnog korita, kako bi se ostvarilo povoljno tečenje u uslovima velikih voda. Takođe, treba izbegaviti stara napuštena korita („staraće“) jer su na tim potezima loši uslovi fundiranja i postoji opasnost od proviranja vode kroz aluvijalno tlo ispod nasipa.

Razmak nasipa se takođe određuje tehno-ekonomskom analizom: što je veći razmak nasipa niži je nivo vode u regulisanom koritu, gradi se manji objekat, tako da su manja investiciona ulaganja i troškovi održavanja. S druge strane, brani manja površina zemljišta.



Slika 10.4: Principi trasiranja nasipa duž meandrirajućeg i razuđenog rečnog korita [25]

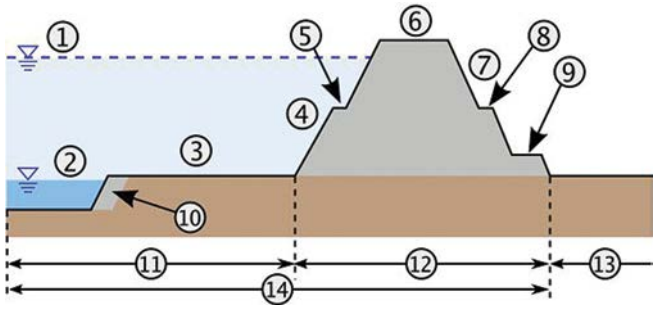
Između obale korita i nožice nasipa se mora ostaviti dovoljan prostor, da ne bi erozija ugrozila nasip. U slučaju meandirajućeg vodotoka je poželjno da razmak nasipa bude veći od širine meandriranja, dok je u slučaju razuđenog korita poželjno da bude veći od širine erozije (slika 10.4).

Moderan princip je "ostaviti mesto za reku", što znači da se nasipi trasiraju na većem međusobnom razmaku, kako bi potrebne intervencije u osnovnom koritu bile minimalne. Time se, takođe, ostavljaju veća plavna područja za mrešćenje riba, barske ptice i razvoj vegetacije, što je povoljno sa aspekta životne sredine.

10.1.2.2 Dimenzije tela nasipa

Dimenzionisanje nasipa znači definisanje njegove spoljne konture, odnosno visine (kota krune), širine krune, nagiba kosina, položaja i širine bermi. Na slici 10.5 objašnjeni su delovi nasipa.

Nakon izbora razmaka nasipa i kote krune, na osnovu hidroloških, hidrauličkih i tehno-ekonomskih analiza, biraju se iskustveno ostale dimenzije nasipa (širina krune, nagibi kosina itd.), a onda se proveravaju na hidrostatičke, hidrodinamičke, dinamičke i seizmičke uticaje.



1. Nivo merodavne velike vode
2. Osnovno korito reke
3. Korito za veliku vodu
4. Nebranjena (spoljna) kosina
5. Berma na nebranjenoj strani nasipa
6. Kruna nasipa
7. Branjena kosina
8. Berma na branjenoj strani nasipa
9. Balast
10. Obaloutvrda na kosini osnovnog korita
11. Nebranjeno područje
12. Nasip
13. Branjeno područje
14. Vodno zemljište

Slika 10.5: Poprečni profil nasipa (Izvor: en.wikipedia.org)

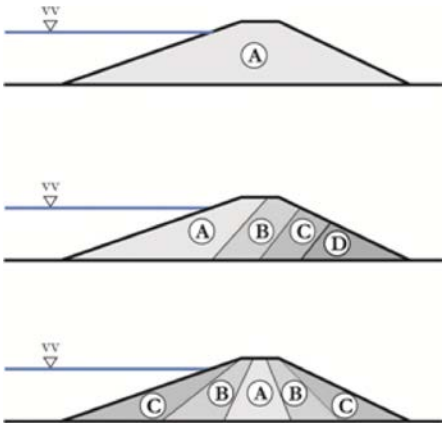
Uobičajene su sledeće osnovne dimenzije nasipa:

- **Visina krune nasipa** je jednaka koti "merodavne" velike vode na koju se dodaje slobodno nadvišenje radi zaštite od prelivanja. Ovim nadvišenjem se uzima u obzir visina talasa od vetra, koji se mogu javiti istovremeno sa velikom vodom, a kompenziraju potencijalne izmene režima voda u slivu i nesigurnost proračuna. Visina slobodnog nadvišenja (**zaštitne visine**) iznosi 0,5 do 1,5 m, zavisno od kategorije vodotoka i drugih parametara.
- **Širina krune** zavisi od namene nasipa. Glavni nasipi imaju širinu krune 3 do 8 m, u zavisnosti od trajanja velikih voda i karakteristika materijala u telu nasipa, a letnji i sekundarni nasipi 1,5 do 2,5 m. Šira kruna omogućava kretanje mehanizacije za održavanje nasipa, tako da se obično usvaja minimalno 3 m.
- **Nagibi kosina** zavise od namene nasipa, visine nasipa, trajanja velikih voda, vrste materijala i uticaja na nasip (talasi). Blaže kosine omogućavaju mehanizovano košenje, odnosno lakše i jeftinije održavanje. Glavni nasip obično ima nagib kosine prema vodi (spoljna ili nebranjena kosina) 1:2 do 1:4, dok je kosina prema branjenom području (unutrašnja/branjena kosina) 1:2 do 1:10. Letnji i sekundarni nasipi imaju nagib kosine prema vodi (nebranjena kosina) 1:2 do 1:3, a nagib kosina prema branjenom području (branjena kosina) 1:2 do 1:6.
- **Berme** (horizontalna proširenja na kosinama) se dodaju ukoliko je nasip viši od 3 m.

10.1.2.3 Materijali u telu nasipa

Tip poprečnog profila nasipa se definiše tako da telo nasipa bude što manje propusno za vodu. Ovo je posebno značajno kod većih vodotoka, na kojima poplavni talasi traju više dana, tako da je nepovoljno dejstvo vode na nasip izraženo.

Ako u blizini nasipa nema dovoljno vodonepropusnih materijala za izgradnju kompletnog tela nasipa (glina, ilovača), smanjenje vodopropusnosti se postiže ugradnjom više materijala različite vodopropusnosti (slika 10.6) ili ugradnjom delimično ili potpuno vodonepropusnog ekrana ili jezgra (slika 10.9).



Nasip izgrađen od koherentnog, materijala (A)

Nasip izgrađen od materijala različite propustljivosti

(A) peskovita glina

(B) glinoviti pesak

(C) pesak

(D) šljunak

Slika 10.6: Tipovi poprečnog preseka nasipa [32]

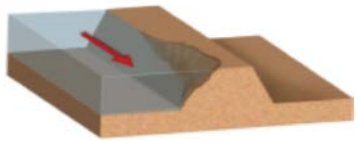
Materijal za izvođenje nasipa se najčešće kopa na inundacijama, iz "materijalnih rovova" neposredno ispred trase nasipa. Tu se najčešće nalazi samo rečni nanos – pesak i šljunak, koji je propustan za vodu kada se ugradi u telo nasipa. Ako je potrebno da se smanji vodopropusnost, glineni materijal se mora dovoziti sa daljeg pozajmišta.

10.1.2.4 Mere zaštite nasipa od nepovoljnih uticaja velike vode

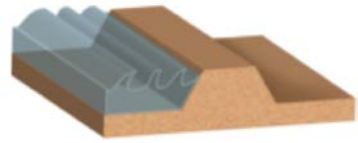
Nasipi su zemljane, nasute konstrukcije, osetljive na mnoštvo **nepovoljnih uticaja velikih voda** (slika 10.7). Dejstvo vode na nasip, koje dovodi do oštećenja i čak rušenja objekta, može biti hidrodinamičko i hidrostatičko.

U grupu **hidrodinamičkih uticaja** spadaju fluvijalna erozija (koja se javlja ukoliko je nasip nepovoljno trasiran), udari talasa od vetra i plovila, udari santi leda, kao i prelivanje.

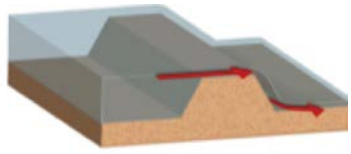
Hidrostatički uticaji nastaju usled razlike u pritisku između visokog nivoa vode u reci i niskog nivoa u branjenom području. Tada dolazi do proviranja vode kroz telo nasipa i tlo na kome je nasip fundiran, nastaju klizne ravni, sleganje nasipa, ispiranje sitnih čestica iz tela nasipa, kao i uzdizanje i pucanje nasipa koji je fundiran na tlu koje menja zapreminu sa promenom vlažnosti.



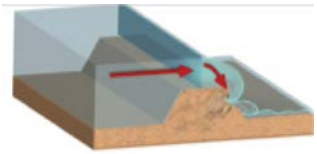
Oštećenje kosine nasipa fluvijalnom erozijom



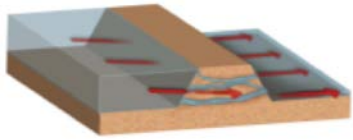
Oštećenje kosine nasipa dejstvom talasa



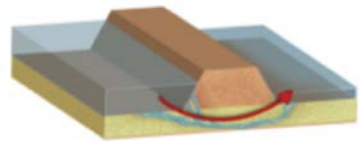
Oštećenje nasipa prelivanjem (mala visina mlaza)



Oštećenje nasipa prelivanjem (velika visina mlaza)



Proceđivanje vode kroz telo nasipa



Proceđivanje vode kroz temelj nasipa

Slika 10.7: Uzroci oštećenja i rušenja nasipa (Izvor: homepages.uc.edu)

Dejstvo vode na nasip traje različito, od nekoliko sati (na malim vodotocima bujičnog karaktera) do više dana pa i meseci (na velikim rekama) i od njegove dužine i karaktera zavisi koja će se rešenja primeniti radi smanjenja nepovoljnih uticaja vode na stabilnost nasipa.

Najkomplikovani inženjerski problem predstavljaju nasipi koji su stalno pod dejstvom vode (na primer nasipi akumulacija) i oni se projektuju po istim principima kao nasute brane.

Moguće **mere za sprečavanje negativnog dejstva toka na nasip** su brojne.

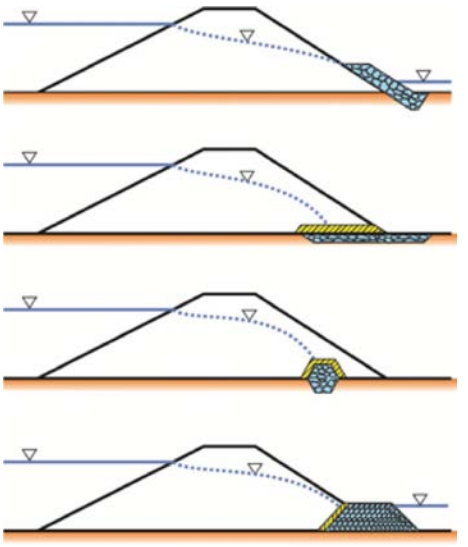
Ukoliko je nasip trasiran neposredno uz osnovno korito, negativno dejstvo toka na kosinu nasipa (fluvijalna erozija) se sprečava postavljanjem obloge od betonskih ploča, kamena, gabionskog madraca i dr. Po karakteristikama je obloga nasipa slična obaloutvrdi, a ima dimenzije prilagođene lokalnim uslovima.

Kontrolisano proviranje vode kroz nasip sprečava ispiranje sitnih čestica (sufoziju), koje može dovesti do rušenja objekta. U tom cilju se u nasip ugrađuju različite drenažne

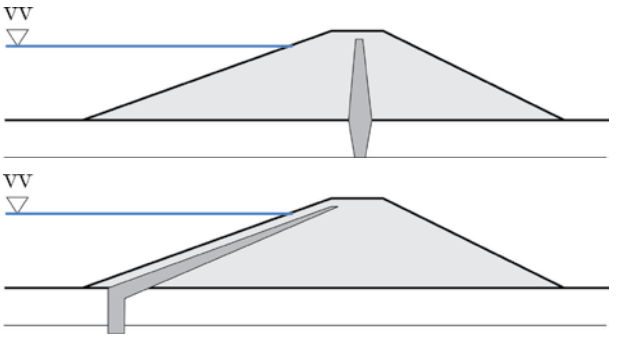
konstrukcije, koje imaju veću vodopropusnost, tako da se provirne vode usmere ka njima i kontrolisano izvedu iz tela nasipa (slika 10.8).

Proviranje vode kroz nasip se u velikoj meri sprečava izgradnjom vodonepropusne ili slabopropusne obloge, ekrana ili jezgra (slika 10.9).

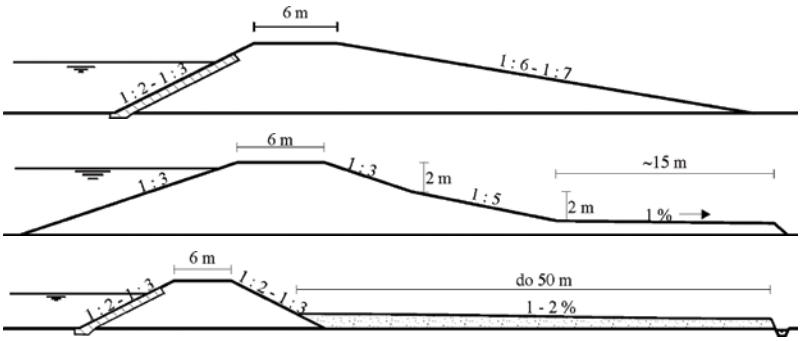
Ukoliko je tlo na kome se fundira nasip procedno, branjena kosina nasipa se radi u blagom nagibu, kako bi se povećalo telo nasipa i produžio put vode ili se u zaleđu nasipa izvodi **balast** od refulisanog materijala (boljih filtracionih karakteristika u odnosu na površinski sloj tla u zoni nizvodne kosine nasipa), kojim se produžava put procednih voda do zone dalje od nasipa, a zatim voda prikuplja malim drenažnim kanalom. Na slici 10.10 dati su primeri poprečnih profila nasipa duž većih aluvijalnih reka, koje odlikuje dugo trajanje poplavnih talasa, sa blagom branjenom kosinom ili balastom.



Slika 10.8: Drenažne konstrukcije na nasipu: (1) Obrnuti filtar, (2) Drenažni tepih, (3) Drenažna cev i (4) Drenažni nasip [31]



Slika 10.9: Poprečni preseci nasipa od nekoherentnog materijala sa vodonepropusnim jezgrom ili ekranom [31]



Slika 10.10: Primeri poprečnih profila glavnih nasipa (Izvor: IJČ)

10.1.2.5 Proračuni filtracione i statičke stabilnosti nasipa

Razarajuće dejstvo vode koje deluju na nasip i tlo ispod njega manifestuje se u vidu sledećih pojava: (1) lom tla u zaleđu uz nasip; (2) sufozija temeljnog tla sa branjene strane nasipa; (3) sufozija tela nasipa; (4) klizanje nasipa u celini; (5) klizanje branjene kosine i (6) klizanje nebranjene kosine.

Lom tla može nastati samo ako je pokrovni sloj vezan, tj. ako je kohezija ($c \neq 0$ kN/m^2) i postoji pozitivna razlika opterećenja:

$$p=\rho_v \cdot g \cdot h_v - \rho_p \cdot g \cdot t_p \tag{10-1}$$

gde je: h_v - dubina vode sa branjene strane nasipa (m), ρ_v – gustina vode, ρ_p - gustina materijala pokrovnog sloja, t_p - debljina pokrovnog sloja (m), g – gravitaciono ubrzanje.

Ako su u telu nasipa prisutni nevezani (nekoherentni) materijali, čiji granulometrijski sastav omogućava **sufoziju** pod uticajem filtracionih voda, pri pojavi kritičnog hidrauličkog gradijenta dolazi do ispiranja sitnijih čestica iz tela nasipa.

Dužina filtracije računa se po jednačini Kozeni-Casagrande:

$$d = l_0 - 0{,}7 \cdot h_v \cdot m_u \tag{10-2}$$

gde je: l_0 - osnova nasipa (m), h_v - dubina vode sa branjene strane nasipa (m), m_u - nagib uzvodne (nebranjene) kosine nasipa.

Hidraulički gradijent (i) iznosi:

$$i=\frac{h_v}{d} \tag{10-3}$$

i treba da bude manji od kritičnog gradijenta, koji zavisi od koeficijenta neravnomernosti materijala ugrađenog u nasip $U=d_{60}/d_{10,}$ gde su d_{60} i d_{10} – prečnici zrna nanosa zastupljenosti 60 odnosno 10% na granulometrijskoj krivoj.

Za proračun **sigurnosti na klizanje tela nasipa** po tlu neophodno je poznavanje ugla unutrašnjeg trenja (φ), kohezije (C) i gustine materijala (ρ) ugrađenog u nasip.

Klizanje tela nasipa nastaje pod dejstvom horizontalne sile E:

$$E = \frac{h_v^2}{2} \cdot \rho_v \cdot g \tag{10-4}$$

koja proizvodi smičući napon, sa maksimalnom vrednošću:

$$\max\tau = \frac{2 \cdot E}{l_0} \tag{10-5}$$

gde je l_0 širina stope nasipa:

$$l_0 = b + h_{nas} \cdot (m_u + m_n) \tag{10-6}$$

Otpor smicanju se računa iz:

$$\tau = \frac{(G_n + G_v - U) \cdot \operatorname{tg}\varphi}{l_0} + c \tag{10-7}$$

gde je: G_n – težina nasipa, G_v – težina stuba vode koji naleže na nebranjenu kosinu nasipa, m_u – nagib nebranjene (uzvodne) kosine nasipa, m_n – nagib branjene (nizvodne) kosine nasipa, U – sila uzgona:

$$U=\left(\frac{h_v-h}{2}\right)\cdot l_0\cdot\rho_v\cdot g \qquad (10\text{-}8)$$

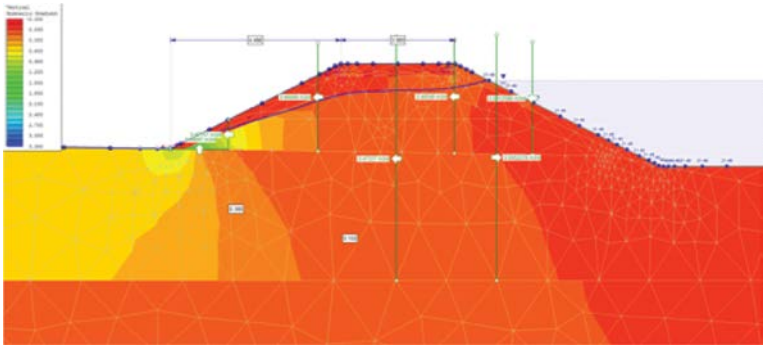
i mora biti veći od maksimalnog smičućeg napona da bi nasip bio siguran na klizanje, uz određen koeficijent sigurnosti.

Proračuni sigurnosti nasipa na klizanje branjene i nebranjene kosine nasipa se zasnivaju na principima mehanike tla.

Proračun stabilnosti nebranjene kosine na klizanje se često radi za slučaj naglog opadanja nivoa vode u reci, jer su u praksi zabeleženi takvi događaji (slika 10.11).

Obavezno se računa **položaj provirne linije i količina provirnih voda** za tipski poprečni profil nasipa (slika 10.12). Ukoliko je više različitih materijala ugrađeno u telo nasipa, za svaki se uzima u obzir odgovarajući koeficijent filtracije. Za proračune se sve češće koriste komercijalni softveri kao što je Rocksciense Slide.

Slika 10.11: Primer klizanja nebranjene kosine posle naglog spuštanja nivoa vode u reci (Izvor: homepages.uc.edu)



Slika 10.12:Hidraulički proračun provirnih voda kroz telo nasipa (Izvor: IJČ)

10.1.3 Održavanje nasipa

Održavanje nasipa je neophodna aktivnost, čiji se osnovni zadaci sastoje se u čuvanju objekta od svakodnevnog oštećenja (neovlašćenog saobraćaja, krađe zemlje i peska iz tela nasipa, krtičnjaci), obezbeđenju prohodnosti krune nasipa, redovnom košenju kosina, krčenju i košenju prinasipskog pojasa duž branjene i nebranjene nožice nasipa, održavanju zaštitnih obloga, održavanju čuvarnica i magacina sa deponovanom opremom, alatom i materijalom, održavanju nasipskih kapija (slika 10.13), graničnih belega i stacionažnih oznaka.

Slika 10.13: Dobro održavan nasip sa nasipskom kapijom (Izvor: IJČ)

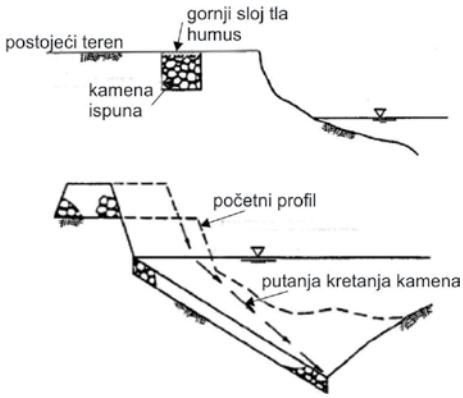
10.2 Zaštitni zid

Slika 10.14: Zaštitni zid (Izvor: water.weather.gov)

Zaštitni zid (slika 10.14) je objekat sa funkcijom zaštite od poplava, koji se gradi kada nema prostora za izgradnju nasipa ili na samom nasipu koji nema dovoljnu visinu iznad nivoa merodavne velike vode.

Najčešće su zaštitni zidovi armirano-betonski objekti, visine 1,0 – 1,5 m. U novije vreme se zaštitni zidovi kombinuju sa mobilnim elementima, koji se za njih vezuju.

10.3 Kamena deponija



Slika 10.15: Kamena deponija (Izvor: IJČ)

Kamena deponija (slika 10.15) je regulaciona građevina van glavnog korita, čija je namena stabilizacija obale na projektovanom položaju.

Izvodi se po projektovanoj trasi obale, izvan korita vodotoka. Kada se obala pomeri do deponije, deponija se ruši i nastaje obaloutvrda. Kamenu deponiju čini naslagan krupan kamen u količini koja je dovoljna za formiranje obaloutvrde. Može biti ukopana ili na površini terena.

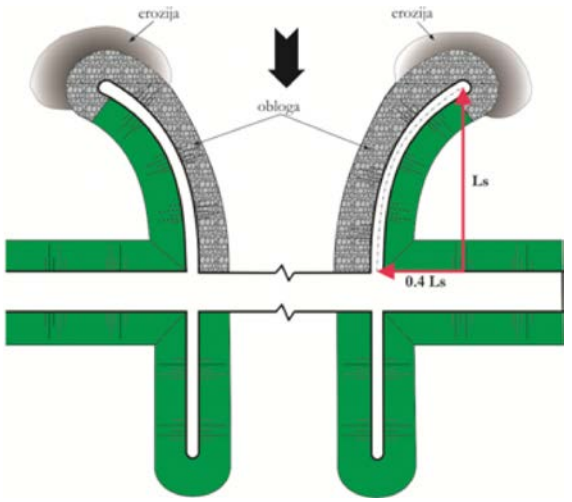
10.4 Usmeravajući nasip

Za kontrolu erozije obala u zonama mostova ili drugih važnih objekata na većim rekama, posebno ukoliko reku odlikuje razuđen tok i stalne promene rečne trase, grade se veliki objekti za usmeravanje toka kroz mostovski otvor (engl. guide bund). To se radi ukoliko je previše skupo graditi kilometrima dugu konstrukciju, koja bi na stubovima premostila ceo poprečni profil, tako da se rade nasuti pristupni putevi i mostovski profil sa usmeravajućim nasipima. Ovi objekti, koncentracijom toka kroz most, štite pristupne puteve od oštećenja pri velikim vodama.

Usmeravajući nasipi su specijalno oblikovani u planu: postavljaju se paralelno ili približno paralelno sa pravcem toka, uzvodno i nizvodno od mosta. Mogu se graditi sa jedne strane ili sa obe strane mosta (slika 10.16), zavisno od konfiguracije rečne doline.

Generalno, sastoje se uzvodne zakrivljene glave (oblik četvrtine elipse), nizvodne glave (koja ne mora da bude zakrivljena) i nasipa koji ih povezuje. Nije dozvoljeno njihovo prelivanje, tako da je kruna viša od nivoa velike vode za potrebnu zaštitnu visinu. Širina u kruni treba da bude dovoljna za inspekciju i popravke, tako da se ne preporučuje da bude manja od 3 m. Kosine prema vodi se moraju obložiti, dok se druga kosina zatravljuje.

Ove veoma velike i skupe objekte treba stalno održavati. Njihovu izgradnju opravdava to što značajno smanjuju rizik od oštećenja ključne infrastrukture.



Slika 10.16: Usmeravajući nasipi sa obe strane mosta (Izvor: arhiva IJČ)

11 REGULACIONE GRAĐEVINE U REČNOM KORITU

U okviru projekata uređenja osnovnog korita na dužim deonicama primenjuje se više vrsta regulacionih građevina, kako bi se njihovim kombinovanim dejstvom ostvarili planirani ciljevi. Najčešće se koriste obaloutvrde, naperi i paralelne građevine.

Često se, međutim, regulacione građevine izvode na kraćim deonicama vodotoka, u sklopu drugih objekata – mostova, vodozahvata, crpnih stanica itd. Ovakvi, lokalni regulacioni radovi imaju za cilj da obezbede objekte od nepovoljnih uticaja vodotoka, kako u toku građenja, tako i u eksploataciji.

11.1 Obaloutvrda

Obaloutvrda je paralelna regulaciona građevina u koritu vodotoka kojom se obala štiti od erozije. Gradi se najčešće na konkavnoj obali vodotoka, retko na obe obale duž pravolinijske deonice, kao i u naseljima u okviru regulacije "gradskog" tipa. Kruna obaloutvrde je najčešće na nivou obale (nivo srednje velike vode ili punog korita vodotoka).

U principu se obaloutvrda gradi duž postojeće obale. Međutim, često je potreban određen obim radova da se promeni odnosno ispravi oblik poprečnog profila ili linije obale, čime se omogućava izvođenje objekta sa adekvatnom trasom i kotama. Ukoliko su potrebne velike promene obale bolje je primeniti prave paralelne građevine.

Izbor tipa obaloutvrde zavisi od mnogo parametara:

1. geometrijskih karakteristika obale i trase rečnog toka,
2. geomehaničkih svojstava materijala obale,
3. hidrološko-hidrauličkih karakteristika toka (režim vodostaja - intenzitet i učestalost oscilacija nivoa, raspored, intenzitet i smer brzine toka u zoni obaloutvrde),
4. karakteristika režima rečnog nanosa,
5. dejstva talasa i leda,
6. ambijenta u kome se gradi (klasična ili naturalna regulacija),
7. raspoloživog materijala i radne snage, i
8. finansijskih mogućnosti investitora.

11.1.1 Tipovi obaloutvrda

Osnovna podela obaloutvrda je na vertikalne i kose.

Vertikalne obaloutvrde (slike 11.1 i 11.2) imaju zadatak da horizontalna opterećenja prenesu na tlo. Mogu biti gravitacione konstrukcije (grade se od betona i armiranog betona, gabiona, armirane zemlje) ili razni zidovi, šipovi i dijafragme od armiranog betona ili čelika. Znatno su skuplje nego kose obaloutvrde i primenjuju se uglavnom u specijalnim slučajevima (luke, pristaništa, marine, kanali) ili kada prostorna ograničenja ne dozvoljavaju izvođenje kose obaloutvrde.

Slika 11.1: Vertikalna obaloutvrda od gabiona (Izvor: gabion1.co.uk)

Slika 11.2: Vertikalna obaloutvrda od čeličnih talpi (Izvor: maritimece.com)

Konstruktivno gledano, vertikalne obaloutvrde spadaju u grupu potpornih konstrukcija. Za dimenzionisanje vertikalnih obaloutvrda se primenjuju standardni postupci iz mehanike tla i fundiranja.

Kose obaloutvrde su isključivo regulacione građevine, koje odlikuje jednostavna konstrukcija i niža cena izvođenja. U ovu grupu spada velika lepeza objekata, od jednostavne zaštite obale biljnim materijalom do kejskog zida sa platoom za rekreaciju, ali svaki ima tri osnovna elementa:

- **Nožica** je oslonac konstrukcije, koji se nalazi u samom rečnom koritu i u svim uslovima je izložena dejstvu vode.
- **Posteljica** ima višestruku ulogu, ali pre svega predstavlja prelaz između krupnog materijala u oblozi i finog materijala u podlozi. Posteljica obezbeđuje filtraciju, dreniranje, zaštitu od ispiranja tokom paralelnim sa kosinom, izravnavanje temeljnog tla (služi kao temelj za ugradnju obloge), odvajanje konstrukcije od temeljnog tla, sekundarnu zaštitu u slučaju gubitka dela obloge i disipaciju energije unutrašnjeg toka vode.
- **Obloga** štiti konstrukciju od erozionog dejstva vode (strujanje, talasi), treba da bude vodopropusna i fleksibilna (prilagodljiva deformacijama). Za oblogu se koriste najrazličitiji materijali (slika 11.3), od biljnih materijala (busen, poplet, fašine) do obloga od kamena, prefabrikovanih betonskih elemenata, gabiona, asfalta i dr.

U slučaju vodotoka sa oscilacijama nivoa do 5-6 m, na obaloutvrdi se projektuje berma, koja doprinosi stabilnosti objekta, a u naseljima ima i ulogu staze za šetnju. Širina berme je 1-4 m.

11.1.2 Izbor tipa kose obaloutvrde

Izbor tipa kose obaloutvrde zavisi od položaja i namene (gradska ili poljska regulacija), uslova na terenu i raspoloživih sredstava.

U izboru tipa obaloutvrde koriste se rezultati hidrauličkog proračuna, jer ona treba da izdrži uticaj rečnog toka u uslovima "merodavnog" protoka. U tabeli 11.1 date su okvirne vrednosti maksimalne dozvoljene brzine i tangencijalni naponi za pojedine tipove obaloutvrda.

a) Gabionski madrac (Izvor: salixrw.com)

b) Lomljeni kamen (Izvor: stanilov.bg)

c) Fleksibilni madrac od polimera (Izvor: geosynthetica.net)

d) Betonski blokovi (Izvor: rpcltd.co.uk)

Slika 11.3: Različiti tipovi obloge kosih obaloutvrda

Tabela 11.1: Okvirne vrednosti maksimalne dozvoljene brzine i tangencijalni naponi [32]

Tip obaloutvrde		Dozvoljeni tangencijalni napon (N/m^2)	Dozvoljena brzina (m/s) pri srednjoj dubini toka (m)		
			1.0	2.0	3.0
Obloga od busena		20,0	0,8	1,0	1,1
Poplet od šiblja sa ispunom od šljunka		15,0			
Obloga od fašina		70,0	3,0	3,5	-
Jednoslojni kameni nabačaj (u zavisnosti od krupnoće kamena)		250,0	1,0-4-0	1,1-4,5	1,3-4,7
Dvoslojni kameni nabačaj (u zavisnosti od krupnoće kamena)		300,0	1,1-4,5	1,2-5,0	1,5-5,0
Jednoslojna obloga od kamenih blokova na šljunku debljine 10 cm. Krupnoća kamena:	15 cm	250,0	3,0	3,5	4,0
	20 cm		3,5	4,0	4,5
	25 cm		4,0	4,5	5,0
Dvoslojna obloga od kamenih blokova na sloju šljunka debljine 10 cm – krupnoća donjeg sloja kamena je 15 cm, a površinskog 20 cm		400,0	4,5	5,0	5,5
Fašinski madrac debljine 50 cm		7,0-100,0	3,0	3,5	4,0
Obloga od gabiona (ne manjih dimenzija od 0.5 x 0.5 x 1.0 m)		150,0 – 250,0	5,0	5,5	6,0
Betonska obloga	MB 30		8,0	9,0	10,0
	MB 20		7,0	8,0	9,0
	MB 15		6,0	7,0	7,5
Obloga od armirano-betonskih ploča, dimenzija	1,0 x 1,0 x 0,10 m		-	2,5	-
	1,0 x 1,5 x 0,15 m		-	5,0	-
	1,5 x 2,0 x 0,20 m		-	8,0	-

11.1.3 Konstrukcija kose obaloutvrde

11.1.3.1 Nožica obaloutvrde

Nožica je oslonac cele konstrukcije, koji se radi od kamenog nabačaja, gabiona itd. Nožica od kamena gradi se pod vodom (direktnim istovarom kamena), osim krune koja se gradi iznad nivoa radne vode (trajanja 2-3 meseca godišnje). Kruna se oblikuje ručno ili mašinski (roliranje kosine), radi definisanja pravilnog geometrijskog oblika. Dimenzije nožice se određuju iz uslova stabilnosti na klizanje i vodeći računa o maksimalnoj dubini erozije koja se očekuje po završetku regulacionih radova.

Stabilnost nožice je postignuta ako je njena težina pod vodom ($G_{N'}$) u ravnoteži sa težinom obloge, uz faktor sigurnosti Fs:

$$F_s = \frac{(F \cdot \sin\alpha + G_N^{'}) \cdot f}{F \cdot \cos\alpha} \geq 1{,}5 \qquad (11\text{-}1)$$

gde je:

$$G_N^{'} = \rho^{'} g A_N \qquad (11\text{-}2)$$

G_N' – težina nožice pod vodom (N), A_N – površina nožice (m^2), ρ' – zapreminska masa kamena pod vodom (t/m^3)

$$F = G^{'} \sin\alpha - f G^{'} \cos\alpha \qquad (11\text{-}3)$$

F – sila kojom kamena obloga deluje na nožicu (N), f'– koeficijent trenja čvrstih materijala pod vodom (f ' = 0,30)

$$G^{'} = \rho^{'} V g \qquad (11\text{-}4)$$

G' – sila težine kamene obloge pod vodom (N), V – zapremina kamene obloge (m^3), ρ' – zapreminska masa kamena pod vodom (t/m^3)

$$\rho^{'} = (1+W_z)\,\rho_k - \rho$$
$$\rho_k = (1-n_k)\,\rho_s \qquad (11\text{-}5)$$

W_z - vlažnost zasićenog kamena, ρ_k – zapreminska masa kamena (t/m^3), ρ_s – zapreminska masa kamena (t/m^3), ρ – zapreminska masa vode (t/m^3), n_k – poroznost kamena.

11.1.3.2 Podloga nožice obaloutvrde

Ispod nožice se postavlja podloga nožice, da bi prenela opterećenje od konstrukcije na slabo nosivo rečno dno. Podloga može biti: fašinski madrac, ojačani geotekstil, sloj krupnijeg šljunka, tucanika ili sitnijeg kamenog nabačaja.

Obavezno je da se predvidi prepust u rečni tok, pri čemu je dužina prepusta dovoljna da nožica može da podnese opštu ili lokalnu eroziju, a da ne dođe do deformacije nožice. Ukoliko se očekuje značajna erozija, potrebno je postaviti nožicu u rov iskopan u rečnom dnu.

Podloga od šljunka, tucanika ili kamena se formira u dva sloja: sitniji materijal se polaže na rečno dno, a krupniji preko njega (da bi se sprečila migracija čestica dna kroz podlogu).

11.1.3.3 Filtarski sloj

Filtar se postavlja između obloge i posteljice, da bi se sprečilo ispiranje sitnih čestica iz posteljice. Radi se od granuliranog šljunka ili geotekstila.

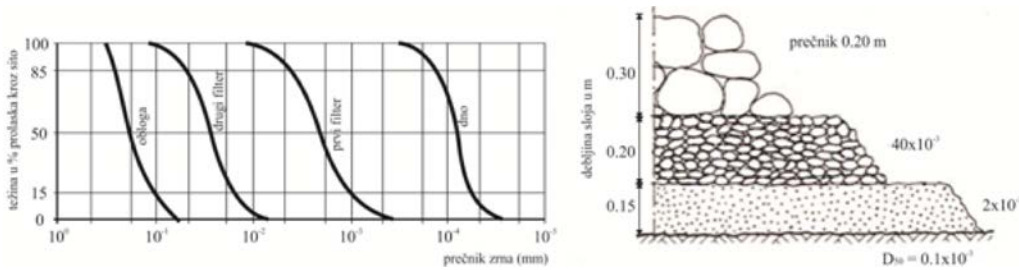
Filtar od šljunka se formira se od prirodnog materijala u slojevima (slika 11.4), pri čemu je osnovni kriterijum da čestice iz donjeg sloja ne prodiru kroz sledeći sloj. Filtar mora da ispuni više uslova:

- da bude vodopropustljiviji od materijala u posteljici/zaleđu građevine,
- da ima takav granulometrijski sastav da čestice iz zaleđa ne prodiru u filtar i da zrna filtra ne prolaze kroz spojnice u oblozi. Takođe, granulometrijski sastav filtra treba da bude takav da ne dozvoli kolmaciju filtra sitnim česticama koje se filtracionim tokom iznose iz zaleđa,
- da ima dovoljnu debljinu, koja obezbeđuje da je u samom filtru moguće formiranje skeleta čestica koji će opterećenje od obloge preneti na zaleđe bez deformacije filtra, kao i normalno ugrađivanje i postizanje uniformnog kvaliteta i po površini i po debljini. Najčešće je filtar debljine 15 do 25 cm ili ½ debljine obloge.

Granulacija čestica u šljunčanom filtru mora da zadovolji sledeće „filtarske" uslove:

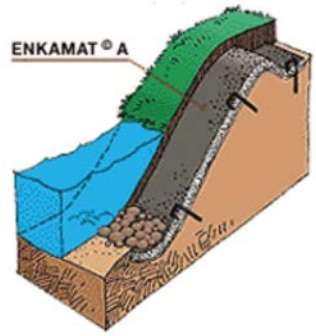
$$\frac{d_{50(filtar)}}{d_{50(tlo)}} \le 25 \qquad 5 < \frac{d_{15(filtar)}}{d_{15(tlo)}} \le 40 \qquad \frac{d_{15(filtar)}}{d_{85(tlo)}} < 5 \qquad (11\text{-}6)$$

Ako taj odnos nije moguće postići, radi se filtar u dva sloja. Dok je debljina jednoslojnog filtra 150 – 380 mm, debljina svakog sloja dvoslojnog filtra treba da bude 100 – 200 mm.



Slika 11.4: Granulometrijski sastav šljunčanog filtera [25]

Geotekstili se koriste kao deo filtra, uz postavljanje granularnog filtra ili bez njega. Pri izboru filtra od geotekstila (slike 11.5 i 11.6) koriste se specifikacije proizvođača. Treba voditi računa o migraciji čestica kroz geotekstil, zapušavanju pora u geotekstilu, čime se smanjuje početna vodopropusnost i migraciji čestica paralelno ravni geotekstila (samo u slučaju mulja do sitnog peska).



Slika 11.5: Filter od geotekstila (Izvor: ls-group.org)

Slika 11.6: Postavljanje geotekstila (Izvor: tencate.com)

Generalno filtar mora da zadovolji funkcionalne zahteve, zahteve izvođenja (posebno je problematično postavljanje geotekstila ili granularnog filtra ispod vode) i zahteve za trajnost, odnosno dovoljnu otpornost tokom izvođenja i trajanja objekta. Ispod vode se ne postavljaju višeslojni granularni filtri, već najčešće kompozitni filtri koji se sastoje od geotekstila i granularnog sloja.

11.1.3.4 Obloga od kamena

Obloga od kamena može biti:

1. kameni nabačaj (nema nikakvog naknadnog doterivanja istovarenog kamena – slika 11.7),
2. rolovani kamen (položaj pojedinih blokova se doteruje ručno ili čakijama),
3. ručno slagani kamen - sa otvorenim spojnicama (slika 11.8) ili zatvorenim spojnicama, zalivenim cementom (slika 11.20) ili asfaltom, ili
4. ploče od tesanog kamena.

Slika 11.7: Kameni nabačaj
(Izvor: allamakeeswcd.org)

Slika 11.8: Ručno slagan kamen
(Izvor: privatna komunikacija)

Nagib kosine na koju se polaže kamena obloga je od 1:1.25 do 1:2. Debljina obloge je 1,5 do 2 srednjeg prečnika kamena.

Krupnoća kamena ili dimenzije betonskih elemenata u oblozi se određuju na osnovu sledećih uticaja: (a) brzine vode (više obrazaca, nomogrami), (b) delovanje talasa (više obrazaca, nomogrami), (c) delovanje leda, (d) udari plovila, (e) seizmički uticaji.

Krupnoća kamenih blokova stabilnih na uticaj strujanja vode određuje se pomoću obrasca **Izbaša** (Isbash, 1936) [26]:

$$d_{50} \geq \frac{\eta}{\Delta \cdot \kappa} \cdot \frac{V^2}{2g} \qquad (11\text{-}7)$$

gde su: d_{50} - prečnik kamenog bloka 50% zastupljenosti u nabačaju (m), V - srednja profilska brzina (m/s), η – empirijski koeficijent koji zavisi od intenziteta turbulencije (η=0,2 mala turbulencija; η=0,5 do 0,7 normalna turbulencija; η=1,4 velika turbulencija), g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2), Δ - relativna zapreminska masa kamena, κ – koeficijent koji se određuje pomoću izraza:

$$\kappa = \cos\theta \cdot \left(1 - \frac{tg^2\theta}{tg^2\beta}\right) \qquad (11\text{-}8)$$

gde je: θ - ugao koji kosina obale zaklapa sa horizontalom, β - ugao unutrašnjeg trenja kamenog nabačaja (45°).

Obloga od kamenog nabačaja se formira u dva sloja, ukupne debljine:

$$d_{KO}=(1{,}5 \text{ do } 1{,}8)\cdot d_{100}$$

Za dimenzionisanje obloge se može koristiti obrazac **Pilarčika** (Pilarczyk, 1995) koji je izveden dodavanjem specijalnih faktora i koeficijenata formulama Izbaša (Izbash) i Šildsa (Shields):

$$d = \frac{\Phi_s}{\Delta} \cdot \frac{0{,}035}{\psi_{kr}} \cdot k_b \cdot k_n^{-1} \cdot k_t^2 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \qquad (11\text{-}9)$$

gde je: d – karakteristična veličina elementa, Φ_s – faktor stabilnosti, Ψ_{kr} – parametar pokretljivosti kamena ili drugog elementa, k_t – faktor turbulencije, k_b – faktor brzine, k_n – faktor nagiba kosine. Vrednosti faktora su date u tabeli 11.2.

Tabela 11.2: Vrednosti koeficijenata u obrascu Pilarčika

Karakteristična veličina elementa (d)	- lomljeni kamen i kameni nabačaj: $d \approx 0{,}84 d_{50}$ (m) - gabioni i gabionski madraci: D=debljina elementa (m)
Relativna gustina (Δ)	- kameni nabačaj i lomljeni kamen $\Delta = \rho_s/\rho - 1$ - gabioni i gabionski madraci $\Delta = (1-\lambda)(\rho_s/\rho - 1)$, gde je λ poroznost sloja ($\lambda \approx 0{,}4$)
Parametar pokretljivosti (Ψ_{kr})	- kameni nabačaj i lomljeni kamen $\Psi_{kr} = 0{,}035$ - gabioni i gabionski madraci $\Psi_{kr} = 0{,}070$ - kamena ispuna gabiona $\Psi_{kr} < 0{,}100$
Faktor stabilnosti (Φ_s)	- izložene ivice gabiona ili madraca $\Phi_s = 1{,}00$ - izložene ivice kamenog nabačaja i lomljenog kamena $\Phi_s = 1{,}50$ - kontinualna kamena zaštita $\Phi_s = 0{,}75$ - uklješteni ili kablovima povezani blokovi $\Phi_s = 0{,}50$
Faktor turbulencije (k_t)	- normalan nivo turbulencije $(k_t)^2 = 1{,}00$ - nejednoliko tečenje, povećana turbulencija uz konkavnu obalu $(k_t)^2 = 1{,}50$ - nejednoliko tečenje, oštra krivina $(k_t)^2 = 2{,}00$ - nejednoliko tečenje, povećana turbulencija usled kretanja brodova i dr. $(k_t)^2 > 2{,}00$
Faktor brzine (k_b)	Potpuno razvijen logaritamski profil brzine: $k_b = \frac{2}{\log^2(1 + \frac{12 \cdot h}{k_s})}$ gde je: h - dubina vode (m), k_s – visina rapavosti; $k_s = 1$ do 3d kod lomljenog kamena i kamenog nabačaja; ako je $h/d < 5$ usvojiti $k_b = 1$ Profil brzine nije razvijen: $k_b = \left(1 + \frac{h}{d}\right)^{-0{,}2}$
Faktor nagiba kosine (k_n)	$k_n = k_k \cdot k_1$ $k_k = (1 - (\sin^2\alpha / \sin^2\phi))^{0{,}5}$ $k_l = \sin(\phi - \beta)/(\sin\phi)$ α - ugao kosine obale (°), ϕ - ugao unutrašnjeg trenja kamenog nabačaja (°), β - ugao podužnog pada (°)

Eskarameja i Mej (Escarameia, May, 1992) su predložili jednačinu baziranu na Izbaševom izrazu, u kojoj su efekti turbulencije toka potpuno kvantifikovani. Ova formula je posebno korisna za uslove gde je turbulencija jača nego normalno: u blizini regulacionih građevina, kod mostovskih stubova, zagata, nizvodno od ustava, preliva, propusta, kao i kada su prisutne nagle promene dna korita. Razvijena je na osnovu eksperimenata i koristi se za obale koje nisu strmije od 1:2. Srednji nominalni prečnik kamena u oblozi (d_{n50}) određuje se iz:

$$d_{n50} = C_T \cdot \frac{V_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta} \qquad (11\text{-}10)$$

gde je: C_T – koeficijent turbulencije, V_b – brzina toka u blizini dna, koja se definiše na 10% dubine vode (m). Vrednosti faktora su date u tabeli 11.3.

Tabela 11.3: Uputstva za primenu obrasca Eskarameja i Mej

Srednji nominalni prečnik d_{n50}	- lomljeni kamen $d_{n50}=(M_{50}/\rho_s)^{1/3}$ (m) - gabionski madrac d_{n50}=veličina kamena u madracu
Koeficijent turbulencije C_T	- lomljeni kamen (važi za r ≥0,05) C_T=12,3·r-0,2 - gabionski madrac (važi za r ≥0,15) C_T=12,3·r-1,65 - gde je: r – intenzitet turbulencije prema Tabeli 11.4
Brzina toka u blizini dna V_b	- ako ne postoji podatak merenja usvaja se V_b=0,74 do 0,90 V

Tabela 11.4: Tipični nivo turbulencije

	Nivo turbulencije	
	Kvalitativni opis	Intenzitet turbulencije (r)
Pravolinijske rečne ili kanalske deonice	normalan (nizak)	0,12
Krajevi obaloutvrda na pravolinijskim deonicama	normalan (visok)	0,20
Mostovski stubovi, naperi, prelazne deonice	srednji do visok	0,35 do 0,50
Nizvodno od hidrauličkih objekata	veoma visok	0,60

11.1.3.5 Obloga od betona

Obloga od betona može biti od:

1. montažnih betonskih blokova, koji su slobodno položeni na kosinu (slike 11.9 i 11.10),
2. uklještenih betonskih blokova (slika 11.11) ili
3. užadima povezanih betonskih blokova (slika 11.12), koji se postavljaju u vidu kompletnih madraca (slike 11.13 i 11.14).

Slika 11.9: Slaganje betonskih blokova na filtar od geotekstila (Izvor: IJČ)

Slika 11.10: Izgled završene obloge od betonskih blokova (Izvor: privatna komunikacija)

Slika 11.11: Obloga od uklještenih betonskih elementata na podlozi od šljunka (Izvor: trilockblock.com)

Slika 11.12: Obloga od užadima povezanih betonskih blokova (Izvor: externalworksindex.co.uk)

Slika 11.13: Postavljanje fleksibilne betonske obloge na filtar od geotekstila (Izvor: pipelinemats.biz)

Slika 11.14: Fleksibilna betonska obloga u zoni mosta (Izvor: conteches.com)

11.1.3.6 Druge vrste obloge

U novije vreme se za oblogu koriste različite vrste **geotekstila** (slika 11.15), kao što su: zatravljeni kompozitni madraci, trodimenzionalni madraci, mreže i dvodimenzionalne mreže.

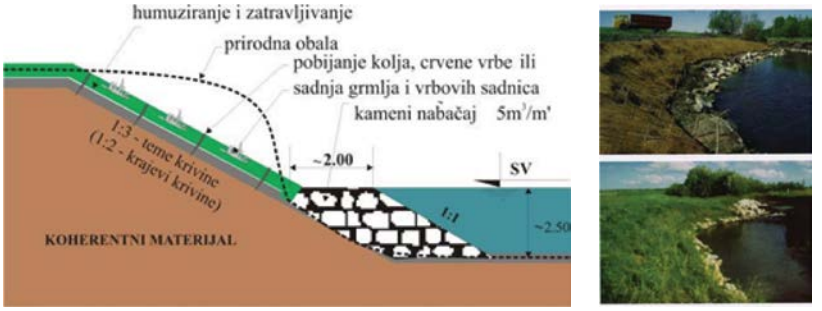
Slika 11.15: Ruševna visoka obala zaštićena zatravljenim kompozitnim madracem (Izvor: geosynthetica.net)

Sve češće se koristi obloga od **gabiona i gabionskih madraca** (slike 11.16 i 11.17), uglavnom za "poljske" regulacije ili sanaciju ruševnih obala. Debljina obloge se određuje primenom empirijskih obrazaca. Mora se voditi računa o stabilnosti konstrukcije obloge na obali u nagibu, trajnosti žice od koje je formirano telo gabiona i dimenzijama ispune gabiona.

Slika 11.16: Gabionski tepih (reno madrac) na obali vodotoka (Izvor: gabionmattress.net)

Slika 11.17: Postavljanje gabionskog tepiha (Izvor: gabionmattress.net)

Obaloutvrda sa **oblogom od biljnih materijala** (slika 11.18) koristi se u "naturalnoj" regulaciji. Obavezan deo obaloutvrde je nožica od kamenog nabačaja.



Slika 11.18: Obloga od biljnog materijala (Izvor: IJČ)

11.1.3.7 Nagibi obloge i prelazne deonice

Maksimalni nagibi obloge su sledeći:

- kosine obložene kamenom iznad vode 1:1,5
- kameni nabačaj ispod vode 1:3 do 1:4
- zatravljena kosina 1:6 do 1:10.

Nagib kosine obaloutvrde treba da bude što strmiji da bi se smanjila količina kamena. Međutim, za strmiji nagib potreban je krupniji kamen i samim tim veća debljina obloge. Takođe, penjanje talasa uz strmiju kosinu je izraženije pa se može javiti erozija. Manji nagibi se preporučuju u zonama rizika od zemljotresa ili gde je moguće naglo sniženje nivoa vode.

Najpovoljnije je da cela obaloutvrda ima istu oblogu. Međutim, kod visokih objekata se često kombinuju materijali da bi se smanjila cena (na pr. kamena obloga do nivoa određenog trajanja u prosečnoj godini, humuziranje i zatravljivanje do visoke obale).

Berma je potrebna kod visokih objekata da bi se povećala ukupna stabilnost. Ona može predstavljati prelaz između delova obaloutvrde na kojima se primenjuju različiti materijali ili tehnike izvođenja. Pored toga, berma smanjuje dejstvo talasa na objekat.

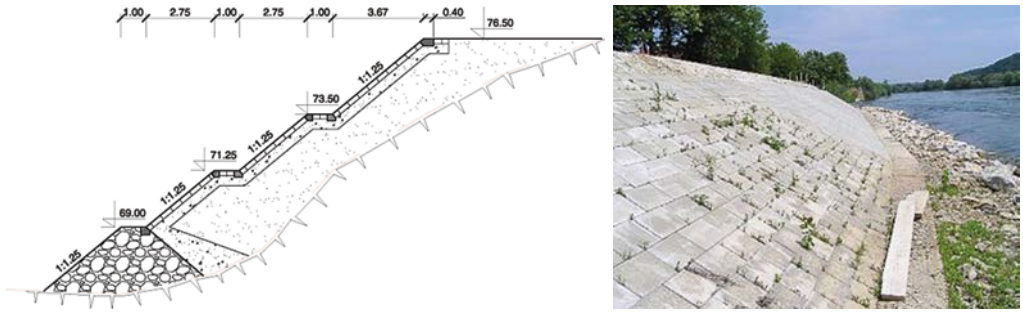
Položaj i širina berme zavise od njene osnovne funkcije. Široke berme se koriste na velikim objektima radi lakšeg pristupa u cilju inspekcije i održavanja. U ovom slučaju kota berme treba da bude iznad kote nivoa vode trajanja 2-3 meseca u prosečnoj godini, a širina dovoljna da omogući pristup i rad mehanizacije.

Prelazne zone su zone između različitih tipova obloge, kod nožice, berme i krune. One su često slabe tačke na kojima se pojavljuje početno oštećenje obaloutvrde. To je najčešće odronjavanje kamena, infiltracija filterskog materijala iz jednog sloja u drugi, ispiranje finih materijala kroz spojnice itd. Stoga se prelazne zone ojačavaju, zavisno od slučaja: (a) povećanjem debljine obloge (b) cementiranjem kamena ili (c) izvođenjem betonskih greda.

Neophodni prelazni elementi obaloutvrde od slaganih betonskih ploča ili kamenih blokova su:

- uporna greda, na koju se oslanja obloga i
- završna greda, koja završava oblogu i sprečava podlokavanje obloge u periodu povlačenja velike vode u osnovno korito.

Uporna i završna greda (slika 11.19) se rade od kamenih blokova ili armiranog betona.



Slika 11.19: Uporna i završna greda obaloutvrde (Izvor: IJČ)

11.1.4 Projektovanje i izgradnja obaloutvrde

Projektovanje obaloutvrde se sastoji iz sledećih koraka:

- Ispitivanje otpornosti obale na eroziju, radi definisanja zone koju treba zaštititi obaloutvrdom;
- Dimenzionisanje obloge, koja treba da obezbedi stabilnost objekta pod uticajem rečnog strujanja i talasa od vetra i plovila;
- Izbor materijala (dimenzije i trajnost);
- Dimenzionisanje filtra. U principu se koriste granularni filteri između podloge i obloge, ali je moguća i kombinacija sa geotekstilom;
- Dimenzionisanje nožice i prelaznih zona.

Pre početka izvođenja, neophodno je uraditi projekat organizacije građenja (definišu se uslovi transporta, snabdevanje gradilišta energijom, metode građenja, mehanizacija, radna snaga, količine građevinskog materijala, dinamika rada s obzirom na trajanje "radne vode", organizacija gradilišta...).

Izgradnja obaloutvrde ima više faza, koje zavise od tipa obaloutvrde i njenog položaja u odnosu na postojeću obalu (da li se regulaciona linija useca u postojeću obalu ili se mora nasuti teren do regulacione linije).

Na primer, faze gradnje obaloutvrde sa oblogom od kamena ili betona (slika 11.20), po regulacionoj liniji koja je pomerena od postojeće obale ka vodi, su sledeće: (1) obeležavanje

geometrijskih karakteristika buduće regulisane obale; (2) polaganje podloge za nožicu obaloutvrde; (3) izrada nožice obaloutvrde (mašinsko nasipanje do nivoa radne vode, a zatim mašinsko ili ručno slaganje kamena i oblikovanje krune); (4) formiranje filtra iza tela nožice; (5) nasipanje/planiranje kosine posteljice; (6) formiranje filtra ispod obloge; (7) izvođenje uporne grede obloge; (8) izgradnja obloge i (9) izrada završnog venca.

Slika 11.20: Izgradnja obaloutvrde na reci Ibar u Kraljevu (Izvor: IJČ)

11.1.5 Održavanje obaloutvrde

Održavanje obaloutvrde obuhvata redovne mere (osmatranje konstrukcije i redovno održavanje - tekuće popravke) i vanredne mere u toku i nakon izuzetno nepovoljnih hidrološko-meteoroloških prilika (velike vode, ledostaj, ledohod), koje obuhvataju praćenje stanje i sanaciju oštećenja (slike 11.21 i 11.22).

Slika 11.21: Sanacija oštećene obaloutvrde (Izvor: IJČ)

Slika 11.22: Ispiranje filtarskog sloja dovodi do rušenja obloge (Izvor: IJČ)

Rekonstrukcija obaloutvrde je potrebna ako u vodotoku dođe do značajnih izmena hidrološkog i hidrauličkog režima ili kada se promeni namena regulisane obale, pa postojeća konstrukcija više ne odgovara novim uslovima.

Dobro projektovan objekat bi trebao da izdrži sve uticaje reke, ali postoje i drugi uzroci oštećenja (tabela 11.5).

Tabela 11.5: Uzroci oštećenja obaloutvrda [76]

Uzrok		Efekat	Mera
Abrazija	plivajući led i nanos	• udarac u visini nivoa vode • pomeranje kamena • probijanje membrana	• objekat otporan na udar • omogućiti laku popravku • promeniti pravac toka
	kretanje nanosa pri velikim vodama	• habanje delova nožice (izloženi geotekstil i gabionske korpe)	• ugraditi zaštitni sloj • izbeći gabione
	led	• smičuća sila deluje na površinski sloj dok se se led podiže uz obaloutvrdu	• u projektu uzeti u obzir uticaj leda
Biološki uticaji	stoka	• tokom napasanja uništava biološku zaštitu	• ugraditi zaštitu tla
	štetočine	• ukopavaju se u obalu • progrizaju geotekstile	• kontrola štetočina • obezbediti neprobojni gornji sloj
	rast biljaka	• korenje menja geometriju gornjeg sloja	• kontrola biljaka (hebricidi, košenje i dr.)
	alge	• površinska oštećenja asfaltne obloge	• prskanje bitumenom
	mikrobi	• napadaju neka prirodna vlakna	• koristiti otporne materijale
Hemijski uticaji	ulja i hidrokarbonati	• razgrađuju bitumen	• izbeći kontakt
	sulfati	• razgrađuju beton	• koristiti cement otporan na sulfate
	druge agresivne soli	• korozija čelične žice i kablova	• zaštititi galvanizacijom i/ili plastifikacijom • koristiti deblje ili nerđajuće žice/ kablove
Temperatura	mraz	• formiranje kristala leda u podlozi vodi do promene geometrije obloge	• upotreba nekapilarnih materijala u zoni pod uticajem mraza
	ekstremno niske temperature	• geotekstil postaje krt	• proveriti raspon radnih temperatura za geotekstil
	visoke temperature	• tečenje geotekstila • slivanje bitumenskih materijala niz kosine • ubrzano raspadanje kamena	• proveriti raspon radnih temperatura za materijale i očekivana oštećenja
	zamrzavanje/ otapanje	• krunjenje kamena ili betona	• koristiti kamen odgovarajućeg kvaliteta
Uticaj ljudi	vandalizam ili krađa	• sečenje i odnošenje geotekstila • sečenje kablova i žice gabiona • uklanjanje lomljenog kamena i nepovezanih betonskih blokova • oštećenja vatrom	• obezbediti zaštitni sloj iznad geotekstila • koristiti tešku oblogu • konsultovati se sa lokalnim vlastima pre izvođenja radova
	privezivanje manjih plovila	• kamen se izbacuje iz obaloutvrde	• obezbediti odgovarajuće priveze
Saobraćaj	udar plovila	• lokalna destrukcija objekta	• obezbediti brzu popravku ili projektovati objekat otporan na udar
	lengerisanje brodova	• lokalna abrazija obloge i eventualno podloge	• postaviti jaču oblogu u zonama gde se očekuje lengerisanje brodova
	bagerovanje	• ubrzava eroziju u zoni nožice	• bolja kontrola bagerovanja
	Sunčevi zraci	• gubitak jačine i degradacija plastike i geotekstila	• koristiti stabilizovan materijal • ograničiti izlaganje Suncu tokom izgradnje i eksploatacije

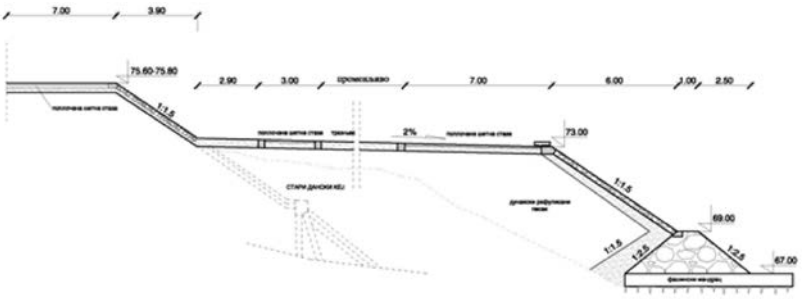
11.2 Kejski zid

Kejski zidovi su skupi objekti koji se grade na kraćim potezima kroz naselja i imaju višestruku funkciju: zaštita od poplava, zaštita obala od erozije i rekreacija. Imaju iste delove konstrukcije kao obaloutvrde: podlogu nožice, nožicu, filter i oblogu. Obloga je najčešće tesani kamen ili beton, a delovi objekta se zatravljuju, u skladu sa urbanističkim rešenjem.

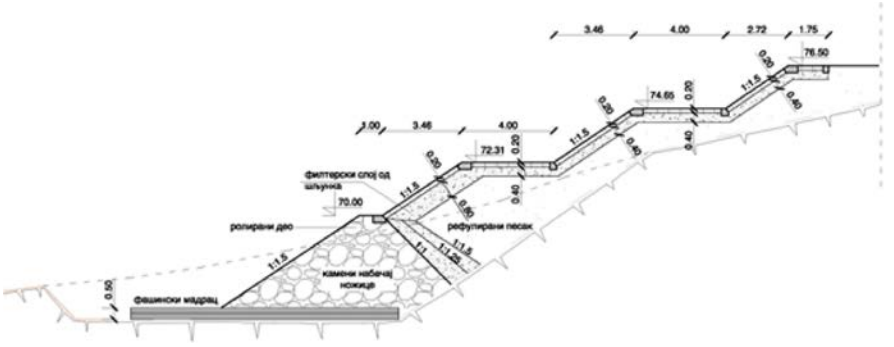
Kejski zid treba da ima kotu krune 0,3 do 0,5 m iznad nivoa merodavne velike vode ili više ukoliko se mogu razviti talasi od vetra (vrlo velike reke ili akumulacije). Na slikama 11.23 -11.26 dati su primeri kosih kejova na Savi i Dunavu u Beogradu.

Slika 11.23: Izgled kejskog zida na levoj obali Save od ušća do Brankovog mosta (Izvor: IJČ)

Slika 11.24:Pogled sa vode na kejski zid na desnoj obali Dunava - dorćolski kej (Izvor: IJČ)



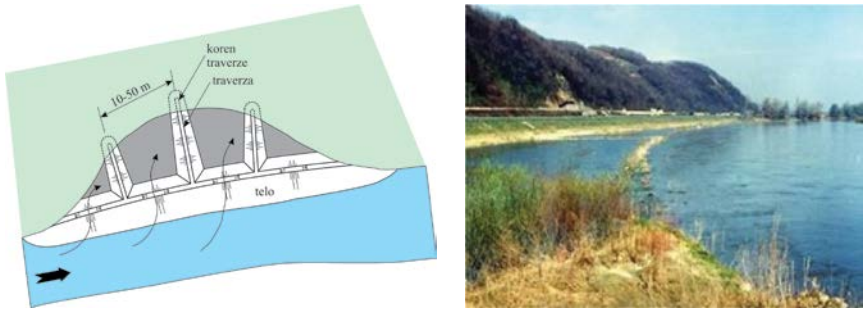
Slika 11.25: Karakteristične dimenzije kejskog zida na levoj obali Save od ušća do Brankovog mosta (Izvor: IJČ)



Slika 11.26: Karakteristične dimenzije kejskog zida na desnoj obali Dunava - dorćolski kej (Izvor: IJČ)

11.3 Prava paralelna građevina

Prava paralelna građevina spada, kao i obaloutvrda, u grupu paralelnih regulacionih građevina. Izvodi se kada je potrebno suženje rečnog korita (slika 11.27). Ova građevina ne remeti uslove proticanja vode pa je pogodna za regulacione radove za potrebe plovidbe.



Slika 11.27: Prava paralelna građevina

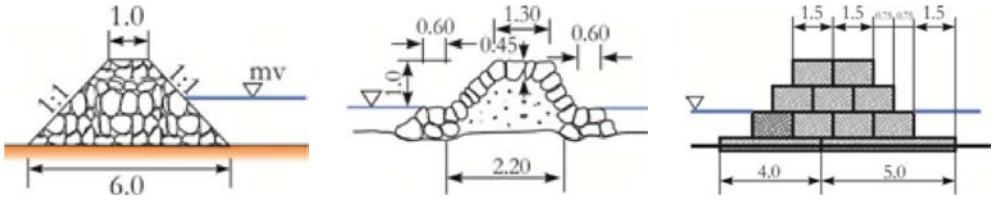
Prave paralelne građevine se grade na konkavnim obalama, ili na obe obale na pravolinijskim deonicama, sa krunom na koti srednje vode. Imaju dvostruki zadatak: da na strani toka suze proticajni profil i koncentrišu tok vode, a na strani prema obali izazovu što brže zasipanje napuštenog dela korita. Da bi se zasipanje postiglo u što većoj meri, u telu građevine se na nivou male vode ostavljaju otvori dužine 2-10 m, koji omogućavaju ulaz nanosa u prostor između građevine i obale.

Prave paralelne građevine su izložene dejstvu toka sa obe strane: kosina prema toku koja predstavlja novoformiranu obalu je direktno napadnuta, a suprotna strana je ugrožena u vreme prelivanja, pri većim vodostajima reke.

Delovi prave paralelne građevine su podloga, telo i traverze.

Podloga prenosi opterećenje od konstrukcije na slabo nosivo rečno dno. Može se izvesti kao fašinski madrac, sloj krupnijeg šljunka, tucanika ili sitnijeg kamenog nabačaja, ojačani geotekstil itd.

Telo prave paralelne građevine ima trapezni presek, sa nagibima kosina prema obali 1:1 do 1:2, a prema reci 1:1,5 do 1:4. Širina objekta u kruni je 1-4 m. Izvodi se od najrazličitijih materijala (kamen, gabioni). Različita konstruktivna rešenja tela građevine su data na slici 11.28.



Slika 11.28: Različiti tipovi pravih paralelnih građevina (Izvor: IJČ)

Traverze povezuju pravu paralelnu građevinu sa obalom, a time se sprečava formiranje sekundarnog toka između građevine i obale. Traverze se postavljaju na međusobnom razmaku koji je jednak širini vodnog ogledala pri srednjoj vodi i obavezno se ukorenjuju u obalu. U zoni ukorenjenja, obala se štiti obaloutvrdom (bar 5 m uzvodno i 10 m nizvodno),

jer je tačka ukorenjenja najugroženija erozijom. Takođe, prava paralelna građevina se na uzvodnom i nizvodnom kraju ukorenjuje u obalu. Izvode se od istih materijala kao i paralelna građevina, sa eventualno manjim dimenzijama poprečnog preseka.

Građenje prave paralelne građevine počinje polaganjem podloge na rečno dno, a zatim se gradi telo građevine, od uzvodnog ka nizvodnom kraju (da bi se radovi što više obavljali u mirnoj vodi). Radi se ukorenjenje u prirodnu obalu na uzvodnom i nizvodnom kraju, zatim izgradnja traverzi i ukorenjenje u obalu, a na kraju zaštita mesta ukorenjenja obaloutvrdama.

11.4 Usmeravajuća ili strujna građevina

Generalno, uloga usmeravajuće građevine je da usmeri tok u određenu zonu. Naročito se koriste radi usmeravanja toka pri prosecanju krivina ili uređenju ušća pritoka. Po konstruktivnim karakteristikama su slične pravim paralelnim građevinama i naperima.

Na plovnim rekama su usmeravajuće građevine niske (sa krunom na koti srednje vode), a grade se u sistemu sa drugim regulacionim građevinama (najčešće sistemima napera).

Najosetljivi deo strujnih građevina je kraj koji je najviše isturen u tok, jer se tu javlja eroziona jama. Ovaj deo objekta je potrebno osigurati postavljanjem tepiha ili kamenog nabačaja.

11.5 Naperi

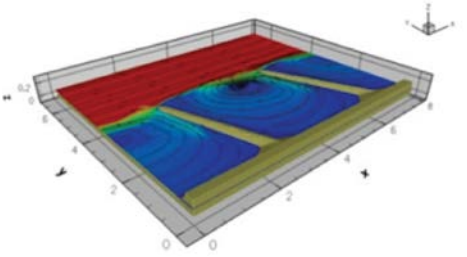
Naperi su poprečne regulacione građevine, koje se najčešće grade na velikim plovnim rekama (slika 11.29) kako bi se povećala dubina vode u plovnom putu.

Izgradnjom napera se rečni tok sužava do projektovane širine i koncentriše, da bi se postiglo povećanje brzina tečenja i produbljenje korita. Naperi se izvode od postojeće obale do projektovane regulacione linije.

Sistemi napera se koriste i za zaštitu morskih plaža od erozije talasima.

U međunaperskom polju se stvara cirkulaciono strujanje i istaložava rečni nanos (slika 11.30). Posle zasipanja međunaperskih polja, formira se nova obala po definisanoj regulacionoj liniji.

Slika 11.29: Sistem napera na reci Misisipi (Izvor: waterprotectionnetwork.org)



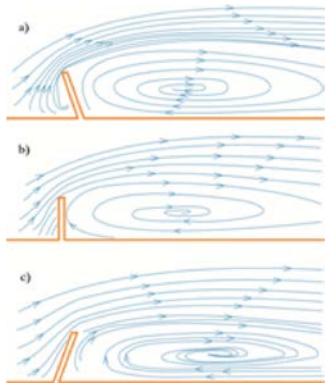
Slika 11.30: Cirkulaciono strujanje u međunaperskom polju (Izvor: wissrech.ins.uni-bonn.de)

Naperi se grade na konveksnim obalama ili na obe obale na pravolinijskim deonicama reke. Da bi se postiglo zasipanje međunaperskih polja grade se uvek u vidu sistema - nikad pojedinačno (slike 11.31 i 11.32). Ukoliko je konveksna obala regulisana sistemom napera, konkavnu obalu treba zaštiti obaloutvdom ili pravom paralelnom građevinom.

Slika 11.31: Sistem napera (Izvor: wissrech.ins.uni-bonn.de)

Slika 11.32: Zasuto međunapersko polje (Izvor: thesouthern.com)

Prema položaju u odnosu na rečni tok mogu biti uzvodni, upravni i nizvodni (slika 11.33). Uzvodni naperi ubrzavaju zasipanje ali više remete strujnu sliku oko glave, dok je učinak nizvodnih napera manji, uz manje nepovoljnih uticaja na strujanje vode.



Slika 11.33: (a) Uzvodni, (b) upravni i (c) nizvodni naperi

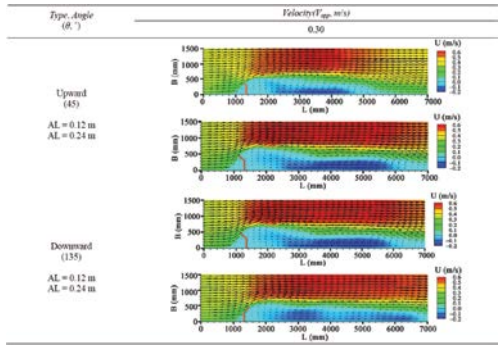
Na slici 11.34 prikazan je običan naper, a na 11.35 naper sa krilom. Naperi sa krilima (dužina uzvodnog krila: 10-30 m, dužina nizvodnog krila: 20-100 m) se često koriste na plovnim rekama, jer manje remete strujnu sliku.

Međusobni razmak i dužine napera se mogu odrediti na hidrauličkom modelu (slika 11.36), primenom složenih ravanskih modela strujanja (slika 11.37), praćenjem procesa u prirodi - na eksperimentalnoj deonici ili korišćenjem empirijskih izraza.

Slika 11.34: Običan naper (Izvor: ICPDR)

Slika 11.35: Naper sa krilom (Izvor: privatna komunikacija)

Slika 11.36: Ispitivanje uticaja napera na fizičkom modelu rečne deonice (Izvor: baw.de)



Slika 11.37: Ispitivanje uticaja napera pomoću ravanskog modela (Izvor: file.scirp.org)

Empirijski se rastojanje između napera izračunava iz uslova da se u međunaperskom polju javi povratno, cirkulaciono strujanje. Jedan od preporučenih empirijskih izraza je:

$$L < \alpha \cdot \frac{C^2 \cdot h}{2 \cdot g} \qquad (11\text{-}11)$$

gde je: L – razmak napera (m), C – Šezijev koeficijent otpora, h – dubina vode (m).

Maksimalni razmak napera ne treba da bude veći od 1-2 širine reke. Razmak između napera je i ekonomska katergorija, jer utiče na troškove izvođenja i održavanja napera (naperi postavljeni na većem razmaku imaju značajniju eroziju u zoni glave).

Dužina napera (L_n) zavisi od potrebnog stepena suženja rečnog korita. Za meandrirajuće reke preporučuje se odnos L/L_n od 1 do 6. Obično se povećava za 1/3, da bi skrenuta struja toka udarala u telo napera, a ne u obalu. Dužina napera ne treba da bude manja od 10-15 m.

Kota krune napera je približno na nivou srednje vode, tako da ga voda preliva.

Delovi napera su podloga i telo trapeznog preseka. Podloga prenosi opterećenje od konstrukcije na slabo nosivo rečno dno, a radi se u vidu fašinskog madraca, sloja krupnijeg šljunka, tucanika ili sitnijeg kamenog nabačaja, ojačanog geotekstila. Podloga treba da bude prepuštena u tok, jer se naperi izazivaju opštu eroziju korita a u zoni glave napera, usled opstrujavanja, javlja se i lokalna erozija.

Telo trapeznog preseka ima nagib uzvodne kosine 1:1 do 1:3; nizvodne 1:1 do 1:4. Nagib kosine glave napera prema reci iznosi 1:3 do 1:5. Širina u kruni zavisi od visine napera, a kreće se u opsegu 1-3 m. Naper ima i podužni nagib, idući od korena prema toku (radi koncentracije protoka pri povlačenju velikih voda) koji je u opsegu 1-4%.

Naper se vezuje za obalu korenom dužine 3-5 m, a zona ukorenjenja se osigurava obaloutvrdom (oko 10 m uzvodno i 20 m nizvodno). Pokušaji da se izvedu naperi koji nisu ukorenjeni u obalu, zbog lakše migracije vodenih organizama, nisu se dobro pokazali jer su objekti oštećeni tokom prolaska velike vode.

Naperi se izvode od različitih materijala: kamen, fašine ili punjene fašine sa ili bez obloge od kamena, gabioni. Konstrukcija tela napera je ista kao kod prave paralelne građevine (slika 11.28).

Izgradnja sistema napera počinje od najuzvodnijeg napera, da bi se radovi što više obavljali u mirnoj vodi. Najpre se izrađuje i postavlja podloga, zatim se izvodi telo napera po celoj dužini jednovremeno (najčešće pomoću plovnog bagera) i zatim oblaže krupnim kamenom. Zaštita mesta ukorenjenja pomoću obaloutvrde se radi na kraju.

Krupnoća blokova ili dimenzije gabiona određuju se po istom principu kao dimenzije elemenata obaloutvrda, vodeći računa o znatno većim brzinama toka koji preliva naper.

Naperi i paralelne građevine su često konkurentna rešenja za istu namenu, a svako od njih ima svoje prednosti i mane:

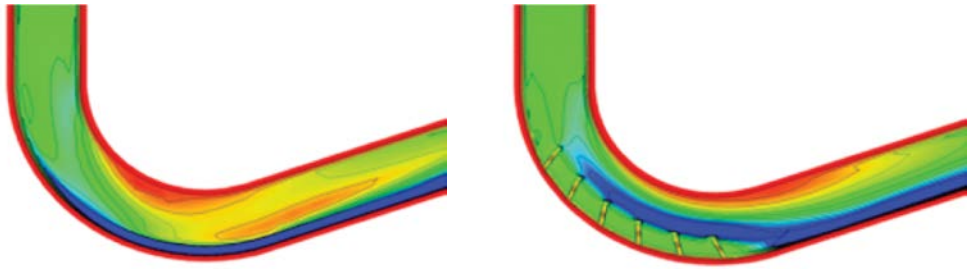
- Prava paralelna građevina je pogodna za suženje rečnog korita jer je tečenje uz građevinu ujednačeno, formira se kontinuirana regulaciona linija i nema pojave lokalne erozije u koritu. S druge strane, troškovi građenja prave paralelne građevine su veći, javljaju se veći problemi pri izvođenju radova u dubokoj vodi, zasipanje korita je sporo, a nožicu građevine treba osigurati celom dužinom.
- Naperi se lakše izvode, zasipanje je efikasnije i manji su troškovi izgradnje. S druge strane, naperi izazivaju poprečna strujanja u koritu vodotoka, trpe česta oštećenja zbog prelivanja pri velikim vodama i samo tačkasto definišu regulisanu obalu.

11.6 Kratki naperi

Kratki naperi se grade duž erozijom ugrožene konkavne obale, kako bi se tok od nje odbacio i erozija smanjila do prihvatljive mere (slike 11.38 i 11.39). Kratki naperi su najčešće usmereni uzvodno. Ova mera zaštite rečnih obala od erozije je naročito popularna u SAD.

Slika 11.38: Kratki naperi uz konkavnu obalu reke (Izvor: plattebasintimelapse.com)

Kratki naperi su jeftiniji nego obaloutvrde, ali ne obezbeđuju potpunu zaštitu i zahtevaju dopunsko održavanje. Nisu pogodni ukoliko je trpe veliko hidrauličko opterećenje.



Slika 11.39: Efekat kratkih napera (Izvor: chl.erdc.dren.mil)

11.7 Potopljeni naperi

U SAD se za poboljšanje plovidbenih uslova na reci Misisipi koriste naperi, potopljeni naperi i ševroni.

Slika 11.40: Potopljeni naperi u rečnoj krivini (Izvor: army.mil)

Potopljeni naperi su niske, podvodne građevine, koje usmeravaju tok dalje od ugrožene, konkavne obale (slika 11.40). Oni redukuju brzinu toka u krivini i menjaju sekundarno strujanje, tako da se postepeno odnosi konveksna obala. Rezultat je širi plovni put, u kome nije neophodno vršiti periodično bagerovanje radi održavanja plovidbene dubine.

Grade se od lomljenog kamena ili drugih otpornih materijala. Ne moraju da se povežu sa rečnom obalom, pa voda može da ih preliva ili teče oko objekta.

11.8 Ševroni

Ševroni su građevine oblika slova U ili V, sa krajevima usmerenim uzvodno (slika 11.41). Nisu povezani sa obalom reke. Ove građevine se obično grade u nizu i to na račvanjima toka, tako da koncentrišu rečni tok u glavno korito. Time se smanjuje bagerovanje radi održavanja plovidbenih dubina. Ševroni se takođe grade uzvodno od rečnih ada, kako bi se sprečila njihova erozija.

Slika 11.41: Niz ševrona na reci Misisipi (Izvor: waterprotectionnetwork.org)

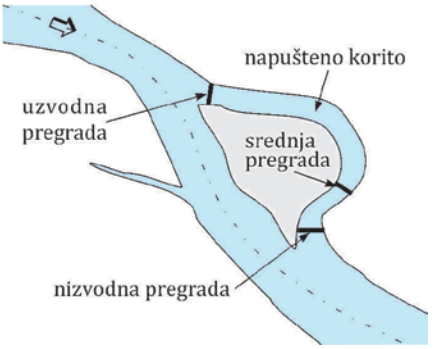
Kruna im je nivou najverovatnije velike vode (verovatnoća 50%, povratni period 2 godine). Tokom velikih voda građevina se preliva, tako da nizvodno nastaje velika eroziona jama. Materijal se pomera nizvodno i formira sprud. Smatra se da ševroni imaju pozitivan uticaj na rečni habitat, jer se stvaraju duboke i plitke zone u rečnom dnu [72].

Slika 11.42: Izgradnja ševrona (Izvor: mvr.usace.army.mil)

11.9 Pregrade

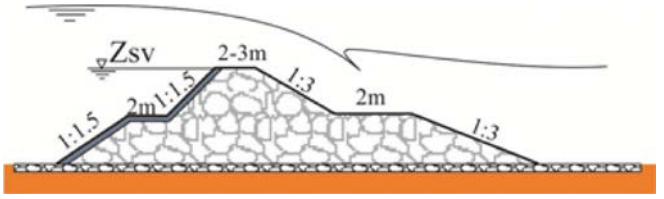
Pregrada je poprečna regulaciona građevina kojom se pregrađuju suvišni rukavci rečnog toka ili stara napuštena korita. Staro korito se mora uključiti u tečenje pri velikim vodama, pa se zato pregrade grade sa kotom krune na nivou srednje vode i prelivaju pri većim vodama. Staro korito se tokom vremena zapunjava istaloženim nanosom.

Po položaju u rukavcu koji se pregrađuje, pregrade mogu biti uzvodne, na sredini i nizvodne (slika 11.43). Po položaju u odnosu na glavni tok mogu biti paralelne, što je povoljnije sa hidrauličkog stanovišta ili poprečne, što znači kraće i jeftinije.



Slika 11.43: Položaj pregrada starog korita

Delovi pregrade su: telo trapeznog preseka i slapište (slika 11.44). Nagibi kosina tela pregrade se razlikuju. Nagib uzvodne kosine je 1:1,5, dok je nagib nizvodne blaži (1:2 do 1:4). Širina pregrade u kruni je 2 - 4 m. U slučaju pregrada veće visine, rade se bankine. Kruna pregrade se izvodi u nagibu 2-4% od obala ka sredini toka, radi koncentracije protoka u periodu malih voda. Nizvodno od pregrade se izvodi slapište, radi osiguranja dna od erozije u periodima kada voda preliva preko pregrade. Osiguranje dna se izvodi u vidu splava od fašina, punjenih fašina ili od kamena, na dužini 40-60 m. Obavezno se ukorenjuju u visoku obalu.



Slika 11.44: Poprečni presek pregrade (Izvor: IJČ)

Pregrade se izvode u periodu malih voda (slika 11.45). Nasipanje kamena može biti frontalno i čeono (sa obe obale).

Pregrade mogu imati i druge namene. Mogu biti značajnih dimenzija, ukoliko područje koje je dobijeno pregrađivanjem reke treba da bude zaštićeno od plavljenja. Primer su 3 pregrade rukavca reke Save u Beogradu, kojima je formirano veštačko jezero „Ada Ciganlija“ (slika 11.46). Ove pregrade su uklopljene u glavni nasip, tako da im je kruna na koti koja obezbeđuje zaštitu od poplava.

Slika 11.45: Izvođenje pregrade [31]

Slika 11.46: Savsko jezero sa pregradama (Izvor: GoogleEarth)

11.10 Pragovi

Prag je poprečna regulaciona građevina. Razlikuju se:

1. Pragovi koji se grade radi kontrole podužnog pada vodotoka i
2. Pragovi koji se grade da bi se zasuli duboki delovi korita aluvijalnog vodotoka.

11.10.1 Pragovi u funkciji kontrole podužnog pada vodotoka

Na vodotocima koji imaju veliki pad potrebno je sprečiti eroziju dna i obala, jer ona može dovesti do rušenja objekata u koritu i na obalama. Stabilizacija uzdužnog profila se postiže izgradnjom pragova, koji mogu biti pojedinačni (radi zaštite od mosta ili vodozahvata od erozije, slika 8.6) ili u nizu (na bujičnim vodotocima, slika 4.27).

Pragovi mogu biti izvedeni od najrazličitijih materijala, a postoji bezbroj konstruktivnih rešenja. Izbor konstrukcije zavisi od morfoloških i ekoloških uslova u vodotoku. Mogu predstavljati prepreku za migraciju riba, što se rešava izgradnjom riblje staze.

Najčešće pragovi imaju telo trapeznog preseka (nagibi kosina: uzvodna 1:1; nizvodna 1:2) i širinu u kruni 1,5-2 m. Kruna praga se izvodi u nagibu (od 1:2 do 1:50) od obala ka sredini toka, radi koncentracije protoka u periodu malih voda. Obavezno se ukorenjuju se u rečne obale i dno.

Pragovi se grade se u periodu malih voda (slika 11.49).

Primer praga od gabiona je dat na slici 11.47. Na slici 11.48 je betonski prag, koji je izveden nizvodno od mosta na Belom Timoku, kako bi se zaustavila regresivna erozija korita koja je pretila da ugrozi mostovske stubove. Razlozi za izvođenje praga od kamena u koritu Velike Morave (slika 11.49) su opisani u poglavlju 8.2.

Slika 11.47: Prag od gabiona punjenih kamenom (Izvor: terraaqua.com)

Slika 11.48: Betonski prag na Belom Timoku (Izvor: IJČ)

Slika 11.49: Izvođenje praga na Velikoj Moravi (Izvor: IJČ)

U okviru "naturalne regulacije" pragovi se postavljaju da povećaju raznovrsnost hidrauličkih uslova, lokalno pojačaju turbulenciju i intenziviraju ovazdušenje toka (slika 11.50). Koriste se razni materijali: debla, gabioni, pojedinačne kamene gromade.

U slučaju pojave erozije nizvodna nožica može biti ogoljena, što bi dovelo do rušenja. Ovo se sprečava osiguranjem dna nizvodno od praga ili postavljanjem pragova na manjim rastojanjima.

Razmak pragova (ΔL) se računa iz uslova stabilnosti zrna nanosa, koristeći jednačinu Majer-Peter-Milera-a.

$$\Delta L = \frac{\Delta h}{I - I_\tau} \qquad I_\tau = \frac{\tau_{kr}}{g \cdot \rho \cdot R} \qquad (11\text{-}12)$$

gde je: Δh – visina praga (m), I – pad dna (-), I_τ - pad stabilnog dna (-), τ_{kr} – kritični tangencijalni napon (kN/m^2), R – hidraulički radijus (m).

Slika 11.50: Pragovi u "naturalnoj" regulaciji

11.10.2 Pragovi za zasipanje dubokih delova aluvijalnog korita

Na plovnim aluvijalnim vodotocima se izvode pragovi u najdubljim delovima korita, u zoni rečnih krivina. Kruna praga se postavlja na nivou dna regulisanog korita i to nizvodno od proloke.

Funkcija pragova u dnu je slična kao kod potopljenih napera – njihovom izgradnjom se tok preusmerava ka konveksnoj obali, da bi se izazvala njena postepena erozija i na taj način proširio plovni put ili povećala transportna sposobnost za led na krivinskoj deonici. Objekti ovog tipa su izvedeni na Dunavu kod Staklara i Dalja i na Tisi kod Sente.

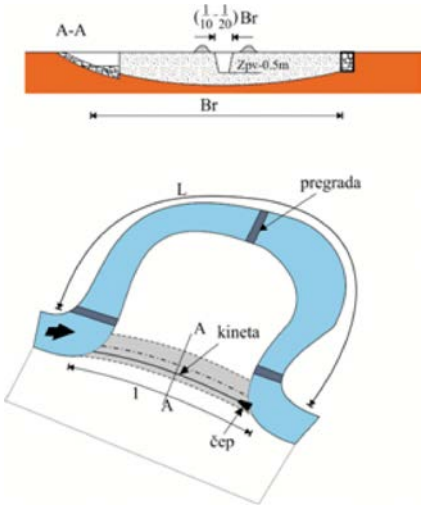
12 REGULACIONI RADOVI

12.1 Prosek rečne krivine

Prosecanje rečnih krivina ima za cilj da se skraćenjem trase i konsekventnim povećanjem pada dna poveća propusna moć korita za protok vode, pronos leda i nanosa.

Postoje dva načina izvođenja proseka: iskopom kinete (malog korita) koje se dejstvom reke razrađuje do projektovanih dimenzija (slika 12.1) ili iskopom novog korita u punom profilu (slika 12.2).

Formiranje proseka iskopom kinete je moguće ukoliko je stepen skraćenja toka veliki (veći od 1:3) i ukoliko se kopa u nevezanom aluvijalnom materijalu. Dimenzije kinete zavise od rezultata hidrauličkog proračuna, načina iskopa i karakteristika materijala u kome se vrši iskop. Orijentacione dimenzije kinete su: širina 1/10 do 1/20 širine budućeg korita, dubina do nivoa podzemne vode ili nešto ispod (0,5 – 1,0 m), nagib kosina od 5:1 do 10:1.



Slika 12.1: Kineta proseka

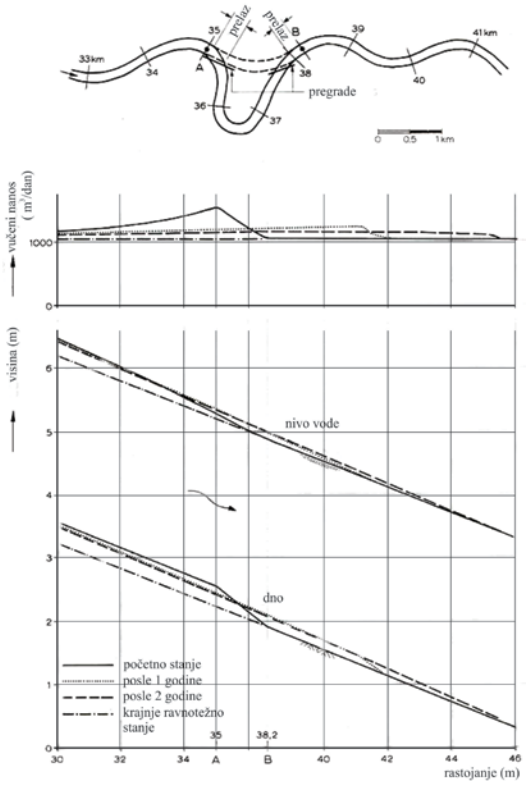
Izvođenje kinete podrazumeva sledeće: (a) osovina kinete se podudara sa osovinom dela budućeg korita, bližeg konveksnoj obali; (b) zemlja iz iskopa se istovaruje u neposrednoj blizini kinete; (c) sa kopanjem se počinje od nizvodnog kraja; (d) na ulazu se ostavlja "čep", koji omogućava radove u suvom, a na kraju iskopa se čep otvara bagerom sa obale, čime počinje razrada kinete.

Slika 12.2: Prosek u punom profilu (Izvor: IJČ)

Izvođenje proseka putem kinete je problematično, jer nije moguće proceniti dinamiku razvoja proseka ni hidrauličkim ni fizičkim modelom (modeli ne mogu da obuhvate sve parametre koji utiču na proces razrade proseka). Zato se često proseci rade iskopom u punom projektovanom profilu (slika 12.2).

Osiguranje konkavne obale proseka obaloutvrdom je obavezno (u slučaju izvođenja kinete proseka radi se kamena deponija po trasi buduće obale). Takođe, grade se pregrade (na početku, sredini ili kraju starog korita - starače) do nivoa srednje vode, sa otvorima za malu vodu, radi efikasnijeg zasipanja nanosom. Pregrade ne treba graditi odmah, pošto se dešava da do zasipanja dođe i bez njih.

Ukoliko se proseca niz krivina, sa radovima se počinje sa nizvodnog kraja, tako što se uzvodni prosek otvara nakon što se razradi nizvodni - time se višak energije stvoren formiranjem nizvodnog proseka koristi za razradu uzvodnog, a materijalom iz uzvodnog proseka se zasipaju nizvodne starače.



Slika 12.3: Promene koje nastaju u rečnom koritu posle izvođenja proseka[25]

Slika 12.4: Nova i stara trasa reke Velike Morave (Izvor: GoogleEarth)

Proseci su relativno agresivni zahvati na vodotoku koji imaju brojne posledice, kao što je promena režima tečenja, režima pronosa nanosa i promena geometrije korita ne samo na lokaciji proseka nego i šire. Razlog je skraćenje trase, zbog koga se lokalno povećava uzdužni pad i energija toka. Time se povećava transportna sposobnost toka za nanos i izaziva regresivna dubinska erozija uzvodno od proseka (slika 12.3).

Ukoliko elementi proseka nisu dobro odabrani javljaju se brojni negativni efekti, pre svega velika dubinska erozija, a zbog nje dolazi do rušenja građevina, ugroženi su mostovski stubovi, vodozahvati, itd.

Primer negativnog uticaja prosecanja rečnih krivina je reka Velika Morava (slika 12.4), na kojoj je izgradnjom većeg broja proseka trasa skraćena za 18%. Uz smanjen dotok nanosa iz sliva (posle izvođenja protiverozionih radova i izgradnje određenog broja akumulacija), rezultat je produbljenje korita za 3 m u periodu od više decenija, sa negativnim uticajem na režim podzemnih voda u priobalju.

U naturalnom uređenju vodotoka se prosecanje kao regulaciona mera ne koristi, jer se ovom merom pogoršavaju hidrološki uslovi nizvodno, što je protivno konceptu integralnog uređenja sliva.

12.2 Uređenje rečnih ušća

Uređenje korita reke i njene pritoke u zoni ušća je ozbiljan zahvat, koji moraju da prate složene hidrološke i hidrauličke analize. Potrebno je najpre ispitati hidrološko-hidrauličke uslove u zoni ušća: korelaciju protoka glavnog toka i pritoke, složenu verovatnoću nailaska velikih voda, međusobno usporavanje matične reke i pritoke, prostiranje poplavnih talasa u zoni ušća, a zatim i uslove transporta nanosa.

Na ušću je potrebno obezbediti transportnu moć matične reke za transport nanosa iz pritoke (uglavnom ima krupniji nanos nego glavni tok) i pogodan ugao između osovine pritoke i i osovine glavnog toka.

Uzvodno ulivanje je nepovoljno, jer pritoka usporava matičnu reku i deponuje nanos uzvodno od ušća. Ulivanje pod pravim uglom ne garantuje efikasno mešanje vode i odnošenje nanosa, može da ugrozi suprotnu obalu matične reke, pri istovremenoj pojavi velikih voda pritoke i malih voda matične reke. Najpovoljnije je nizvodno ulivanje jer obezbeđuje najpovoljnije uslove mešanja vode i odnošenja nanosa. Preporučuje se ugao 30-45° između osovine toka pritoke i recipijenta [32].

Takođe, najpovoljnije je ukoliko je ulivanje na konkavnoj obali, tako što se sustiču konkavne obale matične reke i pritoke. Ulivanje na konveksnoj obali nije povoljno zbog male transportne sposobnosti toka matične reke uz ovu obalu.

Da bi ušće bilo stabilno, mora se obezbediti regulacionim građevinama, najčešće obaloutvrdama (slika 12.5).

Slika 12.5: Uređeno ušće Gračice u Kolubaru (Izvor: mapio.net)

Primer: Dunav i Sava imaju nanos slične krupnoće, tako da hidrološki uslovi na ušću imaju dominantan uticaj pod kojim se odvijaju morfološke promene u koritima oba vodotoka. S obzirom na varijabilnost hidroloških uslova, u zavisnosti od koincidencije protoka u matičnoj reci i pritoci, hidraulički režim je vrlo složen. Između dva ekstremna stanja hidrološko-hidrauličkog režima (uspor odnosno depresija na ušću), postoji niz prelaznih stanja, u zavisnosti od odnosa protoka. Zbog toga je dijapazon varijacije hidrauličkih parametara od kojih zavisi transport nanosa veoma širok, sa minimalnim vrednostima u slučaju uspora, odnosno maksimalnim vrednostima u slučaju depresije na ušću.

S obzirom na česte promene hidrološko-hidrauličkih uslova, vrlo često se narušava ravnoteža između transportne sposobnosti toka za nanos i stvarnog pronosa nanosa. To prouzrokuje specifičan ritam morfoloških promena, jer se smenjivanje faza uspora i depresije na ušću manifestuje kroz sukcesivne cikluse zasipanja i erozije rečnog korita.

12.3 Bagerovanje nanosa

12.3.1 Ciljevi bagerovanja

Bagerovanje je operacija uklanjanja nanosa iz rečnog korita. Bagerovanja iz rečnih korita i akumulacionih basena spadaju u relativno česte intervencije u rečnoj hidrotehnici. Prema postavljenom cilju, bagerovanje se može biti:

- **Bagerovanje u cilju održavanja** - izvodi se na plovnim rekama radi povećanja propusne sposobnosti ili poboljšanja plovidbenih uslova u plovnom putu, održavanja ulaza u kanale, pristaništa i zimovnike. Takođe, bagerovanjem se uklanjaju nanosne naslage iz akumulacionih basena. Uticaji ove operacije na životnu sredinu su generalno mali i ograničeni na izvođenje samog bagerovanja ili operaciju deponovanja, ukoliko nije moguće komercijalno iskoristiti izbagerovani materijal. Pitanje zaštite životne sredine dobija na značaju ukoliko je materijal koji se bageruje zagađen;

- **Kapitalno bagerovanje** - aktivnost na izvođenju novih hidrotehničkih objekata (luke ili kanali), produbljenju postojećih plovnih puteva ili prilaznih kanala do luka. Radovi se izvode u neporemećenom tlu, koje nije zagađeno. Uticaji na životnu sredinu su ograničeni na samu zonu izvođenja radova, sa koje je postojeći ekosistem uklonjen;
- **Bagerovanje u cilju eksploatacije mineralnih sirovina** iz podvodnih naslaga (primer je rudnik Kovin, u kome se plovnim bagerom eksploatiše ugalj iz dna korita Dunava);
- **Bagerovanje u cilju popravke životne sredine** - podrazumeva uklanjanje zagađenih sedimenata iz reka, luka itd. Može se posmatrati kao posebna vrsta bagerovanja u cilju održavanja. U ovom slučaju se u svim fazama rada mora voditi računa o zaštiti životne sredine.

Bagerovanja mogu imati dugoročni karakter, sa periodičnim ponavljanjem operacija, ili, kratkoročni karakter, sa jednokratnim delovanjem mehanizacije. Najčešći slučaj dugoročnog bagerovanja je održavanje plovnog puta. Kod ostalih navedenih ciljeva bagerovanja, operacije se izvode jednokratno ili povremeno, sa dužim vremenskim međuintervalima, ako je utvrđeno da su ove intervencije neophodne na pojedinim sektorima vodotoka ili akumulacija.

Planiranje bagerovanja u rečnom koritu ili akumulacionom basenu zahteva studiozan pristup i sveobuhvatnu analizu svih relevantnih parametara [81]. Ovom analizom treba da obuhvatiti sledeće aspekte:

1. lokacije i količine materijala za bagerovanje,
2. strujnu sliku toka u zoni bagerovanja,
3. morfološke parametre vodotoka ili akumulacionog basena u zoni bagerovanja,
4. fizičke i hemijske karakteristike sedimenata u zoni bagerovanja,
5. potencijalne lokacije za deponovanje izbagerovanog materijala,
6. izbor optimalne tehnologije bagerovanja,
7. ekološke efekte i
8. ekonomske i socijalne efekte bagerovanja.

Generalno, kod bagerovanja se razlikuju tri faze: iskop, transport i deponovanje materijala.

Najveći problem kod bagerovanja može biti izbor, sa tehničkog i ekološkog aspekta, pogodne lokacije za deponovanje materijala. U slučaju bagerovanja iz akumulacionih basena, najčešće se materijal deponuje nizvodno od brane (u specijalnim zonama za nasipanje ili u samom vodotoku) ili duž obala akumulacije, a može se koristiti i za poboljšanje kvaliteta poljoprivrednog zemljišta.

12.3.2 Tehnologija bagerovanja

Izbor optimalne tehnologije bagerovanja, za date lokalne uslove i karakteristike vodotoka ili akumulacionog basena, od presudnog je značaja za tehničku efikasnost, ekonomsku opravdanost i integralnu realizaciju ciljeva bagerovanja.

Kod izbora tehnologije bagerovanja i tipa bagera, moraju se uzeti u obzir sledeći uslovi i zahtevi:

- Tehnološke mogućnosti i ograničenja pojedinih tipova bagera, u odnosu na morfološke karakteristike zone bagerovanja (dubina sa koje se bageruje materijal konvencionalnom opremom je najčešće ograničena na 30 m);
- Tehnološke mogućnosti i ograničenja pojedinih tipova bagera, u odnosu na geotehničke karakteristike materijala za bagerovanje (glina, pesak, šljunak, mekše stene);
- Ukupna količina nanosa koga treba ukloniti direktno utiče na trošak bagerovanja;
- Geometrija (položaj i debljina) nanosnih naslaga - utiče na troškove bagerovanja, jer od toga zavisi učestalost premeštanja mehanizacije;
- Učinak pojedinih tipova bagera i jedinična cena bagerovanja;
- Način odlaganja izbagerovanog materijala i udaljenost odlagališta;
- Uticaj tehnologije bagerovanja na životnu sredinu (posebno u slučaju kontaminiranih sedimenata).

Postoje tri osnovne tehnologije bagerovanja:

1. **Klasično bagerovanje**, uz korišćenje suvozemne (slika 12.6) ili plovne mehanizacije (slika 12.7);
2. **Bagerovanje pomoću resuspenzije materijala sa dna** generisanjem veštačkog strujanja iznad sedimenata (agitation dredging).
3. **Specijalne tehnike** za bagerovanje sa većih dubina (mlazne i vazdušne pumpe).

Slika 12.6: Suvozemni bager sa kašikom (Izvor: IJČ)

Slika 12.7: Plovni bager vedričar (Izvor: slideshare.net)

12.3.3 Tipovi bagera

12.3.3.1 Mehanički bageri

Postoji bezbroj varijacija kod mehaničkih bagera, ali na svakom se koristi kašika ili vedro kojim se odvaja materijal sa rečnog dna.

Bager vedričar (slika 12.7) je stacionarni tip plovnog bagera, koji ima beskonačni lanac vedara, vezanih za tzv. merdevine. Vedra se pune tokom rotacije, a prazne se u baržu privezanu uz bager. Može se koristiti za iskop najrazličitijih materijala, od naslaga mulja do mekših stena, zavisno od jačine lanca sa vedrima. Maksimalna dubina bagerovanja zavisi od veličine bagera, ali najčešće ne prelazi 20 m. S druge strane, minimalna dubina vode u kojoj mogu da rade je skoro 8 m. Danas se često koriste za bagerovanje kontaminiranog

mulja, zato što ne remete materijal na mestu iskopa. U poređenju sa hidrauličkim bagerima, produktivnost vedričara je mala. Maksimalni nedeljni učinak je 10.000 do 100.000 m^3 zavisno od veličine, lokacije bagerovanja i materijala.

Bager grajfer koristi kašiku za iskop materijala sa dna ili obala reke (slike 12.8 i 12.9). Kašikom se upravlja pomoću kablova ili hidraulički. Dizalica sa kašikom može biti montirana na pontonu, koji se stacionira na nekoj lokaciji. U tom slučaju se bagerovani materijal tovari u barže. To je jednostavna i relativno jeftina mašina, koja je najbolja za iskop konsolidovanog mulja, gline i peska.

Jedna ili više dizalica sa kašikom mogu biti montirane i na samohodnom plovilu, koje eventualno može imati i spremište za izbagerovani materijal. U tom slučaju kapacitet bagera zavisi od zapremine spremišta (100 do oko 2.500 m^3).

Postoji mnogo tipova grajfernih kašika, a najčešće se dele na otvorene, zatvorene i vodonržive. Zapremina kašike je od 1,0 do 20 m^3, što zavisi od snage dizalice. Kašika grajfera se ne može precizno usmeravati, pa se iskopom formira nepravilna linija dna.

Slika 12.8: Bager grajfer
(Izvor: somersetriversauthority.org.uk)

Slika 12.9: Bager sa zatvorenom kašikom
(Izvor: silive.com)

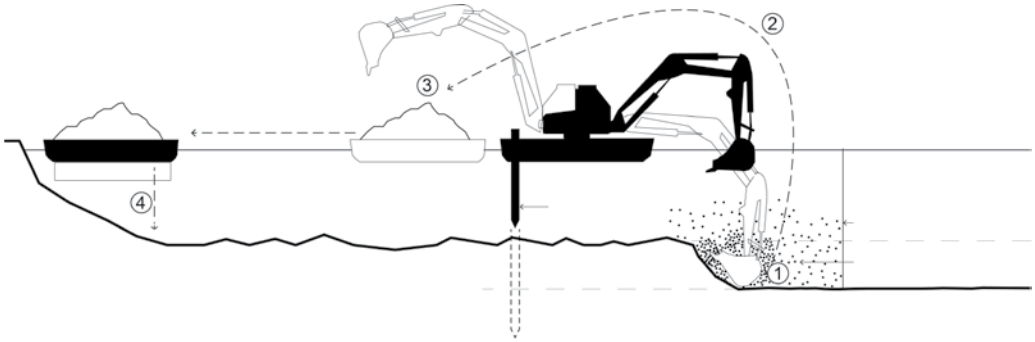
Veliki bageri se koriste za masovni iskop, a manji za specijalne namene, kao što je čišćenje teško dostupnih mesta u lukama, duž kejskih zidova, iskop tranšeja itd.

Produktivnost bagera u potpunosti zavisi od tipa materijala. Za iskop mekih materijala koriste se veće kašike, a za konsolidovane manje. Dubina bagerovanja zavisi samo od dužine ruke. Međutim, preciznost se smanjuje sa dubinom iskopa.

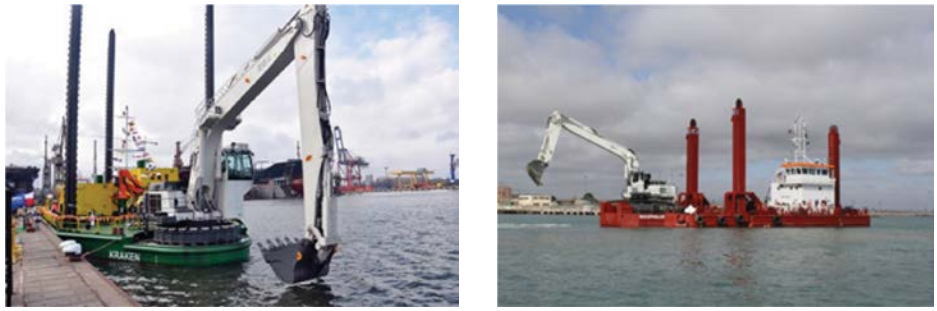
Bager sa hidrauličkom rukom se postavlja na pravougaoni ponton, koji može biti ankerisan za rečno dno ili fiksiran (na stubovima). Materijal se bageruje kašikom, čija veličina odgovara otpornosti materijala koji se bageruje. Izbagerovani materijal se smešta u barže ili na obalu. Generalno, postoje dva tipa bagera sa hidrauličkom rukom: bager sa dubinskom kašikom i bager sa čeonom kašikom. Hidraulička ruka je efikasnija od one kojom se upravlja pomoću kablova. Veličina bagera je uslovljena veličinom kašike (0,5 do 13 m^3). Efikasnost bagera zavisi od veličine kašike i tvrdoće materijala.

Bageri sa čeonom kašikom (slike 12.10 i 12.11) se najčešće postavljaju na preuređene teretne brodove. Kašika je čvrsto pričvršćena na rešetkastu konstrukciju. Da bi se povećao kapacitet iskopa, brod bagera je pričvršćen za dva stuba koji prenose težinu prednjeg dela broda na dno. Ovi bageri obično imaju kašiku kapaciteta 6-9 m^3 i rade na dubini od 15 m. Učinak bagera je vrlo promenljiv, ali se obično ostvari 30-60 ciklusa na sat. Ovaj tip bagera je snažna mašina koja može odstraniti sa dna naslage koje se sastoje od gline,

jako konsolidovanog peska, čvrstog materijala, kamenitog materijala ili raspadnute stene. Takođe je pogodan za uklanjanje starih šipova, temelja, objekata iz dna, korenja, panjeva i drugih prepreka. Prednosti ovog tipa bagera su: (1) potrebno je manje manevarskog prostora na mestu rada nego većini drugih bagera, (2) iskop je precizno kontrolisan pa su pogodni za uklanjanje materijala oko temelja i šipova, oslobađanje nasukanog broda i druge slične operacije. Mane su sledeće: (1) vlažan, polususpendovani i finogranulisani materijal se gubi iz kašike bagera, pa se ne preporučuje za bagerovanje zagađenog nanosa; (2) potreban je šlep za transport materijala do deponije; (3) produktivnost je niska u poređenju sa refulerima.



Slika 12.10: Rad bagera sa čeonom kašikom: (1) iskop, (2) podizanje, (3) utovar u baržu, (4) transport (Izvor: instrumentalism.wordpress.com)



Slika 12.11: Bageri sa čeonom kašikom (Izvor: dredgingtoday.com)

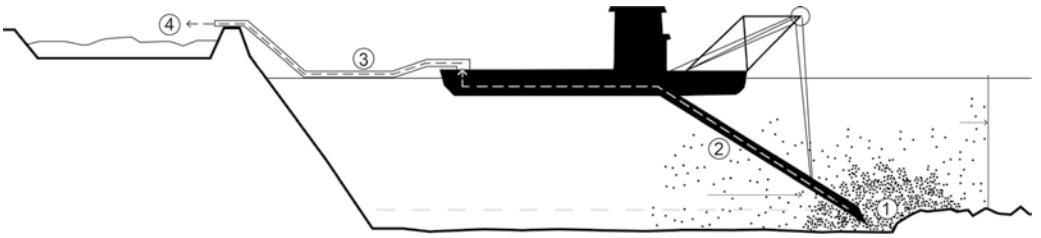
12.3.3.2 Hidraulički bageri

Hidraulički bageri podižu sa dna materijal u vidu suspenzije kroz sistem cevi koje su povezane sa centrifugalnom pumpom (slika 12.12).

Koriste se samo za iskop nevezanog materijala. Hidrauličko bagerovanje je najefikasnije u slučaju finih materijala, koji se mogu lako održati u suspenziji. Mogu se koristiti i za krupnije frakcije - pa čak i šljunak, ali uz veću snagu pumpe i brže habanje cevi i pumpe.

Koriste se različite metode za oslobađanje materijala sa dna. Ako materijal nije konsolidovan, dovoljno je primeniti usisavanje, dok se kod kompaktnih materijala mora primeniti neka od mehaničkih metoda ili mlaz vode za razbijanje.

Nisu pogodni za precizan rad, kada je potrebno iskopati unapred definisani profil. Najčešće se koriste za eksploataciju pozajmišta peska.



Slika 12.12: Rad bagera refulera (1) iskop, (2) podizanje, (3) transport kroz cevovod, (4) istovar na deponiju (Izvor: instrumentalism.wordpress.com)

Postoji nekoliko podvrsta bagera refulera: (1) Refuler koji utovara iskopani materijal u barže. Ovaj tip se koristi kada je transportna daljina velika, tako da nije ekonomično koristiti hidraulički transport; (2) Refuler koji pumpa iskopani materijal prema obali kroz cevovod (slika 12.13); (3) Refuler za veće dubine, opremljen podvodnom pumpom, tako da dubina iskopa može da dostigne i 80 m.

Slika 12.13: Bager refuler sa cevovodom (Izvor: bosslynx.com)

Refuleri imaju mogućnost transporta iskopanog materijala plovnim cevovodom ili kombinacijom plovnog i suvozemnog cevovoda (slika 12.13). Iskopani materijal se može ispuštati direktno u vodu ili formirane kasete (slika 12.14), gde se voda oceđuje i materijal postepeno suši.

Slika 12.14: Deponovanje refulisanog materijala (Izvor: hidroiskopi.rs)

Od transportne daljine zavisi da li će se za transport refulisanog materijala koristiti cevovod (ograničenje predstavlja kapacitet montirane pumpe za pesak) ili barže. Uglavnom, ukoliko se materijal transportuje cevovodom pod pritiskom uvek postoji mogućnost postavljanja buster stanice neophodnog kapaciteta iza bagera.

Pored navedenih najčešće korišćenih bagera, u svetu se koriste i druge vrste. To su:

(a) Bager "čistač", hidraulički usisni bager koji koristi široku glavu sa vodenim mlazevima za bagerovanje. Mlazevi razbijaju i omekšavaju površinski sloj nanosa na dnu, koji se zahvata u glavu bagera;

(b) Bager sa kontejnerom, brod-samohotka, koji se najčešće koristi na moru;

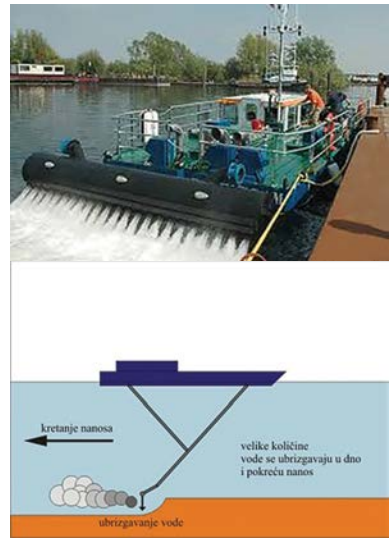
(c) Hidraulički bager sa rotacionim sekačima (slika 12.15). Ovakav bager ima najširu primenu jer može efikasno kopati i pumpati sve tipove aluvijalnih materijala, ali i čvršćih materijala, kao što je glina. Osnovni nedostatak ovog bagera je nepovoljan efekat rotacionih sekača, koji stvaraju veliku koncentraciju suspendovanog nanosa pri dnu (mutnu struju) i mogu imati negativne posledice po životnu sredinu.

Slika 12.15: Bager refuler sa rotacionim sekačima (Izvor: royalihc.com)

12.3.3.3 Specijalne tehnike bagerovanja

U razvoju su brojne specijalne tehnike bagerovanja. U ovu grupu spada **bagerovanje pomoću resuspenzije materijala sa dna**, koje se ostvaruje veštački generisanim strujanjem. Resuspendovani nanos se dalje transportuje prirodnim tokom, u vodotoku ili akumulaciji. Veštačko strujanje na dnu vodotoka ili akumulacije može se generisati na dva osnovna načina: (1) radom usisnih bagera, pri čemu se podižu istaložene čestice nanosa i podižu u suspenziju ili (2) dejstvom propelera, instaliranih na specijalno konstruisanim plovilima, kojima se, u cilju resuspenzije istaloženog nanosa, stvara vrtložno strujanje u zoni dna. Ova tehnologija bagerovanja može da se primeni samo ako su pogodni hidraulički uslovi u zoni bagerovanja (strujna slika toka i transportna sposobnost za nanos) i pogodne karakteristike nanosa na dnu za transport u suspenziji (pesak, prašinaste i glinovite frakcije).

Druga tehnika bagerovanja u razvoju se sastoji u **ubrizgavanju** velikih količina vode (slika 12.16), pod pritiskom, u naslage mulja i finog peska. Na taj način se nanos ponovo podiže u suspenziju, jer nestaje kohezija između zrna nanosa. Ova mešavina se kreće kao mutna struja, pod uticajem gravitacije i gustine fluida. Na ovaj način se mogu pokrenuti velike količine nanosa u kratkom vremenu. U povoljnim uslovima (ako postoji pad dna i nanosne naslage nisu kompaktne) može se dostići velika produktivnost (do 1000 m^3/h). Ova tehnika ne može da se koristi u slučajevima koji su osetljivi sa gledišta zaštite životne sredine. Naime, materijal se ne uklanja iz životne sredine, već se samo pomera sa jednog mesta na drugo na način koji je nemoguće kontrolisati, pa čak ni predvideti.



Slika 12.16: Bagerovanje ubrizgavanjem vode (Izvor: tms-supplies.nl)

12.3.4 Odlaganje izbagerovanog materijala

U opštem slučaju, postoje tri osnovne alternative za odlaganje izbagerovanog materijala: (1) odlaganje u otvoreno vodno telo, (2) odlaganje na ograničenoj lokaciji i (3) formiranje biološkog staništa. Takođe, moguće je da se pomoću sistema hidrociklona i filtera izdvoji voda iz mešavine, kako bi se omogućio dalji suvozemni transport (kamionima) i deponovanje dalje od mesta iskopa.

U slučaju odlaganja izbagerovanog materijala na određenim deponijama (slike 12.14 i 12.17), od posebnog su značaja izbor optimalne lokacije deponije i njeno dimenzionisanje za dugoročno korišćenje. Pored potrebne zapremine deponije, mora se voditi računa i o njenim karakteristikama sa aspekta uslova taloženja izbagerovanog nanosa. Ovaj nanos se, u većini slučajeva, transportuje hidrauličkim putem, kroz cevovode koji povezuju bagere i deponije. U hidrauličkom transportu se pronosi smeša nanosa i vode (u određenoj srazmeri). Posle ulaza ove smeše na deponiju, suspendovane čestice nanosa se talože na način koji zavisi od koncentracije i krupnoće čestica nanosa, ali i od geometrijskih i hidrauličkih karakteristika deponije. Prostorno ograničavanje deponije se najčešće postiže izgradnjom obodnih nasipa. U cilju što racionalnijeg korišćenja zapremine suvozemne deponije, često se primenjuje postupak eliminacije vode iz deponovane smeše. Ovo se postiže izgradnjom drenaže i podelom deponijskog prostora pregradama.

Kontaminiran materijal (potiče iz luke, pretakališta nafte i sl.) može se odložiti u posebne cevaste kontejnere (slika 12.18), koji se posle oceđivanja vode mogu koristiti kao elementi regulacionih građevina.

Slika 12.17: Deponovanje bagerovanog nanosa u ograničenom prostoru vodnog tela (Izvor: theadvocate.com)

Slika 12.18: Odlaganje kontaminiranog nanosa u posebne kontejnere (Izvor: tencate.com)

Formiranje biološkog staništa na deponijama predstavlja vrlo poželjnu alternativu za izbagerovani materijal. U tom smislu, postoje 4 varijante: (1) močvarno stanište, povremeno pod vodom; (2) gornje stanište, na obali, iznad nivoa velikih voda; (3) ostrvsko stanište, u formi ostrva unutar vodnog tela, koje je zaštićeno od velikih voda (slika 12.17); (4) akvatično stanište, koje je stalno pod vodom.

Izbor tipa biološkog staništa zavisi od više faktora: prirodnog okruženja, morfoloških karakteristika vodotoka i priobalja, hidrološkog režima vodotoka ili akumulacije, vrste vegetacije koju treba implementirati i dr. Opredeljenje za formiranje biološkog staništa na deponijama u velikoj meri zavisi od podrške javnog mnjenja i lokalnog stanovništva.

12.3.5 Uticaj bagerovanja i deponovanja nanosa na životnu sredinu

Bagerovanje iz rečnih korita i akumulacija može imati vrlo veliki uticaj na životnu sredinu. Otuda je neophodno da se prilikom razmatranja bagerovanja, kao mere za uklanjanje nanosnih naslaga, uradi studija uticaja ovih aktivnosti na životnu sredinu. Pri tome treba imati u vidu da osobine izbagerovanih sedimenata, kratkoročni i dugoročni fizički i hemijski efekti izbagerovanog materijala na mestu deponovanja mogu izazvati kontaminaciju životnog okruženja. Zato je potrebna procena rizika po životnu sredinu, naročito u slučaju bagerovanja i deponovanja kontaminiranih sedimenata.

Glavne osobine sedimenata koje utiču na reakciju izbagerovanog materijala sa kontaminiranim sastojcima su: količina i vrsta gline, sadržaj organske materije, količina katjona i anjona u sedimentima, količina potencijalno reaktivnog gvožđa i mangana, kao i sposobnost oksido-redukcije, pH i zaslanjenost.

Jedan od glavnih efekata bagerovanja iz rečnih korita i akumulacija odnosi se na povećanje koncentracije suspendovanog nanosa i zamućenje vode. Ovaj efekat ugrožava, direktno ili indirektno, akvatični ekosistem. Efekat povećanja koncentracije suspendovanog nanosa se reflektuje preko smanjenja dopiranja svetlosti prema dnu i sniženja nivoa rastvorenog kiseonika. Pri tome treba imati u vidu da efekat zamućenja vode zavisi u velikoj meri od tehnologije bagerovanja. Otuda je pri izboru tehnologije bagerovanja neophodno voditi računa i o ekološkim uticajima povećanja koncentracije suspendovanog nanosa.

Najveći rizik po životnu sredinu, koji bagerovanje iz rečnih korita i akumulacija može izazvati, odnosi se na aktiviranje kontaminiranih elemenata u istaloženom nanosu na dnu. Poznato je da se uz najsitnije čestice nanosa vezuju teški metali, nutrijenti i još neke hemijske materije – zagađivači (DDT, dieldrin i dr.). Prilikom bagerovanja sa dna, mnogi hemijski zagađivači dospevaju u vodotok ili akumulaciju. Sa tog aspekta, posebno treba istaći potencijalne negativne posledice resuspenzije kontaminiranih čestica sa dna.

S obzirom da je uticaj hemijskih zagađivača na akvatični ekosistem vrlo složen, preporučuje se detaljno ispitivanje pre početka aktivnosti na bagerovanju iz rečnih korita i akumulacija.

Deponije izbagerovanog materijala mogu takođe imati negativne uticaje na životnu sredinu. Naime, može doći do oslobađanja zagađujućih materija prilikom odlaganja izbagerovanog materijala, transfera zagađivača putem površinskog oticaja sa deponije ili proceđivanja polutanata u podzemni akvifer.

Imajući u vidu opisane efekte, neophodno je da se prilikom izbora lokacije i izgradnje deponije vodi računa o potencijalnom površinskom i podzemnom oticaju sa tog prostora. U cilju zaštite od negativnih efekata kontaminiranih materijala, često se primenjuje pokrivanje zagađenog sloja izbagerovanog materijala čistim, nezagađenim materijalom. Ova metoda se posebno preporučuje u slučaju korišćenja deponija kao bioloških staništa.

12.3.6 Preporuke za bagerovanje

U Evropi su propisi za bagerovanje veoma rigorozni, a u nekim zemljama je vađenje rečnog nanosa potpuno zabranjeno. Ukoliko je neophodno da se bagerovanjem reši neki problem (na primer, ukloni sprud koji je prepreka za plovidbu), obavezno je da se nanos vrati u rečno korito nizvodno od zone radova.

U Srbiji se pri planiranju bagerovanja moraju poštovati brojna ograničenja i uslovi:

1. Bagerovanje iz osnovnog korita dozvoljeno je u zonama taloženja nanosa. Pritom je poželjno koncentrisati vađenje rečnog nanosa na sprudove, posebno na ušćima, radi poboljšanja vodnog režima i smanjenja rizika od poplava. Primer je sprud u zoni ušća Drine u Savu (slika 12.19), sa više miliona m^3 šljunka, koji treba ukloniti jer ima veoma nepovoljne uticaje na oba vodotoka - inicira rušenje obala na Drini i ometa plovidbu na Savi. Bagerovanje je takođe dozvoljeno vršiti iz plovnog puta (jer se time postiže održavanje ili postizanje propisanih plovidbenih gabarita) i iz akumulacija sa hidroenergetskom namenom (jer se time povećava njihova korisna zapremina);
2. U zonama objekata u osnovnom koritu su postavljena stroga ograničenja za bagerovanje:
   - Kako se ne bi dovela u pitanje stabilnost mostovskih stubova, bagerovanje sprudova na deonicama dužine 500 m uzvodno i nizvodno od mostova je dozvoljeno samo ukoliko postoji potreba za održavanjem proticajnog profila. Najniža dozvoljena kota iskopa u zoni mosta jednaka je koti nivoa male vode;
   - Bagerovanje nije dozvoljeno u zonama podvodnih prelaza cevovoda, a posebno gasovoda (preporučuje se da bagerovanje bude udaljeno 1 km uzvodno ili nizvodno od objekta);
3. Bagerovanje iz inundacija u neposrednoj zoni obala je dopušteno samo na konveksnim obalama i to na dovoljnoj udaljenosti od postojećih i projektovanih regulacionih građevina, kako se ne bi dovela u pitanje njihova stabilnost;
4. Bagerovanje iz inundacija u nebranjenom području (pojas unutar zaštitnih nasipa) se može vršiti, ali na rastojanju od min 50 m od trase postojećih i projektovanih nasipa, kao i postojećih i projektovanih regulacionih građevina;
5. Na pozajmištu materijala potrebno je izvršiti podelu na kasete (kasetiranje) kako bi se sprečila pojava sekundarnih tokova. To je veoma važno, posebno ako je pozajmište u zoni postojećih otoka. Dubinu bagerovanja u kasetama treba limitirati do kote dna osnovnog rečnog korita u zoni pozajmišta;
6. Iskopani materijal koji se neće koristiti, treba deponovati u starače i depresije. Odlaganje neiskorišćenog materijala treba izvršiti tako da se ne smanji proticajni profil i pogoršaju uslovi tečenja velikih voda.
7. Na prostoru eksploatacionog polja mora se vršiti kontrola stanja dna rečnog korita. Geodetsko snimanje pozajmišta materijala je obavezno pre i po završenoj eksplotaciji materijala. Na ovaj način dobijaju se podaci ne samo o količini izvađenog peska i šljunka u prethodnom periodu, već to predstavlja podlogu za praćenje obnavljanja rezervi na potezu eksploatacije.

Za svaku reku u Srbiji određena je količina nanosa koja se na godišnjem nivou sme ukloniti iz rečnog korita. Ona je jednaka količini nanosa koja se prirodnim putem može obnoviti preko vučenog nanosa koji dospeva sa uzvodnog dela sliva ili nastaje kroz mehanizam fluvijalne erozije. Kako se u Srbiji ne vrše merenja vučenog nanosa, za definisanje dozvoljenih količina korišćeni su podaci o transportu suspendovanog nanosa i hipoteza da je transport vučenog nanosa približno jednak 10% transporta suspendovanog nanosa na posmatranom sektoru vodotoka.

Slika 12.19: Sprud na ušću Drine u Savu (Izvor: savacommission.org)

13 IZVOĐENJE I ZAŠTITA PRELAZA PREKO VODOTOKA

13.1 Propusti

Propusti su objekti za ukrštanje vodotoka sa nasipom (nasip za zaštitu od poplava, nasip saobraćajnice ili železničke pruge). To su najzastupljeniji hidrotehnički objekti, koje je potrebno izvesti na svakom ukrštanju sa stalnim ili povremenim vodotokom.

Propust se sastoji od ulaznog dela, cevi i izlaznog dela. Jedna ili više paralelnih cevi se postavljaju u pravcu toka. Cevi mogu biti kružnog ili pravougaonog preseka, a najčešće su od armiranog betona ili rebrastog čelika.

Odgovarajuća zaštita propusta od erozije je veoma značajna za sigurnost ovog objekta, ali i nasipa kroz koji prolazi. Uzvodna zaštita ima manji značaj, iako se preporučuje da zaštita po nasipu oko cevi bude najmanje sa radijusom jednakim prečniku cevi (D). Zaštita korita nizvodno od propusta je veoma bitna, jer je u ovoj zoni brzina tečenja veća od kritične. Da bi se zaštitio sam nasip u zoni propusta, potrebno je da izvede zaštita koja će smanjiti turbulenciju i redukovati izlaznu brzinu toka. Pored toga, često je potrebna i zaštita nizvodne deonice korita vodotoka, koja će se dimenzionisati na osnovu izlazne brzine toka i karakteristika samog korita.

Na slikama 13.1 do 13.4 su prikazani različiti tipovi zaštite (gabionski madraci, lomljen kamen, gabioni i kamen u cementnom malteru), postavljeni van naselja i na deonici vodotoka kroz naseljeno mesto.

Slika 13.1: Gabionska zaštita propusta (Izvor: gabionbasket.org)

Slika 13.2: Zaštita propusta lomljenim kamenom (Izvor: kingcombe.com)

Slika 13.3: Propust sa betonskim krilnim zidovima i gabionskom zaštitom (Izvor: gabionbasket.org)

Slika 13.4: Deonica vodotoka u zoni propusta sa zidovima od kamena (Izvor: redi-rock.com)

Propusti kroz telo nasipa su uvek slaba mesta, zbog moguće pojave kontaktne erozije odnosno ispiranja čestica nasipa oko cevi. Ova opasnost se može smanjiti pažljivim ugrađivanjem i nabijanjem materijala oko cevi.

Na uzvodnom kraju propusta se često postavlja rešetka, koja sprečava plivajući otpad da začepi cev (slika 13.5).

Na nizvodnom kraju se može postaviti „žablji poklopac“ (slika 13.6) koji sprečava da pri velikim vodama recipijenta kroz propust voda uđe u branjeno područje, dok u normalnim uslovima dozvoljava neometano isticanje vode kroz propust.

Slika 13.5: Rešetka na ulazu u propust (Izvor: spec-net.com.au)

Slika 13.6: „Žablji“ poklopac (Izvor: althon.co.uk)

13.2 Mostovi

Mostovi su objekti na saobraćajnicama (putevima i prugama), koji premošćuju vodotoke. Takođe, postoje primeri da se različiti cevovodi prevode preko reka ili kanala pomoću mostovskih konstrukcija.

Osim u vrlo retkim slučajema, most predstavlja suženje u kome je proticajni profil smanjen stubovima i pristupnim rampama. Stoga se javlja međusobni uticaj objekta i vodotoka: most izaziva uspor velikih voda i eroziju rečnog korita, koji povratno ugrožavaju stabilnost mosta.

Izbor najpovoljnijeg profila za mostovski prelaz je bitan, jer se time smanjuju troškovi izvođenja mosta i smanjuje rizik od njegovog oštećenja/rušenja. Preporučuje se da mostovski prelaz bude na relativno stabilnoj rečnoj deonici, sa što užim major koritom.

Velike vode često nanose štetu na mostovima, jer tada dolazi do prelivanja mostovske konstrukcije, erozije korita u zoni mostovskih stubova i bokova mosta, erozije pristupnih rampi ili nasipa, a javlja se i nagomilavanje površinskog nanosa na konstrukciji mosta. Nastale štete mogu biti posledica nedovoljnog proticajnog profila mosta, pogrešno postavljenih stubova i oporaca, ali i nagomilavanja otpada.

Mostovi su posebno ugroženi erozijom rečnog korita, koja je posledica dva procesa:

1. Opšte deformacije korita u zoni mostovskog suženja odnosno dugoročnih promena kota rečnog dna pod uticajem prirodnih ili antropogenih promena u slivu ili na deonici vodotoka na kojoj se most nalazi. Promene mogu biti posledica protiveroz radova u slivu, izgradnje brane ili pregrade uzvodno od mosta, izgradnje nasipa i dr.;
2. Lokalne erozije oko stubova i bokova mosta.

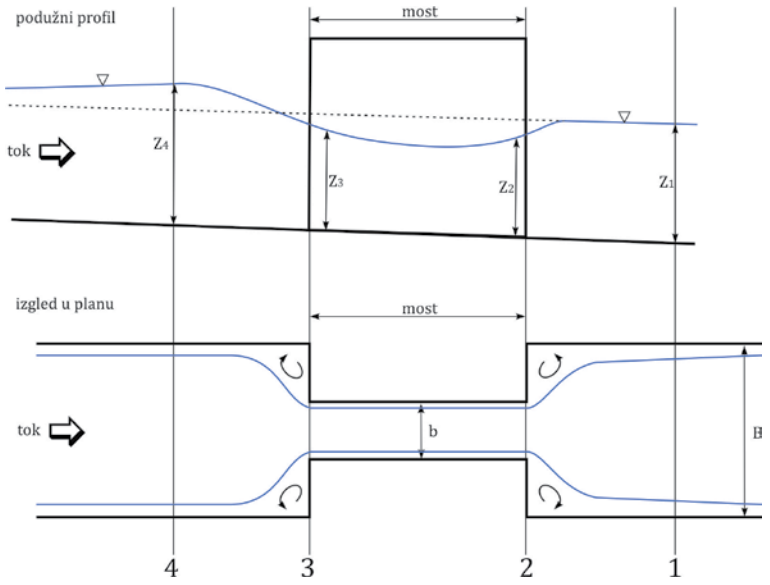
U tabeli 13.1 su navedeni svi rizici koji mogu dovesti do rušenja mosta.

Tabela 13.1: Elementi mostovskog prelaza koji mogu biti ugroženi erozijom

Deo mosta	Rizici	Najvažniji faktori rizika	Ostali faktori rizika
Stub mosta u koritu vodotoka	• Opšta erozija • Lokalna erozija	• Napadni ugao toka na stub • Suženje korita • Rečna krivina neposredno uzvodno • Plitko fundiranje	• Stabilnost korita • Bagerovanje • Promene režima u vodotoku ili na slivu • Suženje inundacija
Oporci mosta ulaze u korito vodotoka	• Opša erozija • Lokalna erozija	• Napadni ugao • Suženje korita • Suženje inundacija • Oporac na konkavnoj obali krivine • Plitko fundiranje	• Lutanje korita • Bagerovanje • Promene režima u vodotoku ili na slivu
Stub mosta na inundaciji, blizu osnovnog korita	• Pomeranje/ nestabilnost korita • Lokalna erozija	• Nestabilno korito • Nestabilne/nezaštićene obale • Konkavna obala • Plitko fundiranje	• Opšta erozija
Oporac mosta blizu osnovnog korita	• Pomeranje/ nestabilnost korita	• Nestabilno korito • Nestabilne/nezaštićene obale • Konkavna obala • Plitko fundiranje	• Lokalna erozija
Stub mosta na inundaciji, daleko od osnovnog korita			• Lokalna erozija
Oporac mosta daleko od osnovnog korita			• Lokalna erozija
Propust u navoznoj rampi	• Opšta erozija i erozija nizvodno od propusta	• Značajno suženje inundacija • Značajno učešće u protoku velike vode	
Nasute prilazne rampe	• Erozija • Nestablnost kosina	• Velike brzine toka na inundaciji • Značajno suženje inundacija • Uticaj talasa • Erodibilan nasuti materijal	

13.2.1 Položaj donje ivice konstrukcije mosta

Izgradnja mosta sa prilaznim navoznim rampama koje pregrađuju inundacije bitno menja uslove tečenja, naročito pri velikim vodama, kada mostovski profil predstavlja "usko grlo". Usled toga javlja se povišenje nivoa u odnosu na prirodno stanje ili **"uspor od mosta"** (slika 13.7). Ono zavisi od stepena suženja, karakteristika obalnih stubova, kao i broja, veličine i oblika stubova u koritu.



Slika 13.7: Uspor od mosta[71]

Proračun uspora od mosta je neophodna komponenta u projektu ove vrste objekata, jer se na osnovu njega određuje visinski položaj konstrukcije. Naime, da bi se most osigurao od prelivanja ili tečenja pod pritiskom donja ivica konstrukcije mora da bude iznad nivoa merodavne velike vode (u uslovima izgrađenog mosta), uz određeno slobodno nadvišenje koje omogućava prolaz plivajućih predmeta.

U okviru proračuna tečenja u zoni mosta , moraju se definisati zone uticaja, koje su ograničene poprečnim profilima (slika 13.7) [74]:

- Zona 1 je između nizvodnog lica mosta (profil 2) i poprečnog profila 1 nizvodno od mosta (zona 1), gde se tok širi. Dužina ove zone ($X_{1\text{-}2}$) varira u zavisnosti od protoka, dužine navoznih rampi (L_1 i L_2), oblika suženja i rapavosti. Prema različitim istraživačima:

$$X_1 - 2 \approx (1{,}5 \text{ do } 4) \cdot (L_1 + L_2) \qquad (13\text{-}1)$$

  gde su L1 i L2 dužine oporaca mosta (m)
- Zona 2 je deo toka ispod mosta;
- Zona 3 je uzvodno od mosta i u njoj se javlja postepeno suženje toka, od profila 4 do uzvodnog lica mosta. Dužina ove zone, prema različitim izvorima, iznosi:

$$X_3 \approx (0{,}5 \text{ do } 1{,}5) \cdot (L_1 + L_2) \qquad (13\text{-}2)$$

- U profilu 4 tok je neporemećen.

Gubici na proširenju i suženju nastaju usled povećanja prosečne brzine toka u mostovskom suženju u odnosu na neporemećen tok, čime se povećava gubitak na trenje) i stvaranja velikih vrtloga u oblasti širenja toka (zona 1).

Najčešće se proračun uspora od mosta radi uz pretpostavku uslova ustaljenog nejednolikog tečenja, korišćenjem Bernulijeve jednačine i to polazeći od profila 1 (u mirnom režimu). Detaljan prikaz postupka proračuna može se naći u [45].

Pri definisanju raspona mosta je bitno da se profil ne suzi previše, jer bi se u tom slučaju u profilu mosta javilo tečenje u burnom režimu, sa hidrauličkim skokom nizvodno od suženja. Ovakav režim bi izazvao eroziju korita i ugrozio stabilnost mosta i obala. Preporuka je da suženje σ = b/B ne bude veće od kritičnog:

$$\sigma_{kr} = \frac{\left(2+\frac{1}{\sigma}\right)^3 \cdot F_{r4}^2}{\left(1+2\cdot F_{r4}\right)^3} \tag{13-3}$$

gde je: B – širina profila bez mosta (m), b – širina mosta (m), F_{r4} – Frudov broj u profilu 4.

Da bi se izbeglo iterativno rešavanje Bernulijeve jednačine, u praksi se koriste empirijski postupci, uz korišćenje pomoćnih dijagrama koji se odnose na:

(a) stepen suženja toka u zoni mosta i izražava kao $M=A_m/A$ gde je: A - površina proticajnog profila reke (m^2), A_m – površina proticajnog profila ispod mosta (m^2);

(b) karakteristike oporaca mosta (dužina, nagib kosine, oblik i rapavost);

(c) broj, dimenzije i oblik stubova u koritu;

(d) položaj mostovskog otvora u odnosu na osovinu korita i

(e) ugao koji osovina mosta zaklapa sa osovinom toka.

Poznat je jednostavan **USBPR metod** koji se koristi u SAD za određivanje uspora od mosta (Δh) [26]:

$$\Delta h = K_m \cdot \frac{V_a^2}{2\cdot g} \tag{13-4}$$

gde je: V_a – fiktivna brzina jednolikog tečenja u pravougaonom koritu čija je širina jednaka širini mostovskog otvora (b_m), h_n - normalna dubina (m), K_m – empirijski koeficijent.

$$V_a = \frac{Q}{b_m \cdot h_n} \tag{13-5}$$

gde je:

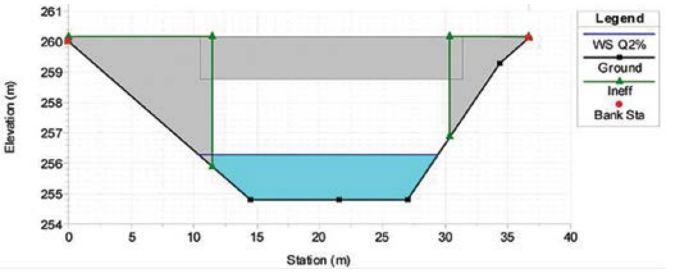
$$K_m = K_b + \Delta K_p + \Delta K_e \tag{13-6}$$

Koeficijent K_b obuhvata uticaj oporaca mosta i zavisi od njihovog oblika, koeficijent ΔK_p uticaj stubova (zavisi od oblika) i ΔK_e uticaj položaja mostovskog otvora u odnosu na osovinu korita [26].

Za proračune tečenja u zoni mosta koristi se takođe program HEC-RAS (slike 13.8 – 13.11). U njemu se gubici energije koje prouzrokuje suženje toka u profilu mosta računaju iz 3 dela [74]: (1) gubici energije neposredno nizvodno od mosta, nastali usled širenja toka; (2) gubici na samom mostu; (3) gubici neposredno uzvodno od mosta, nastali usled suženja toka. Za proračun gubitaka se koriste napred pomenuti koeficijenti uticaja navoznih rampi i stubova u koritu.

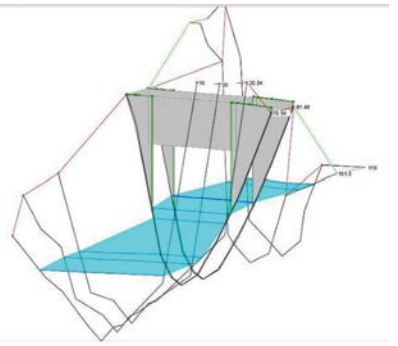
Hidrauličkim proračunom se određuje kota nivoa vode neposredno uzvodno od mosta, pri merodavnoj velikoj vodi (zavisi od kategorije saobraćajnice, najčešće velika voda povratnog perioda 100 ili 1000 godina). Kada se na tu kotu doda zaštitna visina dobija se kota donje ivice konstrucije mosta.

Slika 13.8: Izgled mosta (Izvor: IJČ)



Slika 13.9: Šematizovani poprečni profil mosta (Izvor: IJČ)

Slika 13.10: Situacija zone mosta sa snimljenim profilima (Izvor: IJČ)



Slika 13.11: Prostorni prikaz rezultata proračuna uspora od mosta (Izvor: IJČ)

Zaštitna visina treba da kompenzira nesigurnost hidrauličkog proračuna i obezbedi sigurnost od uticaja talasa, nagomilavanja leda i plivajućeg otpada. Zaštitna visina zavisi pre svega od karakteristika vodotoka i preporučuje se da bude 1,0 – 1,5 m. Ako se očekuju znatne deformacije korita pri velikim vodama i transport plivajućeg nanosa (stabla drveća itd.) visina slobodnog otvora treba da bude veća.

13.2.2 Zaštita mostovskih stubova

Mostovski stubovi u rečnom koritu remete tok, a posledica poremećaja je lokalna erozija u vidu erozionog levka (više u poglavlju 8.3.1). Ukoliko mostovski stub nije fundiran na dovoljnoj dubini, posledica može biti rušenje objekta.

Zaštita novih mostova od nepovoljnih procesa koji mogu dovesti do rušenja mosta postiže se odgovarajućim dimenzionisanjem proticajnog profila mosta i povoljnim oblikovanjem mostovskih stubova. Cilj je da se uspostavi takav režim tečenja u mostovskom profilu koji neće izazvati eroziju. Ukoliko se konstatuje da bi i pored toga mogla da se očekuje pojava erozionog „levka" i erozija obala, već u fazi izvođenja se primenjuju mere zaštite korita u zoni mosta. Zaštitu čine obaloutvrde duž obe obale u zoni mosta, čije karakteristike zavise od lokalnih uslova, kao i zaštita korita u zoni mostovskih stubova (elastični tepih od kamenog nabačaja, gabiona itd.).

Poželjno je da se mostovski prelaz izvede sa što manje stubova u koritu, tako da osovina mosta bude upravna na rečni tok, a osovine stubova mosta postavljene u pravcu strujnica. Takođe, potrebno je voditi računa o obliku mostovskih stubova, odnosno izabrati takav oblik koji će najmanje remetiti lokalnu strujnu sliku. Najpovoljniji su hidrodinamički oblikovani stubovi.

Ukoliko je u pitanju **zaštita postojećeg mosta** oko čijih stubova se pojavila erozija, najčešće se izvodi elastična zaštita od kamenog nabačaja na filtarskoj podlozi (13.12), jer je nju moguće relativno lako postaviti u tekućoj vodi. Kamen se postavlja u sloju debljine D=3 d_{50}, dok se krupnoća kamena određuje na osnovu empirijskih relacija kao što je formula **Izbaša**:

$$d_{50} = \frac{0{,}692 \cdot (K \cdot V)}{(\rho_s - 1) \cdot 2 \cdot g} \qquad (13\text{-}7)$$

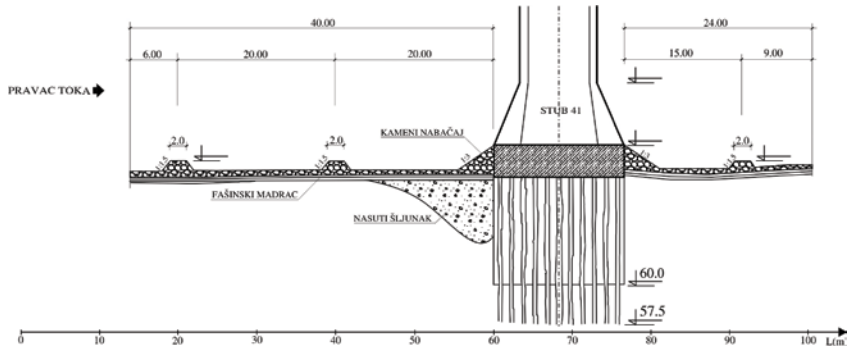
gde je: d_{50} - prečnik kamena zastupljenosti 50% (m), K - koeficijent oblika mostovskog stuba (K=1,5 za stub kružnog preseka, K=1,7 za pravougaoni stub), V - brzina toka u zoni stuba (m/s), ρ_s - gustina kamena (2650 kg/m^3), g – gravitaciono ubrzanje.

Slika 13.12: Zaštita mostovskog stuba kamenim nabačajem (Izvor: newsline.dot.state.mn.us)

Slika 13.13: Zaštita mostovskog stuba specijalnim betonskim elementima (Izvor: conteches.com)

U novije vreme se za zaštitu mostovskih stubova, pored kamenog nabačaja, koriste elastični madraci ili specijalni betonski elementi (slika 13.13).

Primer: Na slici 13.14 prikazana je zaštita stuba mosta kod Beške uz levu obalu Dunava, koja je izvedena ubrzo po završetku mosta, jer je već tokom izgradnje merenjima konstatovana značajna erozija korita (u periodu maj 1973 - mart 1974. godine dubina erozionog levka je bila između 2,8 i 5,5 m). Oscilacije u veličini erozionog levka bile su posledica više uticaja, kao što su: promene proticaja, promene pravca dejstva toka u odnosu na osovinu stuba, uticaj talpi oko stope stuba, uticaj ledobrana postavljenog ispred susednog pomoćnog stuba, efekat delimično sprovedene lokalne zaštite stuba kamenim nabačajem itd. Prikazano rešenje zaštite je definisano nakon terenskih istražnih radova, modelskih ispitivanja i tehno-ekonomske analize. Rešenje zaštite stuba sastojalo se u sledećem: (a) ispunjavanju formirane proloke oko stuba krupnim šljunkom; (b) potapanju fašinskog madraca dimenzija 70 x 90 m opterećenog slojem lomljenog kamena, (c) postavljanju tri praga od lomljenog kamena preko fašinskog madraca u pravcu osovine mosta, (d) kamenom nabačaju oko stope temelja stuba, sa funkcijom zaštite spoja fašinskog madraca sa stopom temelja i osiguranja za slučaj da se fašinski madrac ne postavi u potpunosti do stope temelja.



Slika 13.14: Zaštita stuba mosta kod Beške (Izvor: IJČ)

13.2.3 Zaštita oporaca mosta

Ukoliko se utvrdi da su oporci postojećeg mosta ugroženi ili se u profilu novog mosta očekuje značajniji poremećaj hidrauličkog režima i erozija, projektuje se zaštita. Primeri su dati na slikama 13.15 i 13.16.

Slika 13.15: Zaštita oporaca mosta gabionima (Izvor: archiexpo.com)

Slika 13.16: Zaštita oporaca mosta kamenim nabačajem (Izvor: estruct.com.au)

Dimenzije kamenog nabačaja se mogu odrediti na osnovu sledećih jednačina:

Ako je: $$\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \le 0{,}80 \qquad \frac{d_{50}}{h} = \frac{K}{\Delta} \cdot \frac{V^2}{g \cdot h} \tag{13-8}$$

Ako je: $$\frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} > 0{,}80 \qquad \frac{d_{50}}{h} = \frac{K}{\Delta} \cdot \left(\frac{V^2}{g \cdot h} \right)^{0{,}14} \tag{13-9}$$

gde je: d_{50} – srednji prečnik kamena (m), V – srednja profilska brzina u suženom preseku (m/s), h - srednja dubina u suženom preseku (m), Δ=1,65, K=0,89 (trapezni oblik suženja) – 1,02 (vertikalni zidovi).

13.3 Cevovodi

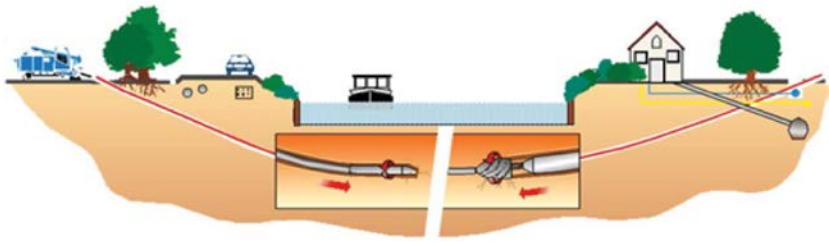
Ukrštanje naftovoda, gasovoda i vodovoda sa rečnim tokovima se rešava na dva načina: (a) cevovod se postavlja na mostovskoj konstrukciji ili (b) izvodi se podvodni prelaz cevovoda po dnu rečnog korita.

Prelaz cevovoda ispod korita reke je moguće izvesti:

- tehnologijom provlačenja cevovoda ispod rečnog korita ili
- postavljanjem cevi na rečno dno, u prethodno iskopan rov.

13.3.1 Izvođenje prelaza provlačenjem cevovoda ispod korita

Tehnologija provlačenja cevovoda ispod korita (horizontalno usmereno bušenje, HDD) je vrlo povoljna jer nema interakcije sa vodotokom: (a) cevovod se polaže ispod zone prognoziranih deformacija korita, što sigurno štiti cevovod od mehaničkih oštećenja; (b) ne menja se režim vodotoka pri izvođenju i eksploataciji objekta; (c) nije potrebno izvođenje podvodnih (ronilačkih, bagerskih, hidrotehničkih) i regulacionih radova i (d) izvođenje radova je moguće u bilo koje doba godine, jer ne zavisi od hidroloških i meteoroloških uslova.



Slika 13.17: Koso usmereno bušenje ispod korita reke (Izvor: vilkograd.com)

Gradilište se uobičajeno formira sa obe strane reke (slika 3.17). Na jednoj strani, pozicionira se mehanizacija i oprema za izradu i proširenje bušotine. Na suprotnoj strani se vrši priprema instalacija, cevi za uvlačenje i postavlja sistem rolera. Na osnovu sastava terena, dubine bušotine, kao i njene dužine vrši se izbor sile potiska.

Izvođenje radova sastoji se iz tri faze: osnovno bušenje, proširenje i završna faza uvlačenja instalacije, odnosno cevi. Pre početka rada odredi se željena horizontalna i vertikalna pozicija bušotine. Trodimenzionalno upravljana bušeća glava buši tunel, a suspenzija vode i bentonita iznosi isprani materijal u ulazno-izlazne jame. Posle uspešno izvedenog osnovnog bušenja, zamjenjuje se glava za osnovno bušenje glavom za proširivanje i tokom povratnog kretanja profil proširuje do potrebnog prečnika. Neposredno iza glave za proširivanje pričvršćena je cev koja se prevlači. Da bi se prevlačenje cevi uradilo bez oštećenja, oko nje je suspenzija bentonita koja smanjuje trenje.

Utiskivanje cevovoda se posebno preporučuje kada se prelaz izvodi na rekama sa znatnim deformacijama rečnog dna i velikim brzinama toka, kada je ograničen prostor za polaganje cevovoda (zbog postojećih cevovoda, mostova ili drugih objekata), na rekama sa intenzivnom plovidbom ili ukoliko postoje izgrađeni objekti (putevi, obaloutvrde i dr.) na obalama. Međutim, ovu tehnologiju nije moguće primeniti u slučaju nepovoljnih geoloških uslova, ukoliko je u pitanju veliki prečnik cevovoda (preko 1m) i dužina veća od 2 km.

HDD je pogodna za primenu u glinovitim, prašinastim i peskovitim materijalima, kada nema velikog pritiska podzemne vode. Međutim, ukoliko postoje česte promene litološkog sastava po trasi budućeg cevovoda, pri bušenju za polaganje cevi (HDD bušenje) može doći do problema (nestabilnost zidova bušotina, zastoje pri povlačenju cevi i sl.). Faktori koji mogu prouzrokovati nestabilnost ili kolaps HDD bušotine su: rastresiti nevezani materijal duž trase cevovoda, prisustvo jako vodopropusnih šljunkovitih materijala, visoki pritisci podzemne vode i strujanje podzemne vode.

Ukoliko je moguće, putanju cevovoda bi se trebalo projektovati tako da se problemi stabilnosti bušotine svedu na minimum, odnosno, da se izbegnu situacije u kojima je teško održati stabilnost. Na primer, treba izbeći (ako je moguće) takve putanje koje prolaze kroz slojeve krupnozrnog šljunka, rastresitog peska ili vrlo mekih glina/muljeva, u suprotnom potrebno je predvideti odgovarajuće dodatne mere stabilizacije.

13.3.2 Izvođenje prelaza klasičnom tehnologijom

Danas se klasična tehnologija izvođenja prelaza cevovoda koristi samo ako nije moguća primena HDD tehnologije.

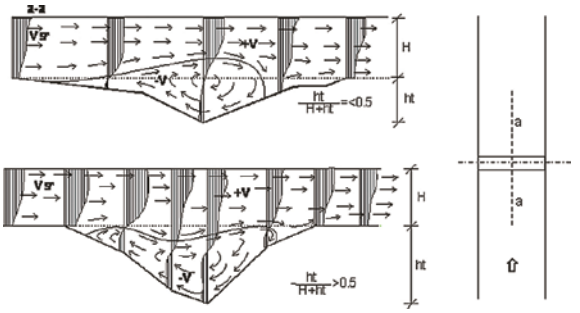
Klasična tehnologija podrazumeva iskop rova ("tranšeje") u rečnom dnu, polaganje cevi na izvesnu dubinu ispod dna korita, zaštitu cevovoda u tranšeji i zatrpavanje tranšeje. U slučaju velikih, plovnih reka za postavljanje cevi u rov se koristi plovna mehanizacija (slika 13.18).

Slika 13.18: Postavljanje cevi u rečno korito Volge (Izvor: volgar1.ds44.ru)

Kako je rečni tok u interakciji sa ovim podvodnim objektom, potrebno je rešiti brojne hidrotehničke probleme [36], a pre svega:

- determinisati hidrološke, hidrauličke i psamološke parametre toka,
- prognozirati moguću deformaciju rečnog korita u zoni podvodnog prelaza i
- prognozirati deformaciju tranšeje pod uticajem rečnog toka, kako bi se adekvatno planirala dinamika izvođenja radova.

Pri određivanju kote na koju se polaže cevovod u rečnom dnu, potrebno je sprovesti detaljne morfološke analize. Iako se time određuje kota za koju se smatra da neće biti u zoni erozije, na nju se dodaje sigurnosna rezerva za slučaj erozije rečnog dna i neravnomerne deformacije poprečnog profila.

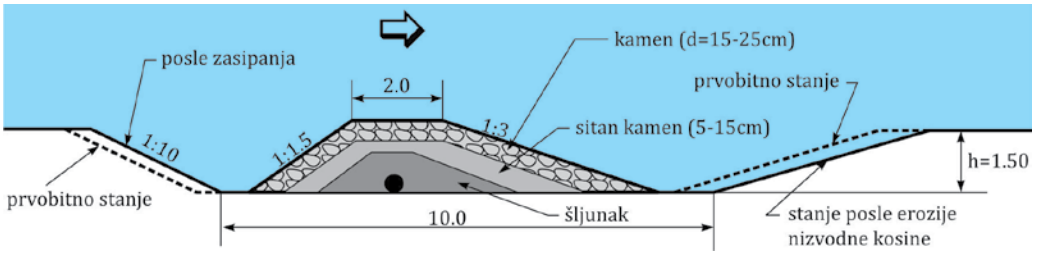


Slika 13.19: Deformacija tranšeje [36]

Deformacija iskopane tranšeje pod dejstvom rečnog toka (slika 13.19) se odvija pod spregnutim dejstvom dva procesa: (a) izdizanja dna i uzvodne kosine tranšeje usled zasipanja nanosa i (b) erozije nizvodne kosine. Rezultat je translacija cele tranšeje u pravcu toka. Brzini deformacije tranšeje treba prilagoditi brzinu polaganja cevovoda preko korita vodotoka.

Potrebno je rešiti i pitanje zaštite ukopanog cevovoda, pri čemu se razlikuju dva slučaja:

1. ako je kruna zaštitne građevine u nivou rečnog dna, potrebna je lokalna zaštita (slika 13.20), ali zaštitna građevina ne izazva lokalni poremećaj strujne slike i zato ima manje dimenzije;
2. ako je kruna građevine iznad nivoa rečnog dna, zaštitna građevina je prag na rečnom dnu, koji se mora projektovati sa nizvodnim osiguranjem dna rečnog korita (kao slapište).



Slika 13.20: Objekat za zaštitu cevovoda u tranšeji [36]

14 REGULACIJA VODNOG REŽIMA

Regulacija vodnog režima obuhvata sve hidrotehničke mere i građevine kojima se svesno utiče na promenu vremenske i prostorne raspodele voda. Postavljeni ciljevi se postižu uređenjem sliva, uređenjem korita vodotoka, izgradnjom retenzija, akumulacija, kao i izgradnjom rasteretnih i obodnih kanala.

14.1 Uređenje sliva

Uređenje sliva se sastoji u primeni brojnih mera i radova, usmerenih ka regulisanju površinskog oticanja i zaštiti zemljišta erozije.

14.1.1 Protiverozioni radovi i mere

Intenzitet erozionih procesa zavisi od interakcije prirodnih faktora (klime, geološko-pedološke podloge i reljefa) i načina korišćenja zemljišta, odnosno ljudske aktivnosti.

Protiverozioni radovi su radovi na izgradnji različitih objekata (pregrada, kineta, kanala, brana), kao i radovi na šumskim i poljoprivrednim melioracijama (melioracije pašnjaka, podizanje plantažnih voćnjaka i vinograda, pošumljavanje, zatravljivanje i sl.).

Protiverozione mere su akcije kojima se utiče na način obrade, održavanje i upravljanje zemljištem, šumama i vodama, kao i na načine njihovog korišćenja.

14.1.1.1 Tehnički protiverozioni radovi

Poprečni objekti se grade u srednjem i gornjem toku bujičnih tokova radi kontrole procesa erozije. Imaju višestruku ulogu: osiguravaju korito bujičnog toka, zadržavaju vučeni nanos u zaplavu, smanjuju uzdužni pad korita i vrše korekciju pravca toka.

Poprečni objekti se prema korisnoj visini dele na sledeće kategorije: fiksacioni pragovi (bez korisne visine), pragovi (sa korisnom visinom do 2,0 m) i pregrade (sa korisnom visinom iznad 2,0 m).

U gornjim, izvorišnim delovima sliva preovlađuju jaruge sa dubinskim procesima erozije. Osnovni cilj njihovog uređenja je stvaranje stabilnih deonica i uspostavljanje vegetacije.

Uređenje jaruga se vrši izgradnjom niza niskih objekata, čija je visina najčešće oko 0,5 - 2 m. Pragovi mogu biti od slaganog kamena, betona ili gabiona, ali se mogu izgraditi i manje stabilni, privremeni objekti od lokalno raspoloživih materijala (zemlja, fašine, pruće, itd.).

Rastojanje između pragova zavisi od njihove visine i pada dna jaruge. Obično je kod kamenih i betonskih pragova to rastojanje jednako tri visine, a kod pragova od pletera i fašina ide do četiri visine praga. Rastojanje može da se sračuna i prema formuli **Heede**-a:

$$l = \frac{h_k}{K \cdot tg\theta \cdot \sin\theta} \qquad (14\text{-}1)$$

gde su: l - rastojanje između pragova (m), h_k - korisna visina praga (m), θ - ugao nagiba dna korita i K - koeficijent koji zavisi od nagiba dna korita (za tg θ<0,2 K=0,3; a za tgθ>0,2 K=0,5).

Ako se prag izvodi od kamena potrebna krupnoća se određuje preko formule:

$$d_{50} = 0{,}7 \cdot \frac{(r_0 \cdot V)^2}{g \cdot \Delta \cdot \psi_{kr}} \qquad (14\text{-}2)$$

gde je: d_{50} – prečnik kamena (m), V – brzina toka (m/s), Ψ_{kr} – Šildsov parametar, r_0 – intenzitet turbulencije:

$$r_0 = \sqrt{c_s + 1{,}45 \cdot \frac{g}{C^2}} \qquad (14\text{-}3)$$

gde je: C – Šezijev koeficijent ($m^{1/2}/s$), c_s – faktor objekta koji se računa iz:

$$c_s = c_k \cdot \left(1 - \frac{d}{h}\right)^{-2} \qquad (14\text{-}4)$$

gde je: c_k – faktor turbulencije (preporučena vrednost c_k=0,025), h – dubina vode (m), d – visina objekta (m).

U gornjem delu hidrografske mreže su visine obala veće, a često se javljaju klizišta i odroni. Ovde se uređenje korita vrši izgradnjom pregrada visine 2-5 m, koje mogu biti od kamena u cementnom malteru, betona ili armirano-betonskih elemenata. Rastojanje između objekata zavisi od minimalnog pada zaplava iza objekata, koji najčešće iznosi 1 do 3%.

Bujične pregrade u nizu se primenjuju kod bujičnih tokova koji se nalaze na terenima jako podložnim eroziji (les) i ukoliko je korito već ukopano na velikoj dubini. Stepenaste pregrade sprečavaju dubinsku eroziju i zadržavaju nanos u zaplavu. Izgradnja sistema pregrada počinje od najnizvodnije, koju treba obezbediti od erozije izgradnjom slapišta. U zaplavu prve nizvodne pregrade podiže se druga pregrada i tako dalje. To omogućava izgradnju relativno niskih pregrada, što je ekonomično.

Kad je erozija korita vodotoka (potkopavanje dna i obala) ograničena na pojedine deonice (sa pojavama odrona, kliženja zemljišta i sl.), uređenje se izvrši izgradnjom pojedinačnih pregrada (slike 14.1 i 14.2). Pregrade se grade nizvodno od ugroženog sektora, tako da svojim zaplavom zaustavljaju dalje destruktivne procese.

Bujične pregrade su gravitacioni poprečni objekti koji služe za zaustavljanje krupnog vučenog nanosa, umanjenje pada korita i disipaciju kinetičke energije vode. Mogu imati različite oblike i biti izgrađene od različitog materijala, ali svi imaju iste osnovne elemente, a to su: masivno telo pregrade, krila pregrade, prelivni profil i slapište. Bujične pregrade imaju barbokane - otvore u telu za propuštanje malih voda.

Slika 14.1:Bujična pregrada od kamena (Izvor: Srbijavode)

Slika 14.2:Betonska bujična pregrada (Izvor: Srbijavode)

14.1.1.2 Biotehnički i biološki protiverozioni radovi

U slivu se sprovode i drugi tehnički radovi, čije je osnovni zadatak da na golim i strmim padinama stvore oslonac za razvoj biljaka (šumskih ili poljoprivrednih) kako bi se što pre uspostavila vegetacija i tako zaštitilo zemljište od erozije.

U grupu **biotehničkih radova** spada izvođenje pletera, ilofilterskih pojaseva, gradona, terasa sa zidićima, konturnih rovova i slično.

Najjednostavnije građevine u ovoj kategoriji su **pleteri**, koji se izvode od kolja i pruća, odnosno jeftinih materijala raspoloživih na licu mesta. Izgradnja pletera je vrlo jednostavna i relativno brza, a mana je njihova mala trajnost (maksimum 5 godina), koja dosta ograničava njihovu primenu. Razlikuju se:

- Jednostruki pleteri, visine 0,3-0,7 m, koji se izrađuju duž izohipsi, na međusobnom razmaku 5-10 m. Svrha jednostrukih pletera je da učvrste razoreno zemljište i pomognu obnovu uništene vegetacije.
- Dvostruki pleteri, visine do 1 m, a primenjuju se u jarugama i tamo gde je delovanje vode jače.

Ilofilterski pojasevi su naizmenični redovi travne i žbunasto-drvenaste vegetacije. Postavljaju se konturno (po izohipsi), a služe za redukciju površinskog oticaja i zaustavljanje erodiranog materijala (zadržavaju vučeni nanos i najveći deo suspendovanog nanosa).

Biološki radovi, kao što je pošumljavanje goleti, zatravljivanje goleti (podizanje veštačkih livada) i podizanje raznih vrsta voćnjaka na strmim terenima, izvode se radi rešavanja problema naglog slivanja vode i erozije na padinama sliva.

14.1.2 Druge mere za uređenje sliva

U Evropi se u novije vreme mnogo pažnje posvećuje primeni različitih mera za uređenje sliva, koje doprinose smanjenju površinskog oticaja i erozije. Primena tih mera ima i druge efekte, kao što je smanjenje rizika od poplava, poboljšano prihranjivanje podzemnih voda itd.

Održanje i zaštita livada i pašnjaka je bitno jer oni, zahvaljujući permanentnom pokrivaču i gustom korenovom sistemu, pružaju dobre uslove za prihvatanje i zadržavanje vode tokom poplava, infiltraciju vode u zemljište i usporavanje oticaja. Erozija je znatno manja nego na obradivom zemljištu, a takođe doprinose i zaštiti kvaliteta vode jer zadržavaju nanos i asimiliraju hranjive materije.

Uspostavljanjem i zaštitom postojećih pojaseva vegetacije duž saobraćajnica i vodotoka (slika 14.3) poboljšavaju se uslovi za infiltraciju vode i usporava površinski oticaj. Posebno su značajni pojasevi vegetacije na dugim i strmim padinama jer presecaju i usporavaju površinski oticaj i sprečavaju koncentraciju toka, te mogu doprineti smanjenju erozije.

Slika 14.3: Pojas vegetacije uz rečno korito (Izvor: nwrm.eu)

U poljoprivredi se preporučuju sledeće mere, koje doprinose smanjenju erozije i povećanju kapaciteta infiltracije vode u zemljište: (1) Primena plodoreda jer poboljšava strukturu zemljišta; (2) Konturna obrada zemljišta. Ova mera je u Srbiji obavezna na terenima sa nagibom većim od 10%; (3) Konzervacijski sistem obrade zemljišta (oko 30% žetvenih ostataka zadržava se na površini kao zaštitni tampon, a ostatak pri površini); (4) Upotreba mehanizacije ograničena na stalne trake na parcelama, kako bi se smanjilo sabijanje zemljišta; (5) Ograničen broj grla stoke na određenim površinama, jer krupne sorte stoke mogu imati brojne štetne uticaje na zemljište (sabijanje, razaranje strukture zemljišta i gubitak vegetacije); (6) Primena malčiranja (zastiranja golog obradivog zemljišta ili zemljišta oko biljaka prirodnim materijalima).

Mere za poboljšanje retenzionog kapaciteta poplavnih područja uključuju modifikacije korita, uklanjanje naslaga nanosa, formiranje jezera ili bara, novu ili izmenjenu poljoprivrednu praksu, pošumljavanje, povratak autohtonih trava, žbunja i drveća, formiranje travnatih bazena ili močvara, uklanjanje invazivnih vrsta, formiranje priobalnih pojaseva.

Obnavljanje prirodne infiltracije vode u zemljište smanjuje oticaj sa okolnog terena i poboljšava stanje akvifera podzemnih voda. Mehanizmi za obnavljanje i poboljšanje kapaciteta infiltracije zemljišta uključuju: (1) površinske objekte koji olakšavaju/povećavaju prihranjivanje (na pr. infiltracioni bazeni) i (2) indirektno ili direktno prihranjivanje podzemnih voda (bunarima).

Uređenje urbanih sredina u cilju smanjenja površinskog oticaja je takođe bitna komponenta uređenja sliva. Između ostalog, predlaže se da se vodonepropusne obloge (asfalt, beton) gde je moguće zamene vodopropusnim i time omogući infiltracija kišnice u zemljište ili njeno dalje odvođenje podzemnim putem. Predlaže se izvođenje plitkih rovova (slika 14.4), koji mogu da prihvate ili odvedu suvišnu površinsku vodu iz naseljenog mesta. Rovovi mogu biti obloženi ili neobloženi, sa pregradama koje će usloviti taloženje nanosa i doprineti poboljšanju kvaliteta vode. Takođe, predlaže se izvođenje različitih objekata koji prihvataju deo površinskog oticaja i eventualno ga usmeravaju u podzemlje. U ovu kategoriju spadaju upojni šahtovi (ukopane komore, ispunjene šutom ili granulisanim kamenom) i upojni rovovi uz nepropusne površine kao što su parkinzi ili putevi.

Slika 14.4: Plitki rov u gradskom području (Izvor: nwrm.eu)

Slika 14.5: Depresija uređena za prihvat površinskog oticaja (Izvor: nwrm.eu)

Posebna pažnja se posvećuju uređenju depresija (bazena) pod vegetacijom, koje tokom jakih kiša treba da zadrže oticaj sa nepropusnih površina i omoguće taloženje nanosa i pratećih zagađenja, da bi se zatim voda kontrolisano odvela u obližnji vodotok. Uređene površine bazena su suve (slika 14.5), osim u periodima jakih kiša i mogu imati i druge funkcije (na primer, rekreacija). Idealne su za igrališta, rekreativne površine ili javne otvorene površine. U tom prostoru se sadi drveće, žbunje ili drugo bilje, koje popravlja vizualni izgled

i obezbeđuje stanište za životinje. Depresije mogu biti uređene kao infiltracioni bazeni, primenom rešenja koja omogućavaju infiltraciju vode u zemljište i podzemne vode.

Retenziona jezera u gradovima su stalna jezera sa uređenim obalama i okolinom, projektovana tako da imaju dodatnu zapreminu za prijem površinskog oticaja tokom kišnih epizoda (slika 14.6). Formiraju se korišćenjem prirodnih ili iskopom novih depresija, kao i izgradnjom nasipa.

Oticaj od kiše se zadržava i prečišćava u jezeru. Već samo zadržavanje vode utiče na uklanjanje zagađenja putem taloženja, dok vodna vegetacija i biološki postupci dodatno prečišćavaju vodu. Retenziona jezera tako doprinose uklanjanju urbanog zagađenja i poboljšanju kvaliteta površinskog oticaja.

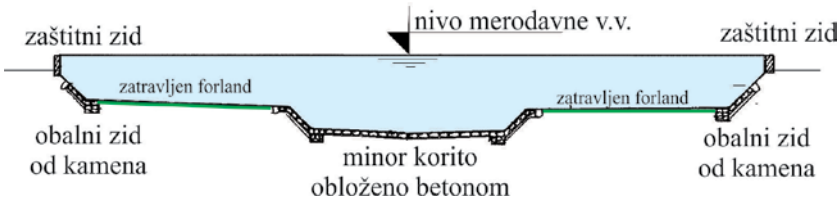
Svako jezero treba da ima: (1) taložnicu za nanos ili drugi vid predtretmana uzvodno od jezera, (2) stalnu akvatoriju koja je pod vodom tokom cele godine, (3) prostor za privremeni prihvat i ublažavanje poplave, obezbeđen uređenim obalama stalnog jezera i (4) sigurnosni preliv za bezbedno isticanje kada je kapacitet jezera prevaziđen. Dobro osmišljena i održavana jezera doprinose estetskim i ekološkim karakteristikama urbanog pejzaža, naročito u okviru javnih otvorenih prostora.

Slika 14.6: Retenziono jezero (Izvor: champaignil.gov)

14.2 Uređenje korita vodotoka

Uređenje kompletnog korita vodotoka se primenjuje na malim vodotocima, najčešće bujičnog režima.

Profil vodotoka (slika 14.7), često sa obostranim odbrambenim nasipima ili zidovima, tako je dimenzionisan da bez izlivanja može da propusti merodavnu veliku vodu (čiji povratni period zavisi od vrednosti branjenog područja).



Slika 14.7: Primer "gradske regulacije" korita vodotoka (Izvor: IJČ)

U okviru regulacije se radi profilisanje korita, koje dobija ujednačen poprečni profil i pravilniju trasu. Gradske i poljske regulacije sadrže brojne objekte, kao što su pragovi, konsolidacioni pojasevi, kaskade.

Kaskada (slika 14.8) se izvodi na mestu denivelacije dna vodotoka (koncentracija energetskog pada) u svrhu zaštite korita od pojačanog erozionog delovanja vode. Koriste se različiti tipovi kaskada, zavisno od terenskih uslova i raspoloživosti materijala. Za savladavanje vertikalne denivelacije do 2m koriste se vertikalne kaskade, koje se sastoje od preliva sa prilaznom deonicom i umirujućeg basena sa nizvodnom zaštitom.

Slika 14.8: Kaskada sa slapištem (Izvor: IJČ)

Kompletnu regulaciju vodotoka treba izbegavati, jer se time u potpunosti menja životna sredina i nepovoljno utiče na nizvodni sektor vodotoka. Ovakve intervencije su, međutim, često neophodne kada je potrebno obezbediti zaštitu od voda gusto naseljenih područja, u kojima dugogodišnja neplanska gradnja onemogućava drugo rešenje osim regulacije korita uz izgradnju retenzionih prostora na uzvodnim delovima rečnog sliva (ukoliko za to postoje raspoloživi prostori).

Primer ovakvog nametnutog rešenja je regulacija Baričke reke, koja je čestim plavljenjem ugrožavala prigradski deo Beograda (slika 14.9). Kako su stambeni objekti izgrađeni na obalama, nije bilo moguće podizanje nasipa, pa čak ni stalnih zaštitnih zidova. Takođe nije bilo prostora za izvođenje regulisanog korita prirodnijeg izgleda, nego je izvedeno jednogubo trapezno korito, kompletno obloženo betonom (slike 14.10 i 14.11). Betonskom oblogom su smanjeni otpori tečenju i postignuta maksimalna propusna moć korita pri velikim vodama. Treba istaći da posle intervencije regulisano korito prihvata najviše 50-godišnju veliku vodu, dok će zaštita područja od 100-godišnje velike vode biti obezbeđena tek kada se na slivu Baričke reke izvede projektovana retenzija.

Slika 14.9: Izlivanje iz neregulisanog korita Baričke reke 2010. godine (Izvor: IJČ)

Slika 14.10: Regulisano korito Baričke reke (Izvor: IJČ)

Slika 14.11: Ulivni objekat na uzvodnom kraju regulisanog korita (Izvor: IJČ)

Najčešći problem na regulisanim deonicama kroz gradove su mostovi, čija je donja ivica konstrukcije niža od krune regulisanog korita. Ovakvi mostovi izazivaju uspor koji dovodi do plavljenja priobalja. Primer je poplava Paraćina 2014. godine, gde su nepovoljno profilisani mostovi izazvali izlivanje velike vode reke Crnice.

Regulisana korita (slika 14.12) se moraju stalno održavati, što podrazumeva uklanjanje nanosa, otpada, vegetacije i popravku oštećenih obloga.

Slika 14.12: Regulisano korito Lukavice kod Lazarevca (Izvor: IJČ)

14.3 Objekti za prihvat i transformaciju talasa velikih voda

Za prihvat i transformaciju talasa velikih voda koriste se akumulacije i retenzije, odnosno prostori koji se formiraju izgradnjom brana i nasipa.

14.3.1 Akumulacije

Akumulacije su najčešće višenamenski objekti u kojima je deo korisne zapremine ostavljen za prihvat poplavnih talasa. Da bi imala funkciju u regulaciji vodnog režima, akumulacija treba da kontroliše veliki deo sliva i da ima dovoljan prostor za zadržavanje poplavnog talasa određene verovatnoće ili se ovaj prostor mora obezbediti adekvatnim upravljanjem.

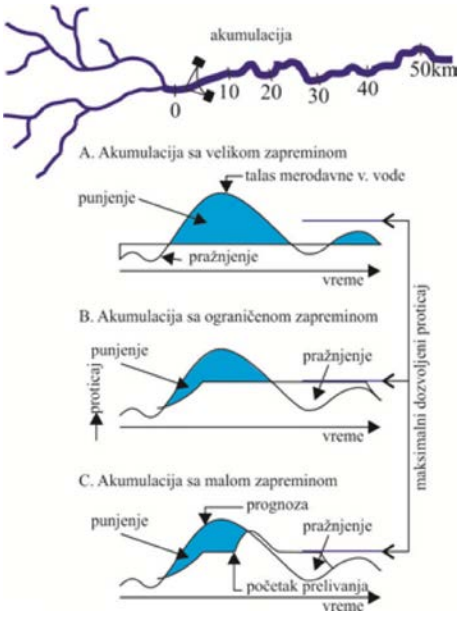
Slika 14.13: Ispuštanje vode kroz prelive brane HE Đerdap 1 na Dunavu (Izvor: glavnevesti.com)

Slika 14.14: Ispuštanje vode na prelivu brane Bovan na Moravici (Izvor: mapio.net)

U vreme velikih voda ispuštanje vode iz akumulacije se može vršiti kontrolisano (kroz ustave, temeljne ispuste i druge evakuacione organe – slika 14.13) ili preko slobodnog preliva (prelivanje počinje kada se ispuni prostor rezervisan za prijem poplavnog talasa – slika 14.14).

Transformacija poplavnog talasa u akumulaciji zavisi od njene zapremine, što je ilustrovano na slici 14.15. Akumulacije velike zapremine mogu da prihvate kompletan poplavni talas, a ukoliko je zapremina mala samo jedan deo poplavnih voda.

Da bi akumulacije učestvovale u odbrani od poplava, moraju biti ispunjeni određeni uslovi. U slučaju višenamenskih akumulacija mora se tačno odrediti koji prostor je rezervisan za prijem poplavnog talasa. U slučaju akumulacija čija je primarna uloga zaštita lokalnih područja, moraju se definisati vlasnički odnosi i uspostaviti mere upravljanja, osmatranja i održavanja objekata. U protivnom, akumulacije ne mogu planski ostvarivati zadatke vezane za odbranu od poplava čak ni lokalnih područja. Eventualni pozitivni efekti su više posledica povoljnih okolnosti, a manje planska i sistematska aktivnost.



Slika 14.15: Transformacija talasa velikih voda u zavisnosti od zapremine akumulacije [25]

14.3.2 Retenzije

Retenzija reguliše vodni režim vodotoka radi zaštite nizvodnih područja od poplava tako što se smanjuje maksimalni protok i produžava trajanje velikih voda (ista zapremina vode se kroz vodotok propušta duže vreme). Razlikuju se:

- čeone retenzije, koje se formiraju izgradnjom malih brana na vodotocima u brdskim predelima (sa uskim dolinama) i
- bočne (nizijske) retenzije, koje se formiraju na ravničarskim vodotocima izvođenjem obuhvatnih nasipa.

Prema nameni i načinu korišćenja, što uključuje i parametar učestalosti angažovanja, retenzije mogu biti: (a) "pogonske" ili "lokalizacione" retenzije, koje služe za redovno prihvatanje poplavnog talasa i (b) "nužne" retenzije, čije je uključenje predviđeno samo u vanrednim prilikama.

14.3.2.1 Čeone retenzije

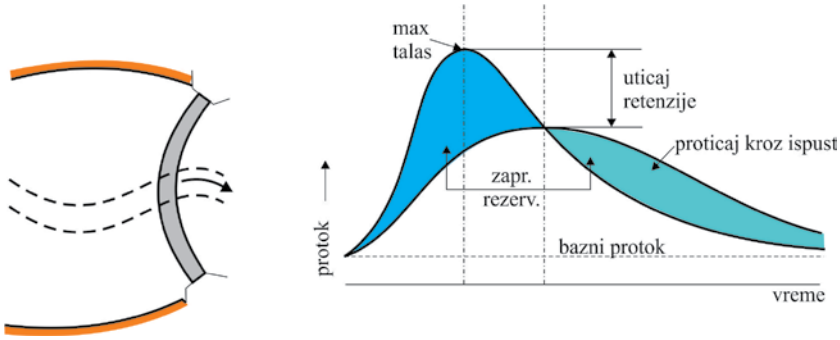
Čeone retenzije čine manje brane sa akumulacionim prostorom, izgrađene u gornjim delovima sliva (slika 14.16). Zapremina akumulacionog prostora i visina brane čeone retenzije zavise od veličine i karakteristika sliva, zapremine poplavnog talasa usvojene (merodavne) verovatnoće pojave vode, kao i karakteristika evakuatora i načina kontrole isticanja. Na slici 14.17 prikazana je transformacija poplavnog talasa u čeonoj retenziji.

Slika 14.16: Brana čeone retenzije (Izvor: IJČ)

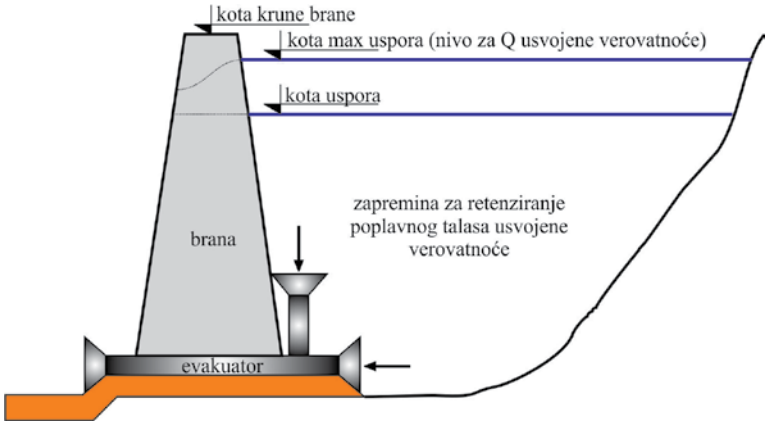
U slučaju **retenzije sa slobodnim isticanjem** (slika 14.18) voda se odmah pri nailasku evakuiše nizvodno, uz transformaciju poplavnog talasa uslovljenu propusnom moći evakuatora. Ova vrsta retenzija ne može se koristiti za druge namene, kao što je ribarstvo, rekreacija ili slično.

Retenzije sa kontrolisanim isticanjem (slika 14.19) su prelazni oblik između retenzija i akumulacija. Imaju upravljive evakuacione organe (temeljni ispust sa zatvaračem, ustave

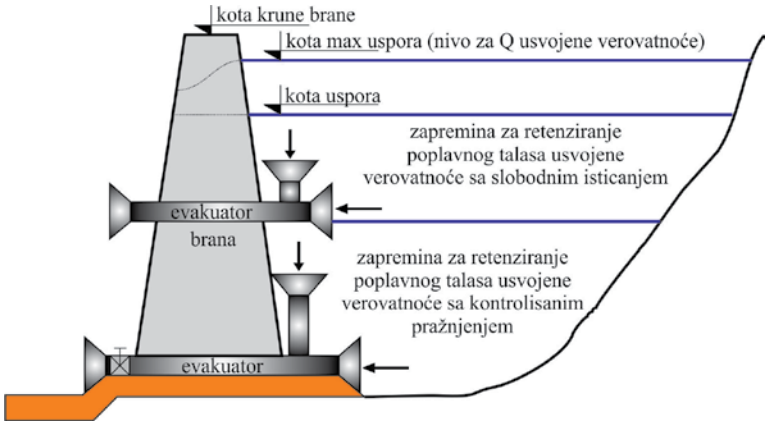
na prelivu). Mana ove vrste retenzija je to što je potrebna pouzdana najava i prognoza poplavnog talasa, kao i potreba za stalnim prisustvom radne snage za manipulisanje evakuacionim organima.



Slika 14.17: Transformacija poplavnog talasa u retenziji (Izvor: IJČ)



Slika 14.18: Brana retenzije sa slobodnim isticanjem (Izvor: IJČ)



Slika 14.19: Brana retenzije sa kontrolisanim isticanjem (Izvor: IJČ)

14.3.2.2 Bočne (nizijske) retenzije

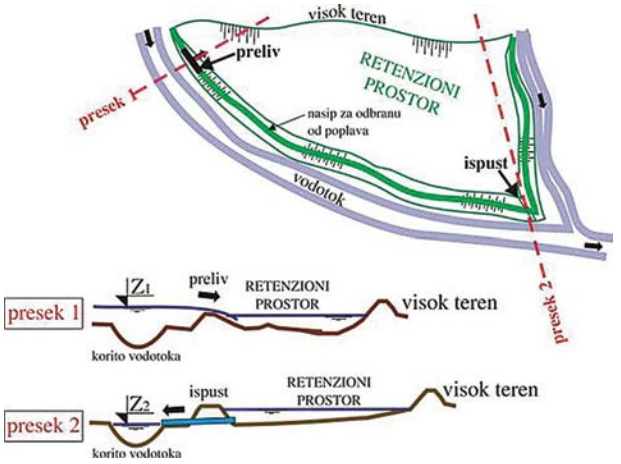
Bočne (nizijske) retenzije su priobalne teritorije opremljene objektima za prihvat velikih voda (slika 14.20). Koriste se samo u izuzetnim prilikama, kada su glavni nasipi ugroženi ili kada velike vode prevazilaze obezbeđeni stepen zaštite.

Najčešće se formiraju izgradnjom sekundarnih nasipa, na poljoprivrednim ili šumskim zemljištima. Kao i u slučaju čeone, nizijska retenzija prihvata deo zapremine poplavnog talasa i smanjuje mu vrh.

Kontrola velikih voda korišćenjem nizijskih retenzija sastoji se u kontrolisanom plavljenju unapred izabranog područja. U retenziju se upušta deo poplavnog talasa, voda se privremeno akumulira, a time se smanjuje vrh poplavnog talasa na nizvodnom sektoru vodotoka i sprečava prelivanje odbrambene linije na kritičnim sektorima sa niskim nasipima.

Do skora se smatralo da nizijske retenzije treba aktivirati samo kao poslednje sredstvo za sprečavanje plavljenja nekog visoko vrednog gradskog ili industrijskog područja – otuda termin "nužna" retenzija. Naime, smatralo se da formiranje nizijskih "nužnih" retenzija ima opravdanja (osim u cilju zaštite ljudskih života) samo ako su ekonomski efekti koji su postižu zbog smanjenja poplavnog talasa veći od šteta koje će nastati plavljenjem retenzionog prostora i sredstava uloženih u izgradnju retenzije.

Međutim, u novije vreme se nizijske retenzije često koriste kao jedna od komponenti integralnog sistema zaštite od poplava na određenom slivu (sistem se sastoji od nasipa, nizijskih retenzija, regulacije korita i drugih mera), jer se time obezbeđuje veća sigurnost zaštite područja. Poznate su nizijske retenzije u Hrvatskoj, u Srednjoj Posavini – Lonjsko i Mokro polje, koje imaju izvanredan značaj za upravljanje velikim voda na ovom sektoru vodotoka, ali i efekte koji se osećaju daleko nizvodno. U toku je izgradnja sistema nizijskih retenzija na reci Tisi u Mađarskoj (slike 14.21 i slike 14.22).



Slika 14.20: Nizijska retenzija (Izvor: IJČ)

Slika 14.21: Nizijska retenzija na srednjem toku Tise (Izvor: climate-adapt.eea.europa.eu)

Slika 14.22:Objekat na obodnom nasipu retenzije Tisarof služi za upuštanje vode (Izvor: innoteka.hu)

14.4 Rasteretni i obodni kanali

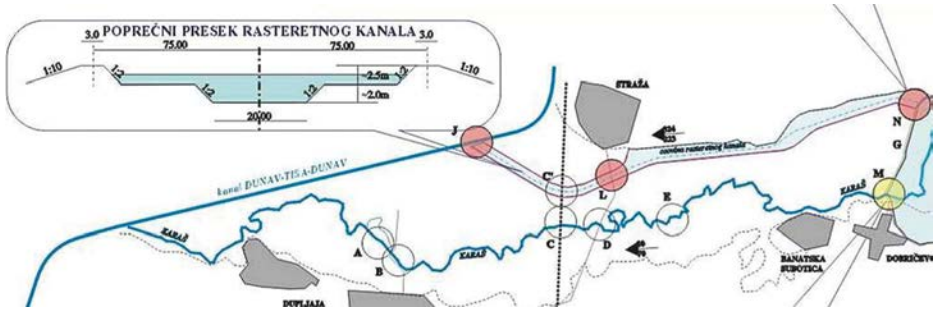
Rasteretni i obodni kanali se koriste radi prostorne preraspodele voda koje ugrožavaju određeno područje.

14.4.1 Rasteretni kanal

Rasteretni kanal služi za zaštitu područja od velikih voda. Ako postojeće rečno korito iz nekog razloga nema dovoljnu propusnu moć za velike vode, deo poplavnih voda se prihvata rasteretnim kanalom i odvodi nizvodno.

Ova mera je dosta skupa jer treba izgraditi novo korito rasteretnog kanala, sa svim objektima (zahvat i razdelna građevina na početku, mostovi i dr.), tako da se primenjuje kada nema drugog rešenja.

Rasteretni kanali po položaju mogu biti: **poprečni** - prebacuju deo talasa velikih voda u drugi vodotok ili **paralelni** - trasiraju se paralelno sa rekom čije velike vode delimično prihvataju (slika 14.23).

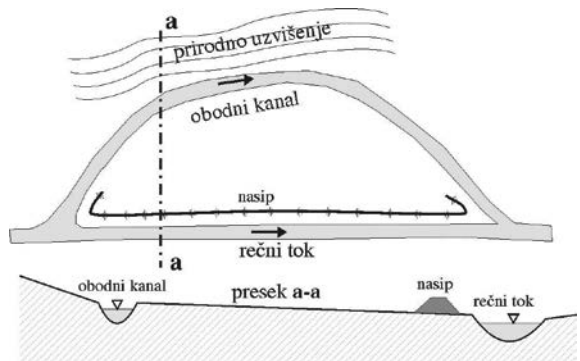


Slika 14.23: Primer projekta paralelnog rasteretnog kanala, koji prihvata protoke veće od prirodnog kapaciteta donjeg toka reke Karaš (Izvor: IJČ)

14.4.2 Obodni kanal

Obodni kanali prikupljaju vodu koja se sliva sa padina u zaleđu branjenog područja, kao i manje potoke i rečice, i gravitaciono je odvode do recipijenta (slika 14.24). Obodni kanali mogu imati i nasipe, što zavisi od veličine kanala, topografije terena i uslova građenja.

Obodni kanali se izvode po granici područja, sa što manjim padom, kako bi se prikupljene vode u recipijent ulivale gravitaciono pri svim vodostajima. U slučaju da se suvišna voda ne može uvesti gravitaciono, prebacuje se crpljenjem u recipijent.



Slika 14.24: Trasa obodnog kanala (Izvor: IJČ)

14.5 Objekti za kontrolu nivoa vode

Za kontrolu nivoa vode u vodotocima izvode se stalni objekti (ustave), ali i privremene brane.

Ustave se koriste za održavanje nivoa i protoka u vodotoku (slika 14.25). Postoji veliki broj tehničkih rešenja ustava, ali sve imaju prag u koritu na koji se montira hidromašinska oprema.

Slika 14.25: Ustava
(Izvor: ceephotos.karcor.com)

Privremena brana je objekat koji pregrađuje korito vodotoka radi obezbeđenja uslova za rekreaciju ili povišenja nivoa vode za druge potrebe. Uklanja se na početku perioda velikih voda. Na slikama 14.26 dat je primer privremene brane koju čini gumena cev ispunjena vodom. Postavlja se na betonskom pragu.

Slika 14.26: Privremena brana (Izvor: rubberdam.org)

15 UPRAVLJANJE RIZIKOM OD POPLAVA

15.1 Uzroci nastanka i karakteristike velikih voda

Sezonske oscilacije nivoa i protoka prirodne su odlike vodotoka. Međutim, ekstremne meteorološke pojave kao što su intenzivne kiše (pljuskovi) ili naglo otapanje snega prouzrokuju pojavu **velikih voda.** Velike vode mogu prouzrokovati i drugi prirodni i antropogeni faktori, kao i njihove kombinacije.

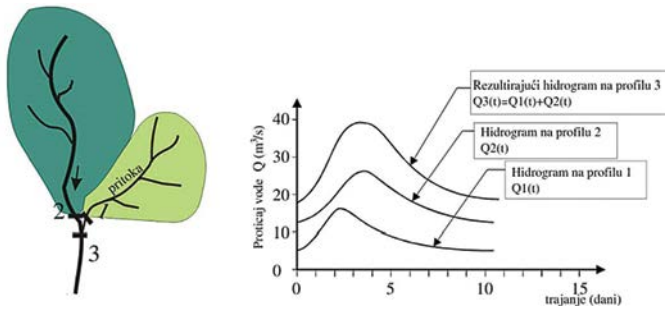
Kada protok velike vode prevaziđe kapacitet osnovnog rečnog korita počinje izlivanje odnosno **poplava** priobalnog područja koja, ukoliko područje nije zaštićeno objektima, ugrožava ljudske živote, imovinu i infrastrukturu. Poplave se svrstavaju u red najvećih prirodnih katastrofa na globalnom nivou, a na našem prostoru često uzrokuju vanredne situacije, praćene visokim štetama i gubitkom ljudskih života.

15.1.1 Uzroci nastanka velikih voda

Uzroci nastanka velikih voda ili promena karakteristika velikih voda mogu biti prirodni, antropogeni i kombinovani (prirodni i antropogeni) [60].

Prirodni uzroci nastanka velikih voda na vodotocima su:

a) intenzivne kiše - pljuskovi;
b) naglo otapanje snega i leda;
c) naglo otapanje snega praćeno kišama;
d) formiranje barijera u rečnim koritima usled nagomilavanja ledenih santi;
e) formiranje barijera u rečnim koritima usled nagomilavanja rečnog nanosa i materijala iz priobalnih klizišta;
f) talasi od vetra praćeni povišenjem nivoa vode (duž obala izloženih jakim i dugotrajnim vetrovima) i
g) superponiranje hidrograma velikih voda pri istovremenom (koincidentnom) nailasku talasa velike vode na glavnom toku i pritokama (slika 15.1).

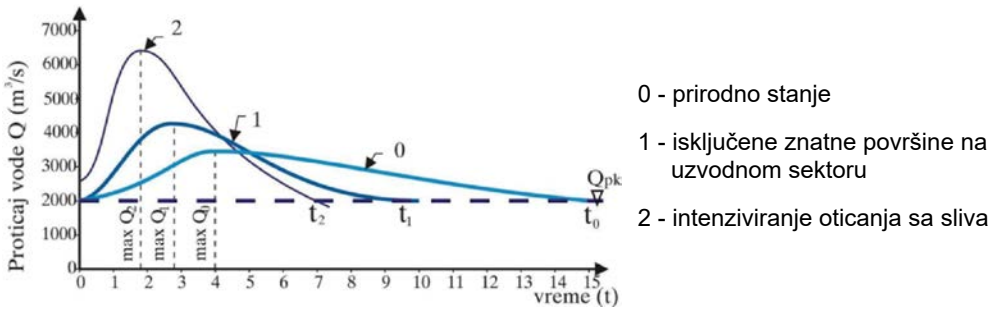


Slika 15.1: Superponiranje hidrograma velikih voda na glavnom toku i pritoci, pri istovremenom (koincidentnom) nailasku velikih voda [60]

Antropogeni uzroci koji doprinose pogoršavanju karakteristika velikih voda i opšteg režima voda su mnogobrojni, a navode se samo sledeći:

a) rušenje brana i ustava na rekama i u slivu;
b) intenziviranje oticanja vode sa sliva usled krčenja šuma i uništavanja druge prirodne vegetacije, kao i usled povećanja površina sa povećanim koeficijentima oticaja i povećanim brzinama oticanja voda u odnosu na prirodno stanje u slivu;
c) isključenje ranije plavljenih površina (inundacija), odnosno izgradnja odbrambenih nasipa uz osnovno korito vodotoka;
d) izgradnja brana, ustava, mostova i drugih objekata koji prouzrokuju povišenje nivoa velikih voda u odnosu na prirodno stanje;
e) taloženje nanosa u koritima vodotoka usled čega nastaje tzv. "dodatni uspor";
f) odlaganje otpadnih materijala u rečna korita i protočne inundacije, kao i nekontrolisana izgradnja objekata u protočnim inundacijama;
g) nepravilno upravljanje (rukovanje) akumulacijama, retenzijama, rasteretnim kanalima, ustavama i drugim objektima kojima se menja prirodni ili projektovani veštački režim voda;
h) globalne klimatske promene koje će, prema sadašnjim prognozama, izazvati u budućnosti veće i duže suše, ali i češće i veće velike vode.

Na većini vodotoka je pojedinačno ili zbirno dejstvo nepovoljnih antropogenih uticaja doprinelo izrazitom pogoršanju režima velikih voda, koje se ogleda prvenstveno u povećanju ekstremnih protoka (i vodostaja), skraćenju trajanja velikih voda i povećanju ukupnih zapremina talasa velikih voda. Na slici 15.2 dat je šematski prikaz tipične promene hidrograma na reci pod uticajem isključenja ranije plavljenih površina, kao i pod uticajem intenziviranja oticaja sa sliva uzvodno od posmatranog profila.



Slika 15.2: Šematski prikaz tipične promene hidrograma Q(t) [60]

Sa druge strane, postoje antropogeni uticaji koji doprinose poboljšanju karakteristika velikih voda. To su:

a) pošumljavanje ranije ogolelih površina u slivu;
b) uređenje rečnih korita u cilju povećanja propusnih moći korita za vodu, led i nanos;
c) izgradnja akumulacija i retenzija u cilju smanjenja talasa velikih voda.

Kombinovani uzroci nastanka i promena režima velikih voda registrovani su na skoro svim vodotocima i kod nas i u svetu, pri čemu su ove promene, u celini gledano, nepovoljne kako sa gledišta zaštite od poplava, tako i sa gledišta korišćenja i očuvanja vodnih resursa.

Iako su velike vode u suštini slučajnog karaktera, ipak se za pojedine vodotoke mogu dati globalne ocene o godišnjim dobima u kojima se velike vode najčešće javljaju. Tako se velike

vode na manjim bujičnim tokovima javljaju najčešće pri jakim letnjim lokalnim pljuskovima, ali i pri prolećnom otapanju snega praćenog kišama. Na srednjim vodotocima se velike vode javljaju i u proleće i u jesen, a prouzrokovane su dugotrajnijim i rasprostranjenijim kišama. Na velikim rekama se velike vode najčešće javljaju usled topljenja snega uz istovremene kiše, ali mogu nastati i u bilo koje doba godine, kao posledica dugotrajnih jakih kiša koje su zahvatile veliki deo sliva. Visoki vodostaji usled formiranja ledenih barijera u krivinama i plitkim deonicama većih vodotoka javljaju se znatno ređe i to u prolećnom ledohodu posle dužih hladnijih zimskih perioda.

Na manjim, neuređenim vodotocima mogu se javiti uslovno nazvane **"hidrauličke" velike vode**. Naima, na njima često postoje relativno niski i nestabilni mostovi i propusti, dok su obale vodotoka ruševne i obrasle drvećem, sa različitim deponovanim materijalima i potencijalnim klizištima u priobalju. "Hidraulička" velika voda nastaje tako što otvor nekog mosta zatvore erozioni nanosi i plivajući predmeti koje reka nosi, usled čega nastaje "privremena" brana i uzvodna akumulacija. Pod pritiskom akumulirane vode dolazi do rušenja mosta i odnošenja "privremene" brane do sledećeg mosta, gde sada postoje još povoljniji uslovi za formiranje, a zatim i rušenje nove "privremene" brane. Na taj način se nizvodno od najnizvodnijeg mosta može javiti rušilački talas velike vode, znatno veći od talasa u prirodnim uslovima. Ako se duž vodotoka aktivira i neko klizište, pa materijal iz klizišta formira barijeru u rečnom koritu, posledice ovakve pojave mogu biti katastrofalne.

15.1.2 Osnovne karakteristike velikih voda

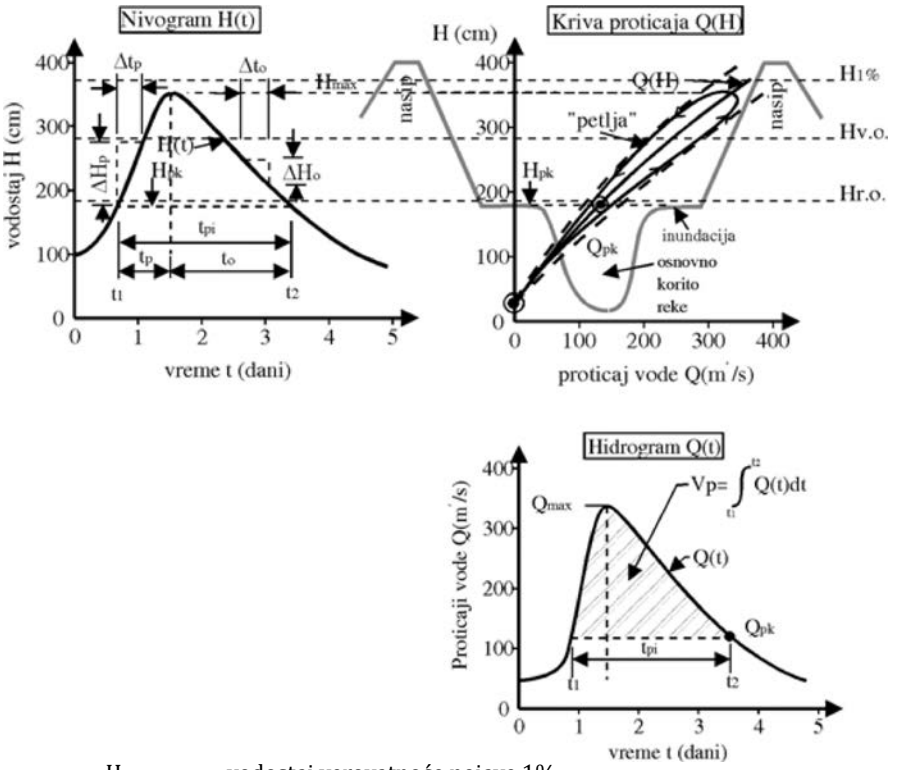
Pod velikom vodom nekog vodotoka najčešće se podrazumeva protok koji se izliva iz osnovnog (minor) korita reke i plavi priobalno područje (ako je nezaštićeno) ili naleže na odbrambene linije i potencijalno ugrožava zaštićeno priobalno područje.

U Evropi se mogu izdvojiti dve osnove grupe meteoroloških pojava koje prouzrokuju velike vode tokom godine. Na velikim rečnim slivovima velike vode su najčešće frontalne i sezonske (od topljenja snega u prolećnom periodu), a poplavni talasi imaju dugo trajanje, sa velikim protocima koji mogu da traju više dana. Međutim, i na velikim slivovima se u novijem periodu javljaju talasi velikih voda usled jakih kiša koje zahvataju veće delove sliva, a javljaju se u bilo kom periodu godine. Primeri su velike vode na Dunavu u avgustu 2002. godine i julu 2013. godine, kao i velika voda Save u maju 2014. godine.

U manjim i srednjim rečnim slivovima se obično javljaju bujični talasi velikih voda, u slučaju izolovanih, lokalizovanih i veoma intenzivnih padavina. Vršni protoci na njima traju samo nekoliko sati. Period malih voda na svim rekama se obično javlja tokom leta i početkom jeseni, kao i u zimskom periodu.

Velika voda na određenom profilu vodotoka se potpuno definiše nivogramom H(t) i hidrogramom Q(t), kao i krivom protoka Q(H) na kojoj se pri velikim vodama javlja tzv. "petlja". Na slici 15.3 dat je šematski prikaz pomenutih dijagrama, sa osnovnim parametrima koji se koriste u svim fazama rešavanja problema zaštite od poplava.

Za planiranje, projektovanje i održavanje sistema zaštite od poplava je potrebno da se svi parametri velikih voda (prikazani na slici 15.3) kvantificiraju duž toka, kao i po verovatnoći, odnosno povratnom periodu pojave.



$H_{1\%}$ - vodostaj verovatnoće pojave 1%

$H_{r.o.}$ - merodavni vodostaj za proglašenje redovne odbrane od poplava

$H_{v.o.}$ - merodavni vodostaj za proglašenje vanredne odbrane od poplava

H_{max}, Q_{max} - najveći vodostaj odnosno protok u periodu rada hidrološke stanice

$H_{pk.}$, Q_{pk} - vodostaj odnosno protok pri punom osnovnom ″minor″ koritu reke

t_{pi} - ukupno trajanje plavljenja inundacije (t_2 - t_1)

t_p - vreme porasta talasa velike vode (od H_{pk} do H_{max})

t_o - vreme opadanja talasa velike vode (od H_{max} do H_{pk})

V_p - ukupna zapremina vode koja je protekla u periodu t_{pi}

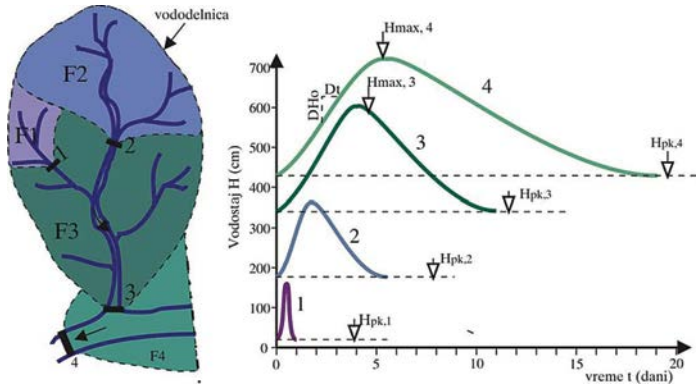
$I_p = \frac{\Delta H_p}{\Delta t_p}, I_o = \frac{\Delta H_o}{\Delta t_o}$ - intenzitet porasta odnosno opadanja vodostaja

Slika 15.3: Šematski prikaz nivograma, krive protoka i hidrograma, sa osnovnim parametrima od značaja za zaštitu od poplava [60]

Za uspešno sprovođenje operativne odbrane od poplava potrebno je da odgovorna lica poznaju sve navedene parametre velikih voda na svojoj deonici odbrane, ali su od izuzetnog značaja očekivane (prognozirane) vrednosti parametara velikih voda koje se dobijaju operativnim prognozama hidrometeorološke službe neposredno pre i u toku sprovođenja odbrane od poplava.

Na malim vodotocima je obezbeđenje pouzdane prognoze, odnosno blagovremena najava velike vode od posebne važnosti, jer njih odlikuje vrlo kratko vreme nailaska talasa velikih voda od momenta registrovanja padavina, uz vrlo veliki intenzitet porasta vodostaja. U takvim uslovima se često odbrana od poplava svodi na hitnu evakuaciju stanovništva i pokretnih dobara sa područja ugroženih nailazećim velikim vodama.

Zbog raznolikosti vodnih tokova po veličinama slivnih područja, pluviometrijskim režimima, reljefu, geološkom sastavu, biljnom pokrivaču i drugim karakteristikama, velike vode se međusobno razlikuju, kako po periodu nastajanja, tako i po drugim parametrima, a posebno po apsolutnim vrednostima maksimalnih vodostaja i protoka, dužinama trajanja i intenzitetima porasta i opadanja vodostaja. Ilustracija navedene raznovrsnosti velikih voda od veličine sliva prikazana je šematski na slici 15.4, na kojoj su prikazani nivogrami velikih voda za različite vodotoke, od malih bujičnih tokova do velikih ravničarskih reka (verovatnoća pojave velikih voda na svim prikazanim vodotocima je ista).



$$\frac{\Delta H_o}{\Delta t}\,(\text{prof } 4) < \frac{\Delta H_o}{\Delta t}\,(\text{prof } 3) < \frac{\Delta H_o}{\Delta t}\,(\text{prof } 2) < \frac{\Delta H_o}{\Delta t}\,(\text{prof } 1)$$

Slika 15.4: Šematski prikaz nivograma velikih voda na različitim vodotocima, od malih bujičnih vodotoka (1) do velikih ravničarskih reka (4) [60]

Za organizaciju odbrane od poplava na nekom vodotoku je bitno poznavati vreme podizanja (porasta) talasa velikih voda t_p. Prema jednoj od kategorizacija, po ovom parametru se razlikuju vodotoci sa:

a) ravničarskim karakterom, gde je $t_p > 7$ dana;
b) srednjim karakterom, gde je $3<t_p< 7$ dana;
c) bujičnim karakterom, sa $1<t_p< 3$ dana i
d) izrazito bujičnim karakterom, sa vremenom podizanja od nekoliko sati do jednog dana.

15.1.3 Specifičnosti velikih voda na bujičnim tokovima

Bujični tokovi su vodotoci brdsko-planinskog regiona. Odlikuju se velikim uzdužnim padom rečnog korita, reda veličine 1-10%. Veličine vodotoka i korespondentnih slivova mogu varirati u širem dijapazonu, obuhvatajući kategorije bujičnih jaruga, potoka i bujičnih reka. Uobičajeno je da se pod bujičnim tokovima podrazumevaju vodotoci sa površinom sliva manjom od 100 km^2. Sa aspekta rečne hidraulike, bujične tokove odlikuju izrazita nestacionarnost, silovitost i turbulentnost. Od posebnog je značaja dvofazni karakter bujičnih tokova, sa velikom koncentracijom čvrste faze [60].

Bujični karakter hidrološkog režima manifestuje se velikim rasponom proticaja i karakterističnom formom hidrograma velikih voda. Odnos proticaja velikih voda i malih voda je reda veličine Q_{max}/Q_{min} >1000, za razliku od velikih aluvijalnih vodotoka gde je Q_{max}/Q_{min}<10. S druge strane, trajanje velikih voda je vrlo kratko, reda veličine nekoliko časova. Hidrogrami bujičnih talasa imaju kratku vremensku bazu, pri čemu je posebno kratko vreme porasta (uzlazna grana), zbog brzog formiranja i naglog nadolaska velikih voda.

Pored klasične manifestacije poplava (usled izlivanja velikih voda iz korita), pri bujičnim poplavama se javljaju i fenomeni bujične lave, odrona i klizišta. Posebna karakteristika bujičnih talasa je vrlo izraženo strmo čelo ("bujična pesnica" - slika 15.5), koje nastaje usled naglog nadolaska velikih voda i ima veliku destruktivnu moć. Čelo talasa ruši drveće i drvene objekte u koritu i priobalju i zahvata sav otpad iz ovog pojasa. Usled toga, bujični talasi pronose velike mase rečnog i "površinskog nanosa", koji po prolasku talasa ostaje nagomilan duž toka (slika 15.6).

Slika 15.5: Bujična pesnica (Izvor:.osce.org)

Slika 15.6: Naplavina po prolasku bujičnog talasa (Izvor: planat.ch)

Generalno, poplave na bujičnim vodotocima nanose daleko veće štete nego poplave na ravničarskim rekama, zbog velike brzine toka i razorne moći. Na slikama 15.7 i 15.8 dati su primeri destrukcije objekata u dolini bujičnog vodotoka.

Slika 15.7: Štete na infrastrukturi (Izvor:.mansfieldheliflight.com)

Slika 15.8: Promenjena trasa reke - crveno je prethodno stanje (Izvor: luzernerzeitung.ch)

Sa aspekta zaštite od poplava, kategorija bujičnih vodotoka ne može se ograničiti samo površinom sliva. Bujični karakteri hidrološkog i psamološkog režima mogu imati i veći vodotoci, sa površinama sliva u dijapazonu 100<A<1000 km^2. Kod njih se bujični karakter hidrološkog režima ispoljava, pre svega, specifičnom genezom, brzom koncentracijom i kratkim trajanjem velikih voda. Talasi velikih voda imaju tipične karakteristike bujičnih talasa, sa naglim nadolaskom i kratkom vremenskom bazom. Posebno je izražen dvofazni karakter tečenja velikih voda, zbog velike mase suspendovanog i vučenog nanosa, koji se pronosi u talasima. Za razliku od klasičnih bujica, kod kategorije manjih vodotoka nije uvek

podjednako izražen bujični karakter velikih voda. U zavisnosti od rasporeda i intenziteta padavina u slivu, geneza velikih voda može biti različita, u prostornom i vremenskom smislu. Otuda se javljaju i talasi velikih voda sa dužom vremenskom bazom i manjim maksimalnim proticajem, ali i tipični bujični talasi, sa karakterističnom formom hidrograma.

15.2 Štete od poplava

Glavni cilj u rešavanju problema poplava je zaštita ljudi i smanjenje šteta, što se može postići različitim merama. Zadatak proučavanja šteta od poplava je da se utvrdi njihov ukupan iznos na određenom potezu ili celom toku jedne reke, a zatim da se uspostavi zavisnost između cene izvođenja planiranih mera zaštite i ekonomskog efekta koji se time postiže, a to je smanjenje veličine šteta koje bi izazvala poplava.

Veličina šteta od poplava zavisi, pre svega, od veličine i vrednosti plavnog područja, što je u funkciji veličine odnosno verovatnoće pojave poplavnog talasa. Zato se i veličine šteta iskazuju kao funkcija verovatnoće pojave poplavnih voda.

U cilju utvrđivanja funkcije šteta, potrebno je izvršiti hidrološku analizu velikih voda duž toka, odrediti verovatnoće najvećih proticaja i druge karakteristike poplavnih voda, a zatim za njih odrediti i plavne zone na obalama vodotoka. Na osnovu podataka o načinu korišćenja zemljišta u plavnim zonama (broj stambenih, industrijskih i drugih objekata, vrste poljoprivredne proizvodnje, infrastrukturni objekti) određuje se visina štete koju bi poplava određene verovatnoće izazvala.

Ekonomskom analizom se mogu obuhvatiti štete od prirodnih, a i od veštačkih poplava (nastalih pogrešnim manevrima na branama, loše izvedenim mostovima sa nedovoljnom propusnom moći itd.).

Generalno, štete od poplava se stalno povećavaju zbog sve intenzivnijeg korišćenja rečnih priobalja i povećanja vrednosti dobara u ugroženim područjima, kao i zbog povećane osetljivosti zgrada i infrastrukture.

Određivanje šteta od poplava zavisi od vrste šteta i uslova u kojima do njih dolazi.

15.2.1 Uslovi od kojih zavisi visina šteta od poplava

Visina šteta od poplava zavisi od:

- **Hidrološko-hidrauličkih i topografskih uslova**. Odražavaju se na učestalost i verovatnoće pojave poplava, kao i prostiranje, trajanje, dubine i brzine vode.
- **Stanja izgrađenosti i korišćenja poplavnih površina**. Štete od poplava su tim veće što je veća izgrađenost i intenzivnije korišćenje plavnih površina i ukoliko se pri izgradnji nije vodilo računa o zaštiti od poplava.
- **Vrednosti dobara izloženih poplavama.** Pored vrednosti, uzima se u obzir i obim, količina i stepen oštećenja dobara pri poplavama.
- **Doba godine**. Uglavnom se odnosi na štete u poljoprivredi, jer uzrast kultura zavisi od doba godine.
- **Stanja i organizacije zaštite od štetnog dejstava poplava.** Određivanje šteta od poplava služi određenoj svrsi - da se ustanovi ekonomska granica skupa mera i radova, kojim bi se te štete eliminisale ili znatno umanjile. Pri tome se uvek mora

poći od radova i mera koji postoje i uključeni su u planove odbrane od poplava, a zatim sagledati one nove radove i mere koji bi bili efikasniji od postojećih (ako ih zamenjujemo) ili bi imali, kao dopunski, odgovarajući fizički i ekonomski efekat.

15.2.2 Kategorije šteta od poplava

Štete od poplava mogu biti vrlo raznovrsne, pa se njihovo grupisanje i prikaz mogu dati na više načina. U analizama se ukupne štete obično dele na potencijalne i stvarne, kao i na direktne i indirektne štete od poplava.

Potencijalne štete se ocenjuju u procesu projektovanja sistema za zaštitu od poplava, dok **stvarne štete** utvrđuju (po propisanoj metodologiji) stručne komisije na terenu neposredno posle konkretnih poplava.

Indirektne štete se ocenjuju u procesu projektovanja sistema za zaštitu od poplava, dok **stvarne štete** utvrđuju (po propisanoj metodologiji) stručne komisije na terenu neposredno posle konkretnih poplava. Štete na različitim objektima u rečnoj dolini ilustrovane su slikama 15.9 do 15.12.

Moguć je i način grupisanja šteta prema važnosti i privrednim granama:

1. Broj utopljenih, ranjenih ili obolelih lica;
2. Štete u naseljima - gradskim i seoskim: broj, vrste i vrednost uništenih ili oštećenih stambenih zgrada, zajedno sa kućnim inventarom;
3. Štete na industrijskim i poslovnim objektima: broj, vrste i vrednost uništenih ili oštećenih industrijskih i poslovnih objekata, zajedno sa pokretnom i nepokretnom opremom i inventarom, materijalima, sirovinama i proizvodima;
4. Štete u poljoprivredi, stočarstvu, ribničarstvu: zgrade, pokretna i nepokretna proizvodna sredstva, stoka, živina, skladišta, veličina i vrednost poplavljenih poljoprivrednih površina, uključujući vrednost poplavljenih kultura i drugih dobara;
5. Troškovi sanacije infrastrukturnih objekata:
   a. Saobraćajnica: puteva, železničkih pruga, aerodroma itd.
   b. Raznih mreža (oštećenja i prekidi): telefonske linije, električna mreža, vodovodna mreža, gasovod, kanalizacija, sistem daljinskog grejanja, objekti za prečišćavanje otpadnih voda.
   c. Javnih kulturnih, istorijskih i umetničkih objekata i dobara
   d. Zaštitnih objekata: brana, nasipa i dr.
6. Troškovi operativne odbrane od poplava.
7. Troškovi civilne zaštite. Uključuju troškove organizovanja eventualne evakuacije stanovništva i dobara sa ugroženih područja, kao i druge troškove učinjene pre, u toku i posle poplave.
8. Druge štete (psihološke i moralne).

Štete od poplava na protočnoj inundaciji (slike 15.13 i 15.14) se bitno razlikuju od šteta koje nastaju u delovima doline koji imaju retenzionu funkciju ili od šteta koje nastaju u prethodno zaštićenim delovima rečne doline usled rušenja zaštitnih objekata (slike 15.15 i 15.16). Razlike su posledica bitno različitog režima voda i nanosa u pomenutim zonama. Više o ovoj problematici dato je u poglavlju 15.4.2.

Slika 15.9: Poplavljeno seosko domaćinstvo (Izvor: IJČ)

Slika 15.10: Poplavljen grad (Izvor:osigurajtese.rs)

Slika 15.11: Oštećen autoput u Nemačkoj, 2002 (Izvor: IJČ)

Slika 15.12: Oštećena železnička pruga (Izvor: uip.primavera-h2020.eu)

Slika 15.13: Štete na protočnoj inundaciji (Izvor: rivernet.org)

Slika 15.14: Štete na objektu u protočnoj inundaciji (Izvor: IJČ)

Slika 15.15: Poplavljeno područje posle proboja nasipa – poljoprivredno zemljište (Izvor: IJČ)

Slika 15.16: Poplavljeno područje posle proboja nasipa – naselje (Izvor: IJČ)

Indirektne štete nastaju zbog povezanosti privrednih i drugih aktivnosti na područjima pogođenim poplavama sa širom zajednicom, kao i zbog opšte recesije u ekonomskom životu pogođenog područja. U ovu kategoriju ulazi gubitak prihoda usled potpunog prekida ili smanjenja proizvodnje (zbog angažovanja radne snage i mehanizacije u odbrani od poplava, prekida saobraćaja, evakuacije).

Indirektne štete mogu da budu daleko veće od direktnih i da pogode daleko šire prostore i to sa izvesnim zakašnjenjem. Na primer, usled prekida saobraćaja na saobraćajnici kojom se neki udaljeni region snabdeva sirovinama, doći će svakako do smanjenja privrednih aktivnosti i šteta koje mogu da budu mnogostruko veće od direktne štete koja je nastala na konstrukciji same saobraćajnice pri poplavi. U indirektne štete spadaju i značajni troškovi na suzbijanju hidričnih epidemija i bolesti prouzrokovanih zagađenjem voda u vodovodnim sistemima ili izlivanjem otpadnih voda iz kanalizacionih sistema i septičkih jama.

U ekonomsko-tehničkim analizama se neke od pomenutih vrsta šteta ne mogu prognozirati (stanje skladišta, pokretna oprema, stoka, oštećenja objekata zaštite i dr.). Sa druge strane, ljudske žrtve ne mogu biti predmet ekonomskih analiza, jer se načelno sve mora preduzeti da njih ne bude.

Utvrđivanje indirektnih šteta se sprovodi na osnovu specifičnih tehničko-ekonomskih analiza, a ponekad se koriste i empirijski ustanovljeni odnosi između vrednosti indirektnih i direktnih šteta (α). Na primer, u SAD se koriste sledeći odnosi:

za štete	indirektne/direktne štete (α)
u selima	0,2
u gradovima	1,5
u industriji	1,2
u komunikacijama	1,0

15.3 Rizik od poplava

15.3.1 Komponente rizika od poplava

Rizik od poplava je proizvod 3 faktora: ugroženosti, izloženosti i osetljivosti na poplave [30]. Izražava se sledećom funkcijom:

Rizik od poplava = ugroženost x izloženost x osetljivost

Ugroženost je prirodna komponenta rizika od poplava. Naime, poplavama su ugroženi svi priobalni prostori u koje se povremeno izlivaju velike vode nekog vodotoka. Na prostorima van zona ugroženosti velikim vodama rizik ne postoji. U ugroženim zonama se rizik od poplava povećava sa dubinom vode, brzinom toka i trajanjem plavljenja. Ova komponenta rizika od poplava će se pogoršati ako se u budućnosti, usled klimatskih promena, pogorša režim velikih voda.

Izloženost poplavama je humana komponenta rizika od poplava. Naime, rizik od poplava postoji samo tamo su poplavama ugrožena područja naseljena, tako da postoje dobra koja mogu biti oštećena, a ljudi koji tu žive, rade ili prolaze životno ugroženi. Prema tome, ako je poplavom ugroženo područje neizgrađeno i nenastanjeno, nema rizika od poplava.

Stvarne posledice poplave zavise od toga koliko su ljudi i dobra **osetljivi** na opasnost i oštećenja. Rizik od poplava se smanjuje ako je smanjena osetljivost društva time što se grade objekti koji su manje osetljivi na oštećenja, a stanovništvo je svesno rizika od poplava, dobro pripremljeno za postupanje tokom poplava i ima obezbeđenu pomoć tokom i po prolasku vanredne situacije.

Rizik od poplava se može redukovati tako što se svaki od pomenuta tri faktora rizika modifikuje (tabela 15.1). To se postiže realizacijom niza radova, objekata, mera i drugim aktivnostima kojima se na racionalan način štite ljudi, prirodna i radom stvorena materijalna dobra i resursi.

Tabela 15.1: Mere za smanjenje rizika od poplava [30]

Mere i radovi za smanjenje ugroženosti	Mere za smanjenje izloženosti	Mere za smanjenje osetljivosti
Zaštita od poplava **Planiranje, projektovanje i izvođenje mera i radova:** - Brane sa akumulacijama - Retenzioni baseni - Nasipi - Rasteretni kanali - Uređenje rečnih korita **Održavanje objekata:** - Redovno održavanje - Praćenje stanja - Sanacije i rekonstrukcije **Finansiranje** **Druge aktivnosti:** - Sistemi za podršku odlučivanju - Sistemi za komunikaciju - Mreže za razmenu podataka - Integracija sa upravljanjem vodama i životnom sredinom Uređenje slivova Protiverozioni radovi Uređenje bujica	Upravljanje načinom korišćenja zemljišta - Zoniranje zemljišta - Otkup imovine - Planiranje razvoja Građevinski propisi i norme - Objekti otporni na poplave - Izgradnja na stubovima	Osmatranje i prognoza poplava - Hidrološki modeli - Hidraulički modeli - Karte ugroženosti i rizika od poplava - Mreža za prikupljanje podataka Upozorenje na poplavu i odgovor u vanrednoj situaciji - Svest javnosti - Pripravnost javnosti - Planovi za vanrednu situaciju - Sistemi za komunikaciju - Vežbe pripravnosti - Sistemi za podršku odlučivanju Oporavak nakon poplave - Služba za pomoć stanovništvu (zdravstvena, savetovanje) - Materijalna pomoć (hrana, sklonište) - Popravka infrastrukture - Finansijska podrška i olakšice - Nadoknada štete/osiguranje
Strukturne mere	⟺	Nestrukturne mere
Uticaj na životnu sredinu		Uticaj na društvo

Generalno, za smanjenje ugroženost ipriobalnih područja od poplava se primenjuju **strukturne mere** (građevinske, investicione mere) odnosno izvode se različiti objekti kojima se utiče na režim i dosezanje velikih voda. Ove mere imaju velikog uticaja na životnu sredinu.

Kao dopuna strukturnim merama, sve više su u primeni **nestrukturne mere** (neinvesticione mere) upravljanja rizikom od poplava. Ove mere nemaju neposredan uticaj na protok velikih voda, ali odražavaju nastojanje da se smanje štete koje poplave mogu prouzrokovati, primenom strategije upravljanja, a ne izgradnje.

Nestrukturne mere čini skup administrativnih, regulativnih i institucionalnih mera za preventivno smanjenje direktnih, indirektnih i potencijalnih šteta od poplava. U ovu grupu mera spadaju: (1) preventivne i operativne mere; (2) regulativne i institucionalne mere; (3) mere solidarnosti za ublažavanje posledica poplava i (4) informisanje javnosti.

Preventivne i operativne mere podrazumevaju celokupnu delatnost usmerenu na suzbijanje opasnosti od poplava i smanjenje štetnih posledica u svim fazama odbrane od poplava. Njihova bitna odlika mora biti organizovanost.

Najznačajniju preventivnu meru predstavlja donošenje i sprovođenje planova i pravilnika za odbranu od poplava, u kojima se definišu obaveze i prava svih učesnika u odbrani od poplava. Ako na području postoje zaštitni objekti (najčešće nasipi), planom odbrane su predviđeni stepeni pripravnosti u zavisnosti od razvoja poplave.

U grupu preventivnih mera spada i preventivno obezbeđenje poplavom ugroženih objekata (izgradnja lokalne zaštite oko objekata, sprečavanje prodora vode u objekte, dislokaciju predmeta u objektima i sl.).

Operativne mere zaštite od poplava obuhvataju prognozu nailaska poplavnog talasa, prenos informacija na teren, obaveštavanje i uzbunjivanje nadležnih organa i stanovništva, u skladu sa unapred pripremljenim planom. Ovaj plan mora predvideti i eventualnu dislokaciju stanovništva i dobara, za slučaj nailaska ekstremnih velikih voda. Kod rečnih tokova na kojima se u zaštiti od poplava koriste i akumulacije se rade posebna operativna uputstva za upravljanje, što je naročito važno kod višenamenskih akumulacija.

Za razliku od ostalih prirodnih rizika kao što su zemljotres, oluja i grad, moguće je u određenom roku proceniti mogućnost nastajanja velikih voda. Shodno tome, neophodno je produžiti korišćenjem modernih tehnika prognoziranja velikih voda. Način prognoziranja velikih voda zavisi od karakteristika slivnog područja.

Regulativne i institucionalne mere čini skup mera definisanih zakonima, propisima, uredbama ili na drugi način, kojima se ostvaruje određena politika u pogledu korišćenja poplavom ugroženog područja. U ovaj skup mera se ubraja i formiranje strukture upravljanja područjima ugroženim poplavom, administrativne nadležnosti, organizovanje stručnih službi, funkcija nadzora i preduzimanja mera radi poštovanja zakonske i druge regulative. Ove mere imaju najveći efekat u planiranju razvoja na poplavom ugroženim prostorima, ali mogu da utiču i na aktivnosti korisnika koji su već locirani na tim prostorima.

Zoniranje terena prema stepenu ugroženosti od poplava je osnovna mera, na koju se oslanjaju sve ostale mere za regulisanje upotrebe terena. Suština zoniranja se sastoji u utvrđivanju stepena i granica različitih stepena ugroženosti na terenu, pri čemu je od ključnog značaja podela inundacije na **protočnu i retenzionu** (slika 15.18). Stepen ugroženosti se uobičajeno izražava preko verovatnoće pojave proticaja ili vodostaja koji plavi teren.

Propisi o nameni poplavom ugroženih terena određuju način korišćenja terena, kao i vrstu gradnje koja je na njima dopustiva. Njima se mogu precizirati i najniže dopuštene kote objekata.

Građevinski propisi regulišu vrstu konstrukcija, način gradnje i građevinske materijale koji se mogu primenjivati u zavisnosti od stepena ugroženosti od poplava. U cilju adekvatnog sprovođenja regulativno-institucionalnih mera, potrebno je obezbediti efikasnost vodoprivredne inspekcijske službe i drugih nadležnih organa.

Mere solidarnosti za ublažavanje posledica poplava imaju za cilj smanjenje šteta koje nastaju u toku i nakon poplava, zbog poremećaja društvenog i ekonomskog života. U ove mere delimično ulazi i protivpoplavno osiguranje, kao mera smišljene raspodele rizika od poplava po vremenu i prostoru.

Informisanje i edukacija kadrova i stanovništva je neophodan preduslov za efikasno sprovođenje odbrane od poplava.

15.3.2 Mere za smanjenje ugroženosti od poplava

Strukturne (investicione, građevinske) mere primenjuju se već decenijama, a ponegde i vekovima, da bi se modifikovala ugroženost od poplava. To se postiže regulisanjem porasta i širenja velikih voda, smanjenjem oticaja ili zaštitom određenih oblasti od plavljenja. Primenom strukturnih mera se bave vladina tela i lokalne samouprave.

Najčešće se primenjuju:

- **Izgradnja odbrambenih i drugih nasipa** (lokalizacioni, letnji), kejskih i zaštitnih zidova u cilju sprečavanja direktnog. Time se direktno menja prostorni obuhvat poplave jer se sprečava izlivanje velikih voda iz vodotoka i onemogućava njihov prodor u zaštićena područja.
- **Poboljšanje proticajnog kapaciteta rečne deonice** (smanjenjem rapavosti, povećanjem proticajnog profila ili skraćenjem rečnog toka).
- **Zadržavanje dela poplavnog talasa u rezervisanim prostorima** jednonamenskih ili višenamenskih akumulacija ili retenzionih basena. Time se smanjuju protoci velikih voda, a samim tim menjaju i fizičke karakteristike poplave, kao što su veličina poplavljenog prostora, dubine i brzine vode.
- **Skretanje dela poplavnog talasa u rasteretne kanale**, čime se neposredno redukuje proticaj nizvodno. Time se menja prostorni raspored poplavnih područja, kako bi se smanjila ugroženost gusto naseljenih područja.

"Linijski" sistemi zaštite (nasipi i slični objekti) ne utiču na protok velikih voda, ali duž vodotoka izazivaju povišenje vodostaja. Ovi sistemi se stoga ubrajaju **u pasivne mere** zaštite od poplava. Sve ostale nabrojane mere zaštite od poplava, s obzirom da se realizuju radi ublažavanja nepovoljnih karakteristika velikih voda, spadaju u **aktivne mere.**

Napred navedene mere se dimenzionišu za usvojene – "merodavne" uticaje različitih verovatnoća pojave. One su skupe, tako da ostvareni stepen zaštite mora da opravda izdatke. Istovremeno se mora uzeti u obzir da će svaka intervencija uticati na uzvodni i nizvodni sektor vodotoka.

Ne može se računati na potpunu zaštitu od bilo kod štetnog dejstva voda, pa ni od poplava, jer se od usvojenog "merodavnog" uticaja (na koji je dimenzionisan zaštitni sistem) uvek može pojaviti još veći (svakako sa redom verovatnoćom pojave) i izazvati štete. Iz toga sledi logičan zaključak da je potpuna eliminacija šteta od nepovoljnih dejstava vode nemoguća, već se teži njihovom razumnom smanjenju.

Problem je međutim činjenica da ugroženost od poplava može biti smanjena, ali nikada potpuno eliminisana. I posle izgradnje objekata, postoji "preostali rizik" jer može doći do otkaza sistema zaštite od poplava (prodor i rušenje nasipa, pojava izuzetno velike vode koja premašuje "merodavnu veliku vodu" itd.).

U područjima koja su zaštićena nasipima u tom slučaju postoji poseban rizik jer u slučaju njihovog rušenja ili prelivanja vrlo brzo dolazi do plavljenja dubokom i brzom vodom. Normalno je da se priobalna područja brzo razvijaju posle izvođenja nasipa. Vrednosti imovine i broj stanovnika u njima brzo rastu, tako da su posledice poplave daleko veće nego što bi bile da nisu izgrađeni objekti. Posebnu opasnost predstavlja to što stanovništvo ne razume da se rizik samo promenjen ali uvek postoji.

15.3.3 Mere za smanjenje izloženosti poplavama

U priobalnim područjima su poplavama izloženi stanovnici koji tu žive, rade ili samo kroz njih prolaze, kao i privatni posedi, industrijski i drugi objekti i infrastruktura. Intenzivno korišćenje zemljišta, povećana vrednost dobara i broja stanovnika doprinose povećanju rizika. Kako je razvoj područja u rečnim dolinama u interesu razvoja, on se mora dozvoliti, ali uz ograničenja.

Planiranje načina korišćenja plavnih područja se najefikasnije kada se odnosi na budući razvoj. U tom slučaju se u prostornim planovima opština precizno može definisati gde je dozvoljena gradnja, kakvi tipovi zgrada su dozvoljeni i gde treba locirati javne ustanove (su škole, bolnice, policija, vatrogasne jedinice itd.). Vrlo je važno da se i javni infrastrukturni objekti (trafo stanice, vodovod, postrojenje za prečišćavanje, kanalizacija) adekvatno postave. Da bi ovakvi planovi mogli da se pripreme prethodno je potrebno uraditi karte ugroženosti od poplava jer one definišu zone sa različitim parametrima ugroženosti: na primer zone gde su dubine vode 0 do 0,5 m, 0,5 do 1,5 m, 1,5 do 4 m, veće od 4 m. U svakoj od tih zona će biti definisana pravila gradnje. Međutim, ponekad je neophodno da se iz ugroženih područja uklone postojeći objekti, ukoliko se konstatuje da se ne mogu zaštititi na tehnički i ekonomski opravdan način.

15.3.4 Mere za smanjenje osetljivosti na poplave

Osetljivost društva na poplavne događaje se redukuje nestrukturnim merama, koje obuhvataju pažljivo planiranje, stalno obnavljanje planova da bi se održala pripravnost i brzu mobilizaciju radi sprovođenja planiranih akcija tokom poplava. Ove mere se primenjuju pre, tokom i posle poplava.

Pre poplava se radi na uspostavljanju sistema za prognozu poplava, za podršku u donošenju odluka, za komunikaciju i upozorenje o nailasku poplava. Takođe se planiraju vanredne mere (određuju se pravci evakuacije stanovništva i smeštaj), koje se moraju i povremeno uvežbavati.

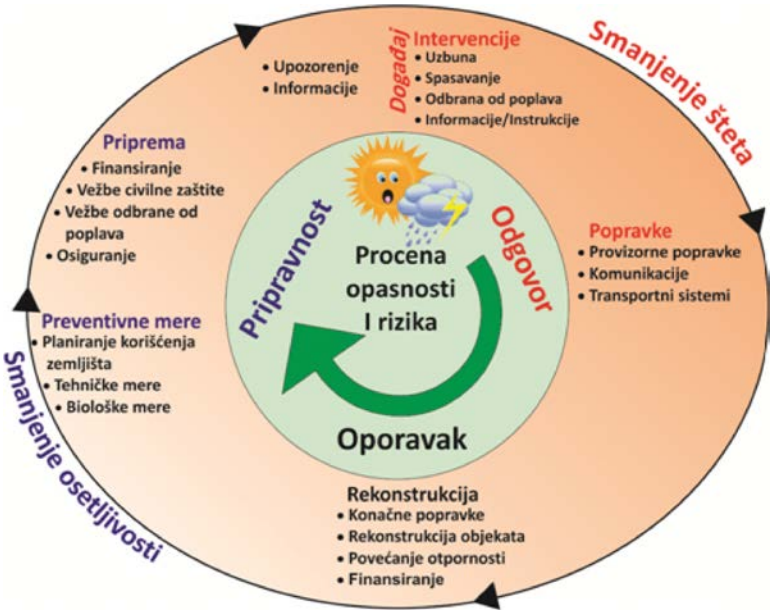
Tokom samog poplavnog događaja treba obezbediti materijal, veze, transport i energiju za službu odbrane od poplava i ekipe koje sprovode evakuaciju i spašavanje i druge akcije kojima se održava javni red i mir. Postradalima je potrebno obezbediti privremeno snabdevanje hranom i smeštaj.

Po prolasku velike vode radi se na čišćenju terena, prevenciji hidričnih epidemija i popravci ključne infrastrukture kao što je vodovod i kanalizacija. Vrlo je bitno obezbediti finansijsku pomoć poplavljenima, kako bi se popravile štete na objektima i ponovo pokrenula proizvodnja.

15.3.5 Cikličnost upravljanja rizikom od poplava

Upravljanje rizikom od poplava je cikličan proces (slika 15.17), koji se sastoji od 3 faze: odgovor na poplavni događaj, oporavak i pripravnost za sledeći događaj.

Upravljanje rizikom od poplava je permanentan proces donošenja odluka o tome da li i kako plavna područja treba koristiti, uz određeni, dozvoljeni nivo rizika. Pritom se teži usaglašavanju zahteva "humane" komponente (odnosno zaštite dobara i ljudskih života) i "ekološke" komponente (očuvanja ili ponovnog uspostavljaja prirodnih funkcija i resursa plavnog područja).



Slika 15.17: Ciklus upravljanja rizikom od poplava u rečnom slivu [12]

15.3.6 Strategije za smanjenje rizika od poplava

Na svakom potencijalno ili realno plavnom području postoji mnoštvo različitih uslova koji se moraju razmotriti kako bi se donela odluka o kombinaciji strategija i pratećih mera za smanjenje uvek prisutnog rizika od poplava [22].

Adekvatan izbor omogućuje samo razmatranje većeg broja različitih kombinacija mera, čiji se efekti ocenjuju na neki od poznatih načina (kao što je na pr. višekriterijumska analiza). Pri tom se aktivnosti na plavnom području moraju sagledati u kontekstu uticaja na rečni sliv u celini, jer svaki deo sliva zavisi od drugog, tako da odluka o načinu uređenja jednog dela može imati nepoželjne uticaje na drugi (na primer urbanizacija u gornjim delovima sliva ubrzava oticaj i stvara bujične poplave, dok izgradnja nasipa na delu rečnog sliva može pogoršati uslove na vodotoku). Takođe, razmatrano plavno područje se mora posmatrati kao

deo određene teritorijalne (grad, selo) i administrativno-upravljačke celine (opština, okrug itd.). Moguće upravljačke strategije i mere se razmatraju ne samo za do sada nezaštićene plavne zone, već i za već kasete sa već izgrađenim zaštitnim objektima. Polazna tačka svih razmatranja je stav da nijedna strategija ili mera ne može imati a priori prednost, ukoliko se to ne dokaže.

U nastavku je dat pregled najčešćih strategija za smanjenje šteta od poplava, koje se razmatraju uporedo sa strategijama za održanje prirodnih resursa plavnog područja. Pritom je uglavnom malo poznato koliko su prirodni potencijali inundacije značajni sa vodoprivrednog aspekta (u kontroli poplava i erozije, održanju kvaliteta površinskih voda i snabdevanju i održanju nivoa podzemnih voda), ekološkog (održanje visokoproduktivnih šuma, ribljih i životinjskih zajednica) i drugih aspekata (rekreacija i dr.). Poznavanje vrednosti prirodnih resursa raste, ali je često ograničeno. Većina državnih programa podržava ekonomski razvoj ovih prostora, jer je teško kvantifikovati ekonomsku vrednost mnogih prirodnih funkcija inundacije.

Stategije za smanjenje šteta od poplava odnose se generalno na uslove pre, za vreme i posle poplave i sve se obično mogu primeniti na jednoj plavnoj površini. Na različitim nivoima uprave i u privatnom sektoru, ove strategije imaju različite oblike, a povezane su sa širim ciljevima vodoprivrede, zaštite životne sredine i privrede.

Prva, najčešća i najpoznatija strategija se sastoji u **sprečavanju plavljenja** razmatrane teritorije (drugačije rečeno – smanjenje ugroženosti), korišćenjem različitih metoda pasivne ili aktivne odbrane i izgradnjom značajnih i skupih investicionih objekata (brane, akumulacije, nasipi, regulacija vodotoka, rasteretni kanali i dr.). Ova strategija je do sada već dokazala visoku efikasnost, a i javnost je podržava. Međutim, u novije vreme se veliki investicioni radovi u cilju zaštite od poplava sve ređe primenjuju, i to mnogo češće za zaštitu gradskih nego poljoprivrednih područja. Tome doprinosi razvoj javne svesti o nepovoljnim ekološkim aspektima ove strategije, kao i mogućim katastrofalnim posledicama koje nastaju ukoliko dođe do otkaza sistema zaštite. Takođe je konstatovano da troškovi održavanja objekata značajno rastu kako se oni bliže kraju projektnog veka.

U drugoj strategiji teži se **smanjenju šteta** tokom poplava time što se izbegava opasno, neekonomično ili nepoželjno korišćenje potencijalno plavne površine (drugačije rečeno – smanjenje izloženosti poplavama). Strategija se bazira na nestrukturnim merama. Smatra se da sa porastom javne svesti o opasnosti od poplava i stvaranjem određenih iskustava u primeni nestrukturnih mera povećava efikasnost njene primene.

U okviru ove strategije se poseban značaj pridaje zoniranju terena, građevinskim propisima u vezi izgradnje i opremanja objekata, kao i propisima u vezi sanitarne i zdravstvene zaštite. Međutim, navedene mere imaju uticaja samo na prostorni raspored, projekte, materijale i konstruktivna rešenja koja se primenjuju u izgradnji novih objekata, jer nemaju nikakvog efekta na postojeću infrastrukturu. Takođe, ove mere vrlo malo doprinose zaštiti prirodnih i kulturnih dobara (ako se izuzme potpuna zabrana izgradnje u protočnoj zoni inundacije).

Naročito je značajno da se, u okviru politike razvoja plavnog područja, utiče se na planiranje i raspored infrastrukture, pa čak, ukoliko je moguće, izmeste skupi sadržaji iz potencijalno plavne zone. Takođe, ova strategija podrazumeva visok stepen pripremljenosti za slučaj opasnosti od poplava, što obuhvata razradu planova na svim nivoima, informisanje javnosti, službu upozorenja i opštu spremnost na hitne operacije u okviru zaštite (koja se postiže vežbama, analizama spremnosti, itd.).

Treća strategija se zasniva na merama za **smanjenje negativnih posledica poplava** (drugačije rečeno – smanjenje osetljivosti na poplave). Fokusirana je na pripremu aktivnosti koje se na poplavljenoj teritoriji odvijaju po prolasku poplave, omogućavajući brzu sanaciju, rekonstrukciju i ekonomski oporavak na svim nivoima, od pojedinaca do šire društvene i teritorijalne jedinice. U njenom okviru se primenjuju nestrukturne mere, od kojih su od posebnog značaja informisanje i edukacija stanovništva, stvaranje fondova za oporavak posle poplave i prenos dela troškova sanacije posledica poplava sa individualnog na državni nivo.

Program informisanja i edukacije je koncipiran tako da omogući upoznavanje stanovništva sa ključnim elementima ovog koncepta (kao što je verovatnoća pojave poplava i dr.). Drugi cilj programa je upoznavanje i uvežbavanje stanovništva za akcije koje treba preduzeti u vreme nailaska poplave da bi se zaštitila imovina i životi (kao što su evakuacija stanovništva i pokretne imovine, mere privremene zaštite izgradnjom manjih lokalizacionih nasipa u toku poplave i dr.), u koje se uključuju lokalne vatrogasne, političke, zdravstvene i druge službe.

Osnovni mehanizam kojim se unapred stvaraju fondovi za plaćanje šteta od poplava je "**protivpoplavno osiguranje**", u kome su premije osiguranja formirane na visini rizika osiguranika. Međutim, kako protivpoplavno osiguranje kupuju samo žitelji plavnog područja koji su svesni svog rizika, zbog malog broja osiguranika teret osiguranja ne može da snosi jedno osiguravajuće društvo, već se mora uključiti i država. Iskustva pokazuju da državno osiguranje protiv poplava može biti vrlo efikasan način za ublaženje posledica poplava, posebno ako je vezano za poštovanje propisa za smanjenje šteta (građevinski propisi i dr.) i državne prihode nastale adekvatnim korišćenjem područja. Takođe, mera koja se često primenjuje je smanjenje poreza i davanje kredita vlasnicima nekretnina u cilju izvođenja rekonstrukcije ili čak izmeštanja objekata van plavne zone.

Posle poplave, pomoć stanovništvu obezbeđuju vladine i druge organizacije, dok finansijsku pomoć daje vlada u vidu nadoknade štete ili zajmova sa malim kamatama.

15.4 Zoniranje plavnih područja

15.4.1 Potreba za zoniranjem plavnih područja

U javnosti su uvrežena neka mišljenja u vezi zaštite od poplava koja predstavljaju prepreke za racionalan pristup rešenjima i održavanje postignutog stepena zaštite. Najpre, to je lažan osećaj potpune zaštićenosti posle izgradnje odbrambenih objekata. Stanovništvo je ubeđeno da je njihova imovina obezbeđena u potpunosti i da je problem poplava definitivno eliminisan izgradnjom nasipa. Naime, nisu upoznati da je nasip dimenzionisan na, na primer, poplavu povratnog perioda 20 godina jer je trebalo zaštititi samo manju površinu ekstenzivno naseljenog poljoprivrednog zemljišta, a zatim je došlo do nove (često neplanske) izgradnje stambenih i drugih objekata. Poplava većih razmera od merodavne dovešće do brojnih sudskih sporova i zahteva za nadoknadu štete.

Drugi problem je neodgovoran odnos prema objektima koji imaju funkciju odbrane od poplava. Stanovništvo nije svesno da time ugrožava sopstvena imanja i živote. Primeri su: deponovanje krupnog otpada u korita regulisanih vodotoka, saminicijativna izgradnja objekata (manjih mostovskih prelaza i dr.) koji predstavljaju prepreku u koritu pri velikim vodama, odnošenje materijala iz nasipa, izgradnja objekata u prinasipskom pojasu i dr.

Zbog toga jedan od prvih koraka u primeni nestrukturnih mera odbrane od poplava mora biti uvođenje u prostorne i urbanističke planove zoniranja područja prema ugroženosti od poplava, uz utvrđivanje dozvoljenog načina korišćenja svake zone. Ovo zoniranje, odnosno utvrđivanje stepena ugroženosti terena predstavlja veoma ozbiljan zadatak, koji se mora bazirati na adekvatnim topografskim, hidrološkim i hidrauličkim podlogama i proračunima.

Utvrđivanje plavnih zona duž vodotoka stvara mogućnosti za procenu potencijalnih šteta od poplava različitih verovatnoća pojave, umanjenje posledica poplava, planiranje protivpoplavnih mera i radova, utvrđivanje osnova za primenu politike osiguranja od poplava, rešavanje eventualnih sudskih sporova i druge namene.

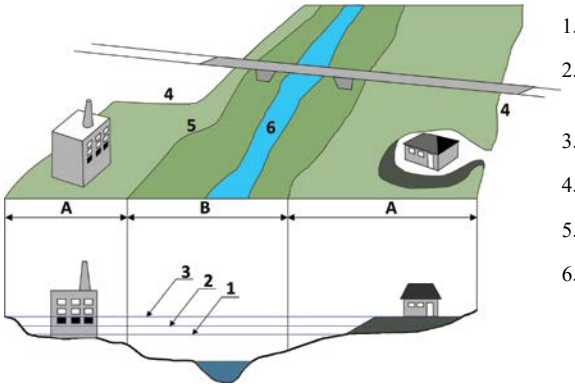
Bitna odlika zoniranja mora biti učešće javnosti, jer postojeći i potencijalni korisnici inundacija moraju biti upoznati sa stepenom ugroženosti delova terena na kome žive ili na kome misle da grade. Od novih korisnika, koji traže dozvolu za gradnju na poplavom ugroženom terenu, moguće je i opravdano zahtevati pune ekonomske premije za osiguranje protiv šteta od poplava. Time bi budući korisnik mogao da u potpunosti sagleda veličinu rizika od poplava i realno oceni isplativost ulaganja. Istovremeno, građevinskim propisima treba predvideti uslove izgradnje objekata u plavnim zonama. U cilju smanjenja šteta od poplava, treba predvideti mere protivpoplavnog obezbeđenja pojedinačnog objekta (slika 15.19) ili grupe objekata (slika 15.20).

15.4.2 Realne i potencijalne plavne zone

Rizik od poplava se bitno razlikuje u pojedinim delovima rečne doline.

Nezaštićeni delovi, koje uvek plave velike vode, nazivaju se **realne plavne zone**. Ovakve su površine prisutne uglavnom u dolinama manjih vodotoka, bez izgrađenih zaštitnih sistema, a mogu se podeliti na dva bitno različita dela: zonu **protočne inundacije** i zonu **neprotočne (retenzione) inundacije** (slika 15.18).

Velike vode u protočnom delu inundacije imaju dinamički uticaj, jer se tu pri velikim vodama odvija tečenje sa velikim brzinama, uz masovno kretanje rečnog i površinskog nanosa (slike 15.13 i 15.14). Stoga u protočnom delu rečne doline ne treba dozvoliti nikakvu novu izgradnju.



1. nivo merodavne velike vode
2. nivo merodavne velike vode povišen usled izgradnje na inundacijama
3. nivo zaštite od poplava (nivo 2 + zaštitna visina)
4. granica plavljenja
5. granica tečenja
6. osnovno korito vodotoka

(A) zona neprotočne (retenzione) inundacije

(B) zona protočne inundacije

Slika 15.18: Podela rečne doline na protočni i retenzioni deo [22]

U neprotočnoj inundaciji izgradnja novih objekata može biti dozvoljena pod uslovom da je obezbeđena protivpoplavna zaštita objekata (slike 15.19 i 15.20) ili nasipanje terena (do propisane kote prizemlja ili suterena za stambene objekte).

Slika 15.19: Lokalna zaštita objekta (Izvor: sg.ch)

Potencijalno plavne zone su površine zaštićene od poplava pasivnim ili aktivnim merema zaštite. One bi bile plavljene u slučaju pojave veće vode od usvojene "merodavne" ili usled otkaza sistema zaštite (zbog grešaka u projektovanju i izvođenju, lošeg održavanja itd.). U slučaju otkaza nasipa, uticaj na plavljene objekte je statički – male brzine vode (osim u zoni proboja nasipa), veća dubina i dugo trajanje. Primer područja u desnom priobalju reke Tamiš, koje je poplavljeno usled rušenja uzvodnog nasipa, prikazan je na slici 15.21.

Slika 15.20: Lokalna zaštita objekta obodnim nasipom (Izvor: nwclimate.org)

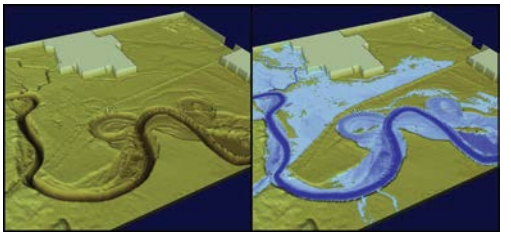
Slika 15.21: Poplavljeno područje u priobalju reke Tamiš, 2005. godine (Izvor: IJČ)

Zoniranje terena prema stepenu potencijalne opasnosti treba izvršiti za svaku branjenu kasetu. Ukoliko je moguće, treba izbeći izgradnju novih naselja i novih investicionih objekata u potencijalno plavnim zonama, jer se tako samo povećavaju potencijalne štete. Kartiranje rizika mogu doprineti formiranju javne svesti o činjenici da ni jedan objekat ne može garantovati potpunu zaštitu od bilo koje velike vode.

Karte rizika treba formirati i za sva područja nizvodno od visokih brana. Obeležavanje plavnih zona i edukacija stanovništva u rečnim dolinama nizvodno od brana su neophodni, jer ne treba dozvoliti (intenzivnu) izgradnju na ovim površinama.

15.4.3 Izrada i korišćenje karata plavnih zona

Kartiranje ugroženosti i rizika od poplava je oblast u kojoj je u poslednje dve decenije došlo do velikih pomaka, pre svega u pogledu mogućnosti koje nude informatički alati u okviru geografskih informacionih sistema. Iz ovog razloga, geoinformatika kao geodetska disciplina dobija značajnu ulogu u vodno-ekološkim analizama. GIS omogućava da analize ugroženosti i rizika od poplava budu mnogo detaljnije i lakše (slika 15.22).



Slika 15.22: Primer zoniranja rečne doline (Izvor: mikepoweredbydhi.com)

Od 2007. godine, kada je usvojena Direktiva o poplavama, zemlje članice i kandidati za pristupanje Evropskoj uniji su obavezne da izrade karte ugroženosti od poplava i karte rizika od poplava. Ove karte predstavljaju efikasnu alatku za informisanje, kao i korisnu osnovu za utvrđivanje prioriteta i buduće tehničke, finansijske i političke odluke koje se odnose na upravljanje rizicima od poplava. Na njima se prikazuju moguće štetne posledice različitih scenarija poplava na stanovništvo, ekonomiju, zaštićena prirodna i kulturna dobra.

Slika 15.23: Indikativna karta plavnih zona (Izvor: IJČ)

Izrada karata je ozbiljan i skup zadatak, tako da se ograničava samo na područja za koja se u Prethodnoj proceni rizika od poplava zaključi da rizik od poplava postoji ili se može očekivati. Zato Prethodna procena rizika od poplava ima poseban značaj. Ona se radi za sve slivove na teritoriji države, ali na znatno manjem nivou detaljnosti, na osnovu raspoloživih karata (indikativna karta - slika 15.23) ili drugih lako dostupnih podataka i uz primenu GIS tehnologije.

Karte ugroženosti i karte rizika se izrađuju za poplave koje mogu da nastanu izlivanjem reka, bujica, mora, rušenjem brana, usled otkaza sistema za odvodnjavanje ili visokih nivoa podzemnih voda. Najčešće se rade za poplave koje nastaju izlivanjem reka, jer ove poplave nanose najviše šteta.

U Evropskoj uniji karte ugroženosti i karte rizika od rečnih poplava [82] obavezno se izrađuju za:

1. Scenario poplave male verovatnoće pojave, odnosno scenario ekstremnog događaja. To može biti 300, 500 1000-godišnja velika voda (zavisno od potreba zemlje) i/ili prelivanje odnosno rušenje zaštitnih objekata,

2. Scenario poplave srednje verovatnoće pojave (100-godišnja velika voda!).

Karte se, po potrebi, mogu izraditi i za scenario poplave velike verovatnoće pojave (10, 20 ili 50-godišnje velike vode, u zavisnosti od karakteristika vodotoka i poplavnog područja).

Za prikupljanje, izmene i dopune osnovnih podataka, kao i za izradu karata koristi se GIS. Podaci se arhiviraju uz obavezne meta-podatke (izvor podataka, tačnost, razmera, datum, ...). Pozadina karata može biti topografska karta (1:25.000 ili druge razmere), ortofoto snimak ili drugo, zavisno od potreba korisnika.

15.4.3.1 Karta ugroženosti od poplava

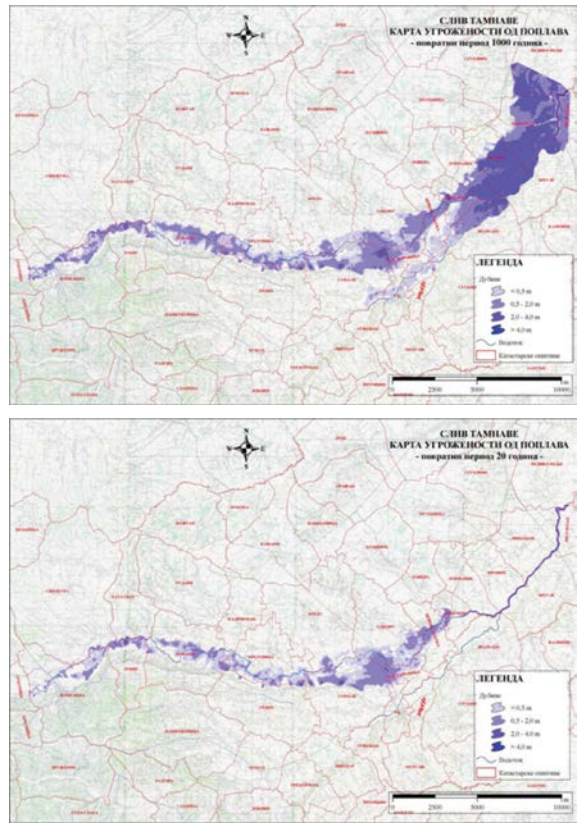
Karta ugroženosti od poplava je kartografski prikaz granica poplavnog područja, dubine vode i, po potrebi, brzine vode u određenom scenariju poplave.

Na karti ugroženosti od poplava (slika 15.24) se obavezno prikazuju: granice plavljenja velikim vodama različitih verovatnoća/povratnih perioda (u realno i potencijalno plavljenim delovima rečne doline), dubine vode i eventualno brzine vode u pojedinim zonama. Ovi podaci se dobijaju hidrauličkim proračunima za utvrđene scenarije, uz korišćenje raspoloživih hidroloških, topografskih i drugih podloga koje zavise od zahteva modela koji se primenjuje za proračun.

Hidrološku podlogu za hidraulički proračun čine računski parametri talasa velikih voda za usvojene scenarije poplava, kao i podaci potrebni za kalibraciju i verifikaciju hidrauličkog modela. Podloga se izrađuje primenom adekvatnih hidroloških proračuna, koji su prilagođeni stepenu izučenosti sliva na kome se nalazi značajno poplavno područje.

Topografska podloga za hidraulički proračun se obezbeđuje snimanjem terena. Osim osnovnog korita vodotoka i inundacija, topografska podloga mora da sadrži sve vodne objekte za uređenje vodotoka i za zaštitu od poplava, erozije i bujica, ali i druge objekte koji imaju uticaj na režim velikih voda (mostovi, propusti,...).

Osnovno korito vodotoka i objekti se geodetski snimaju na terenu, dok se teren poplavnog područja po pravilu definiše kao digitalna podloga, dobijena snimanjem terena izabranom tehnikom snimanja koja obezbeđuje potrebnu tačnost uzimajući u obzir i ostale faktore (troškove, resurse, vreme, uslove i ograničenja snimanja,...).



Slika 15.24: Karta ugroženosti od poplava za 1000-godišnju i 20-godišnju veliku vodu (reka Tamnava, R=1:25000) (Izvor: IJČ)

Hidraulički proračun nivoa velike vode u određenom scenariju poplave standardno se vrši primenom odgovarajućeg linijskog modela ustaljenog ili neustaljenog tečenja, a ukoliko je potrebno definisati više detalja i brzine toka primenom ravanskog modela ustaljenog ili neustaljenog tečenja.

Kalibracija i verifikacija hidrauličkog modela su obavezni koraci. U nedostatku podataka za kalibraciju i verifikaciju, pouzdanost hidrauličkog proračuna neophodno je proveriti elementarnom analizom osetljivosti rezultata na vrednosti parametara modela.

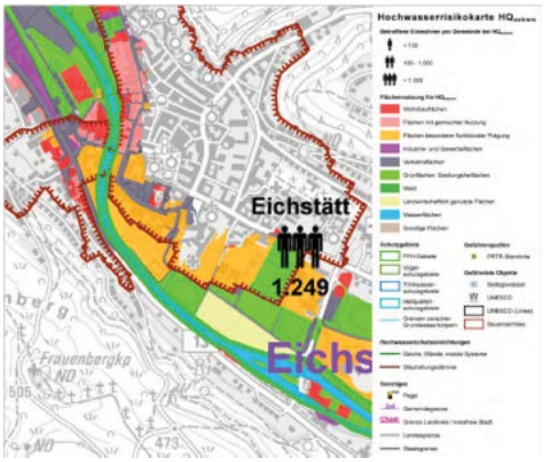
Granica poplavnog područja u određenom scenariju poplave se definiše tako što se sračunati nivoi vode prenose u GIS okruženje. Granica poplavnog područja je vektor (poligon), koji se dobija presekom ravni vodnog ogledala sa DMT.

Dubine vode u određenom scenariju poplave predstavljaju razliku nivoa vode i DMT.

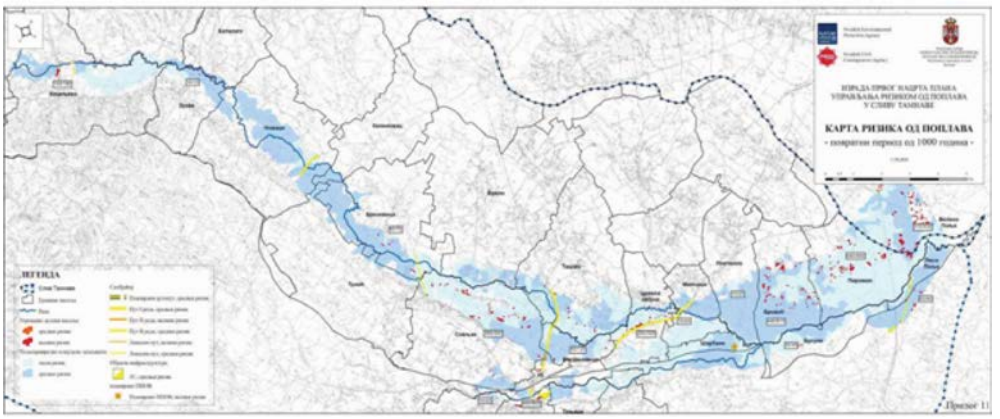
15.4.3.2 Karta rizika od poplava

Za izradu karte rizika od poplava potrebni su prostorni podaci o stanovništvu (uključujući posebno ranjive grupe stanovništva), privrednim aktivnostima (uključujući i kritičnu infrastrukturu), zaštićenim prirodnim i kulturnim dobrima i potencijalnim zagađivačima u poplavnom području u određenom scenariju poplave.

Na slici 15.25 je karta rizika urađena po nemačkoj LAWA metodologiji, koja je dostupna korisnicima putem interneta i prikazuje broj stanovnika ugroženih poplavama, način korišćenja prostora i druge relevantne podatke. Drugi primer je karta rizika na slici 15.26, koja sadrži samo osnovne indikatore rizika, a pre svega broj ugroženih stanovnika i najvažnije infrastrukturne objekte.



Slika 15.25: Karta rizika od poplava - Nemačka (Izvor: wasserblick.net)



Slika 15.26: Karta rizika od poplava za 1000-godišnju veliku vodu (reka Tamnava, R=1:25000) (Izvor: IJČ)

16 ODBRANA OD POPLAVA

16.1 Organizacija i faze odbrane od poplava

16.1.1 Služba za odbranu od poplava

Mere, radovi i nadležnosti (teritorijalne i personalne) za odbranu od poplava utvrđuju se Opštim i Operativnim planom za odbranu od poplava. Ovi planovi se donose za vodotoke na kojima su izgrađeni odgovarajući objekti za zaštitu od štetnog dejstva voda. Za objekte na vodama 1. reda nadležna su javna vodoprivredna preduzeća (osnovana za obavljanje vodne delatnosti na određenoj teritoriji), a za objekte na vodama 2. reda jedinica lokalne samouprave na čijoj se teritoriji objekat nalazi.

U Opštem planu za odbranu od poplava utvrđene su institucije koje su nadležne za odbranu, kao i osnovna zaduženja glavnih subjekata na pripremi dokumentacije, izgradnji, rekonstrukciji i održavanju odbrambenih linija. Obuhvaćene su preventivne pripreme, način osmatranja i obaveštavanja, zadaci rukovodećeg osoblja, kao i osnovna načela organizacije i sprovođenja odbrane od poplava u periodu trajanja velikih voda.

Teritorijalno, sistem za odbranu od poplava na vodnom području je podeljen na sektore, sektori na tehničke deonice, a tehničke deonice na čuvarske deonice. Dužine sektora, tehničkih i čuvarskih deonica su vrlo različite, a zavise od karakteristika objekata i organizacionih uslova.

Najniži hijerarhijski nivo službe za odbranu od poplave čine čuvari nasipa, koji u vanrednoj odbrani imaju i pomoćnike jer se dežura 24 časa na dan. Na višim nivoima službe su rukovodilac tehničke deonice sa zamenikom, sektorski rukovodilac sa zamenikom i rukovodilac odbrane na vodnom području sa zamenikom i pomoćnicima. Na čelu službe je glavni rukovodilac ili koordinator odbrane Republike Srbije sa zamenikom i pomoćnicima.

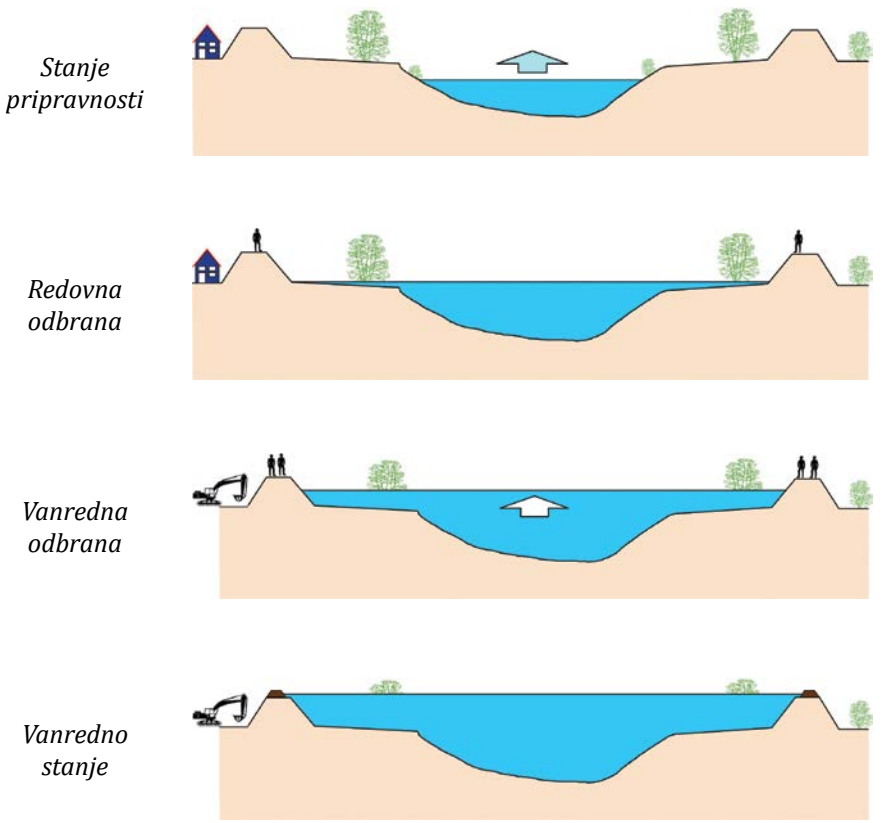
Proces sprovođenja odbrane od poplave obuhvata brojne aktivnosti, od osmatranja, obeležavanja i izveštavanja o pojavama na nasipima do preduzimanja interventnih radova i mera. Postupak je sledeći:

- Čuvarska služba je zadužena za osmatranje. O uočenim negativnim pojavama izveštava rukovodioca tehničke deonice,
- Rukovodilac tehničke deonice donosi odluku o preduzimanju interventnih radova manjeg obima i o tome izveštava sektorskog rukovodioca. Radove sprovodi čuvarska služba;
- Ako su obim i vrsta interventnih radova takvi da ih ne može sprovesti čuvarska služba, angažuje se služba za intervencije vodoprivrednog preduzeća. Odluku o tome donosi sektorski rukovodilac, koji obaveštava rukovodioca odbrane vodnog područja i sam rukovodi radovima,
- Kada potreban obim i vrsta radova prevazilaze mogućnosti službe za intervencije na nivou sektora (vodoprivrednog preduzeća), angažuje se služba za intervencije javnog vodoprivrednog preduzeća i specijalizovane organizacije. Odluku o tome donosi rukovodilac odbrane vodnog područja, koji i rukovodi radovima neposredno ili preko pomoćnika i o tome izveštava glavnog rukovodioca odbrane.

Prema tome, čuvarska služba ima prevashodno osmatračku ulogu, a koristi se i za intervencije manjeg obima. Rukovodioci odbrane na nivou deonica, sektora i vodnog područja kontrolišu rad osmatračke službe, uočavaju pojave, donose odluke i rukovode radovima.

16.1.2 Faze odbrane od poplava

Ukoliko je najavljen porast vodostaja, uvodi se stanje pripravnosti za sve učesnike u odbrani od poplava na određenoj reci ili deonici reke. Zatim počinju faze odbrane, kako je prikazano na slici 16.1.



Slika 16.1: Faze odbrane od poplava [84]

Odbrana od poplava sprovodi se, u zavisnosti od stepena opasnosti, u dve faze: **redovna** i **vanredna** (slika 16.1). Faze odbrane od poplava proglašavaju se kada vodostaj na vodomernoj stanici koja je merodavna za tu tehničku deonicu nasipa dostigne određeni kriterijum, a očekuje se dalji porast vodostaja ili kada su zaštitni vodni objekti ugroženi usled dugotrajno visokih vodostaja. Istovremeno sa proglašavanjem odbrane od poplava nalaže se nadležnom vodoprivrednom preduzeću da organizuje osmatračku službu na odbrambenoj liniji, prema planu odbrane, da evidentira sve pojave na nasipu i izvrši potrebne pripreme za saniranje slabih mesta, kao i druge radnje predviđene odgovarajućim pravilnicima.

U Operativnom planu odbrane od poplava su definisani sektori sa nazivom, opisom i dužinom sistema za zaštitu. Sektori su podeljeni na tehničke deonice za koje je dat opis (spisak vodotoka na koji se odnosi tehnička deonica, naziv i dužine sistema za zaštitu od poplava), spisak zaštitnih vodnih objekata na kojima se sprovode mere odbrane od poplava, merodavni vodomer na kome su definisani kriterijumi za uvođenje mera odbrane od poplava i osnovni podaci o njemu (način merenja nivoa, kota „0“ vodomera, najviši osmotreni vodostaj i datum pojave) i kriterijumi za raspisivanje redovne i vanredne odbrane od poplava. Naveden je merodavni vodostaj za dimenzionisanje objekata i protok kome odgovara merodavni vodostaj. Takođe je naveden i kritični vodostaj/kota zaštitnog sistema. U okviru pojedinih sektora obuhvaćene su ustave, brane, akumulacije i retenzije sa osnovnim elementima od interesa za odbranu od poplava.

Visina vodostaja je, trenutno, osnovni parametar za definisanje uslova za proglašenje pojedinih faza odbrane od poplava, ali nikako ne bi smeo biti jedini kriterijum. Sa aspekta uticaja poplavnog talasa na zaštitne objekte, posebno na zemljane nasipe - veoma značajan parametar je dužina trajanja visokih vodostaja i intenzitet njihovog porasta.

Kada će biti proglašena odbrana od poplava zavisi i od izgrađenosti i konstruktivnih karakteristika, tj. od realnog stanja i stepena zaštite koji u trenutku prolaska poplavnog talasa ima odbrambena linija. Za zemljane nasipe su od bitnog značaja karakteristike materijala i način njegove ugradnje u telo nasipa, kao i fizičke, hemijske i filtracione karakteristike tla ispod temelja odbrambene linije. Takođe je veoma značajno poznavati karakteristike i stanje objekata koji se nalaze u telu nasipa ili na nasipu, a koji mogu biti izrazito slaba mesta. Ovi lokaliteti ne moraju imati merodavne uslove za proglašavanje odbrane od poplava iste kao na dužoj deonici nasipa, već se na njima mogu uvesti posebni kriterijumi. Prema Opštem planu za odbranu od poplava, proglašavanje redovne i vanredne odbrane od poplava je moguće i pre dostignutih utvrđenih kriterijuma, ako stanje na pojedinim lokalitetima na nasipima za odbranu od poplava i objektima u njima ili hidrometeorološke prilike to zahtevaju (prokvašenost ili procurenje nasipa, rušilačko dejstvo talasa, stanje leda ili druge nepovoljne pojave).

Najčešće redovna odbrana počinje kada vodostaj reke dođe do nožice nasipa, a vanredna kada je nivo oko 1m niži od prethodno zabeleženog maksimalnog nivoa na određenoj deonici reke.

Kada se dostigne kritični vodostaj (vodostaj za koji je zaštitni sistem dimenzionisan i izgrađen) ili kritična (najniža) kota zaštitnog sistema, a očekuje se dalji porast vodostaja ili drugi problemi proglašava se **vanredna situacija usled poplava**. Tada nadležnost prelazi na druge organe, nadležne za vanredne situacije.

16.2 Redovno održavanje objekata

Pored blagovremenog proglašavanja i adekvatne organizacije sprovođenja redovne i vanredne odbrane, značajnu ulogu u obezbeđenju uspešne odbrane od poplava ima i redovno održavanje zaštitnih objekata, što je stalna obaveza vodoprivrednih organizacija koje su zadužene za odbranu od poplava na pojedinim sektorima vodotoka.

Kao što je napred rečeno, posle izvođenja investicionih objekata za zaštitu od poplava (nasipi, regulisani vodotoci za sprovođenje velikih voda, objekti za zaštitu od erozije i bujica, brane, retenzije i akumulacije), neophodno je njihovo kontinuirano održavanje u funkcionalnom stanju. Održavanje svake od navedenih vrsta objekata i radova ima svoje specifičnosti.

16.2.1 Redovno održavanje nasipa

Redovnim održavanjem nasipa postiže se njihova funkcionalna ispravnost, koja je neophodna jer se poplave manjeg ili većeg intenziteta mogu pojaviti skoro u toku cele godine.

Sistematsko i kontinualno održavanje vegetacije, na samom nasipu i u zoni pored nasipa (slika 16.2), je potrebno da bi se održao integritet objekta, funkcionalnost, vidljivost i obezbedio pristup u periodima kada su potrebne intervencije. Sva drvenasta vegetacija se po pravilu mora ukloniti, dok se travnati pokrivač održava redovnim košenjem.

U tabeli 16.1 su navedeni problemi na zemljanim nasipima koji se moraju blagovremeno uočiti i sanirati pre perioda velikih voda, jer mogu dovesti do njihovog rušenja. Ove sanacije se uglavnom izvode po posebnim elaboratima, jer prevazilaze uobičajene poslove redovnog održavanja.

Slika 16.2: Prinasipski pojas pre i posle čišćenja od vegetacije (Izvor: IJČ)

Tabela 16.1: Negativne pojave na nasipima [78]

Pojave na nasipu	Uzroci rušenja: Spoljna erozija	Uzroci rušenja: Unutrašnja erozija	Uzroci rušenja: Nestabilnost	Komentar
Životinjske jame		*		Voda prodire u unutrašnjost nasipa kroz jame koje su iskopale životinje i može da eroduje materijal nasipa i izazove njegovu nestabilnost
Erozija obala	*			Rušenje obala može da dovede i do rušenja nasipa, ako se ne primene mere zaštite
Ulegnuća i kolotrazi na kruni i kosinama	*			Ulegnuća i kolotrazi na kruni i kosinama nasipa neće dovesti do rušenja nasipa ali ometaju saobraćaj koji je neophodan tokom operativne odbrane. Mogu da oštete travnati pokrivač, što dovodi do erozije
Sleganje	*			Sleganje nasipa smanjuje projektovani stepen zaštite i može se javiti prelivanje.
Procurenja kroz nasip i podlogu		*		Dovodi do ispiranja finih čestica, pa zatim i krupnijih, odnosno do unutrašnje erozije
Nestabilnost kosina			*	Nestabilnost se može pojaviti u različitim oblicima (kliženje, pukotina, erozija u nožici). Može postepeno dovesti do rušenja celog nasipa, jer i drugi delovi kosine postaju nestabilni
Pukotine			*	Pukotine su indikator nestabilnosti kosine. Ako se ne tretiraju, mogu dovesti do nestabilnosti celog nasipa

Slika 16.3: Sanacija nebranjene kosine nasipa na kojoj je uočena pojava plitke klizne ravni (Izvor: IJČ)

U poslove redovnog održavanja spada i održavanje čuvarnica i magacina sa deponovanom opremom, alatom i materijalom, održavanje nasipskih kapija, graničnih belega i stacionažnih oznaka.

Od posebnog značaja za sigurnost nasipske linije je održavanje objekata izgrađenih u telu nasipa i njegovoj neposrednoj blizini, kao što su ustave, crpne stanice, različiti vodovi koji su postavljeni na, preko ili ispod nasipa. Tu spadaju i objekti koji su locirani pored nasipa, sa branjene ili nebranjene strane i svi drugi objekti koji imaju uticaja na hidrauličke uslove u zoni nasipa (cevovodi, pristani za brodove, stepenice, zgrade, bazeni, putevi, pruge, kanali za navodnjavanje). Ovi objekti su, generalno, najslabija mesta u odbrambenoj liniji, zbog nižeg stepena sigurnosti u odnosu na ceo sistem i uglavnom nerešenog pitanja vlasništva.

16.2.2 Redovno održavanje korita vodotoka

Redovno održavanje vodotoka koji su regulisani za prijem velikih voda (slika 16.4) obuhvata više pozicija koje su slične održavanju nasipa (košenje trave, šiblja, održavanje zaštitnih obloga), kao i specifične pozicije (izmuljivanje korita, uklanjanje krupnog otpada).

Slika 16.4: Regulisano korito pre i posle redovnog održavanja (Izvor: IJČ)

16.2.3 Redovno održavanje objekata za zaštitu od bujica i erozije

Karakter i načini redovnog održavanja objekata za zaštitu od bujica i erozije su različiti, u zavisnosti od tipa i funkcije objekta. Prioritetno je održavanje objekata na bujičnim vodotocima - bujičarskih pregrada (sečenje drveća i šiblja na zaplavima bujičarskih pregrada i čišćenje slapišta od nanosa) i regulisanih korita bujičnih tokova. Na regulisanim deonicama bujičnih tokova neophodne su određene operacije održavanja posle svakog prolaska talasa

velikih voda (čišćenje od istaloženog i plivajućeg nanosa - stabala, granja i raznih otpadaka). Takođe, s obzirom da se plivajući nanos zadržava na svim uskim grlima u rečnom koritu, a naročito u mostovskim otvorima, neophodno je njegovo uklanjanje posle svakog prolaska velikih voda i sa neregulisanih deonica vodotoka. Čišćenje se mora vršiti i na lokacijama ostalih objekata u rečnom koritu (ustave, vodozahvati i dr.).

16.2.4 Redovno održavanje brana, akumulacija i retenzija

Radovi na redovnom održavanju brana, akumulacija i retenzija zavise od njihovog tipa i namene. Pozicije redovnih radova za održavanje nasutih brana su slične radovima na nasipima (košenje trave i šiblja na kruni i kosinama, čišćenje obloge od rastinja, ravnanje krune). Takođe, neophodno je održavanje u funkcionalnom stanju svih evakuacionih organa na branama, koje pored uklanjanja mulja i nanosa obuhvata i održavanje elektro-mašinske opreme.

16.3 Negativne pojave na nasipima i primena interventnih mera

16.3.1 Identifikacija slabih mesta na nasipima

Nasipi su sigurno najstariji i još uvek najrašireniji vid zaštite od poplava u ravničarskim predelima i rečnim dolinama i još dugo će biti osnovni vid zaštite od poplava. Zbog toga su aktivnosti, radovi i mere koje treba sprovoditi na nasipima pre, u toku i posle prolaska velikih voda vrlo značajne i od njihovog adekvatnog sprovođenja zavisi uspešnost odbrane od poplava.

Veoma često se nailazi na mišljenje da je dovoljno izgraditi odbrambene linije i održavati ih u meri potrebnoj za očuvanje njihove celovitosti. Međutim, to ni približno nije tačno. Odbrambeni nasipi su građeni i dograđivani u dugom vremenskom periodu, sa različitim tehnologijama i materijalima i različitim stepenom zaštite. Te odbrambene linije često imaju veoma velike slabosti, koje se pokazuju tokom prolaska poplavnih talasa.

Poplavni talas vrši različite uticaje na zaštitne objekte (statičke, hidrodinamičke, hemijske i dr.), koji mogu ugroziti sigurnost odbrambene linije. Dosadašnja praksa je pokazala da su ovi uticaji izraženiji sa povećanjem visine i trajanja naleganja vode na nasip.

Da bi se smanjile posledice negativnih uticaja vode na zaštitne objekte i obezbedio integritet odbrambene linije, u toku prolaska poplavnog talasa se sprovodi operativna odbrana od poplava. Zbog toga mora postojati tehnička služba koja ima zadatak da uoči slaba mesta na nasipima i preduzme odgovarajuće interventne mere. Uloga tehničke službe prvenstveno zavisi od trajanja poplavnih talasa na vodotoku.

Na odbrambenim linijama duž vodotoka sa kratkim trajanjem poplavnih talasa, prevashodni cilj aktivnosti i mera je očuvanje celovitosti odbrambene linije, mada i tu postoji potreba za određenim obimom interventnih radova.

Na vodotocima sa veoma dugim trajanjem poplavnih talasa, odbrambeni nasipi se pretvaraju u gomile blata kojima je potrebna “intenzivna nega” da bi se očuvali “u životu” i zaštitili priobalje od poplave. Stoga je tu osnovni uslov za uspešnu odbranu od poplava prisustvo stručne službe za odbranu, koja je sposobna da blagovremeno uoči negativne

pojave na odbrambenoj liniji i opremljena da u kritičnom trenutku preduzme odgovarajuće interventne mere. Pored toga, od neospornog značaja je redovno održavanje zaštitnih objekata, obezbeđenje osposobljenog kadra, održavanje u ispravnom stanju neophodne mehanizacije, blagovremena priprema materijala potrebnog za odbranu od poplava, razrađeni planovi za uključenje drugih institucija (posebno u uslovima vanrednog stanja), kao i pravovremeno proglašavanje pojedinih faza odbrane, uz adekvatno sprovođenje.

Za blagovremeno i uspešno sprovođenje interventnih radova potrebno je da postoji dobro organizovana služba osmatranja, sposobna da uoči sve negativne pojave i o tome blagovremeno izvesti rukovodstvo odbrane, koje donosi odluku o preduzimanju interventnih radova i mera, dobro organizovana i opremljena služba za intervencije na nivou sektora i vodnog područja, sa dovoljnom količinom alata i materijala, i obezbeđena prohodnost saobraćaja na odbrambenoj liniji.

Službi za odbranu od poplava je potrebno da detaljno upozna sve karakteristike objekata na kojima se primenjuju mere tokom prolaska velikih voda. U tu svrhu treba uraditi određeni obim ispitivanja i analiza, koje su nabrojane u tabeli 16.2.

Tabela 16.2: Izvor i vrste podataka o stanju i funkcionisanju nasipa [78]

Izvor podataka	Podatak	Namena
Projekat izvedenog objekta	• položaj i delovi nasipa različitih tipova • detalji konstrukcije • geometrija objekta • funkcionalna ograničenja	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda
Dozvole	• dozvola za izgradnju	
Građevinski dnevnik	• crteži i specifikacije za izgradnju • dnevni izveštaji sa terena	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda • da se razume ranjivost nasipa na osnovu datuma izgradnje
Projekti	• proračuni (merodavni parametri) • uputstva za korišćenje i održavanje	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda
Podaci o ponašanju objekta tokom prethodnih velikih voda	• karakteristike velikih voda • podaci i fotografije nasipa tokom odbrane • intervjui sa učesnicima • modifikacije nasipa izvršene u međuvremenu	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda • da se utvrdi potreba za revizijom sistema
Inspekcijski izveštaji	• ocena stanja nasipa • evidencija oštećenja nasipa • potvrda adekvatnog korišćenja i održavanja	• da se utvrdi stanje komponenti nasipa i prioriteti za sanaciju/ rekonstrukciju/ zamenu
Merenja na nasipu	• podaci merenja stanja nasipa u realnom vremenu (senzori pritiska porne vode, pijezometri, inklinometri itd.)	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda • da se obezbede podaci za sanaciju/ rekonstrukciju objekta
Uputstva	• standardi i kriterijumi za održavanje nasipa • uputstva za merenja	• da bi se procenio kvalitet održavanja, osmatranja i funkcionisanja
Prethodne analize i procene	• analize opasnosti od otkaza nasipa • procene stanja	• razumevanje funkcionisanja nasipa • utvrđivanje potrebe za finansiranjem sanacije/ rekonstrukcije/zamene

Izvor podataka	Podatak	Namena
Nova hidrotehnička istraživanja	• geometrija nasipa • granice štićenog područja • geometrija rečnog korita	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda • da se utvrdi stanje komponenti nasipa i prioriteti za sanaciju/ rekonstrukciju/ zamenu
	• geotehnički istražni radovi (geološki slojevi, krupnoća materijala, vodopropustljivost, napon smicanja, stišljivost, gustina, stratigrafija) – istražna bušenja ili georadar	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda
	• nove hidrauličke i hidrološke analize, na osnovu ažurnih nizova protoka i nivoa radi definisanja opterećenja nasipa u sadašnjim uslovima • analiza učestalosti poplavnih događaja • proračun visine talasa • analize padavina	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda • da se razume veličina uticaja na nasip
	• morfološka analiza rečnih korita, posebno u blizini nasipa (taloženje nanosa/ erozija)	• da se proceni funkcionisanje nasipa tokom velikih voda
	• analiza sadašnjih receptora rizika u branjenom području (stanovništvo, privredne aktivnosti, životna sredina, kulturno nasleđe)	• da bi se razumele vrednosti dobara u štićenom području i opravdala vrednost sistema nasipa • ocena potencijalne ekonomske štete • ocena opasnosti po život ljudi • procena drugih mogućih uticaja
	• analiza klimatskih promena radi definisanja opterećenja nasipa u budućim uslovima	• da bi se razumele moguće promene faktora od značaja za nasipe
Štićena poplavna područja	• karte ugroženosti i rizika od poplava • moguće posledice otkaza nasipa	• da bi se odredile i analizirale vrednosti koje su potencijalno ugrožene poplavama
Planovi	• planovi odbrane od poplava • planovi za vanredne situacije • planovi evakuacije	• da se odredi spremnost branjenog područja na vanredne situacije • dosezanje mera za smanjenje rizika

16.3.2 Zaštita nasipa od prelivanja

Službi za odbranu od poplava su unapred poznate deonice odbrambene linije na kojima se može pojaviti opasnost od prelivanja. Služba je obavezna da prati porast i prognozu vodostaja i na vreme upozori na opasnost od prelivanja nasipa na deonicama identifikovanim na bazi tehničke dokumentacije. U slučaju da postoji opasnost od prelivanja, donosi odluku o blagovremenom preduzimanju mere nadvišenja nasipa ili se proglašavaju mere vanrednog stanja odbrane od poplava (uzbunjivanje, evakuacija i sl.), ukoliko oceni da nadvišenje nasipa neće biti dovoljno uspešna mera.

Opasnost od prelivanja se može pojaviti i:

- na lokalitetima gde odbrambena linija nema potrebnu visinu iz različitih razloga (poddimenzionisan nasip, privremeno sniženje zbog radova i sl.). Čest je slučaj, naročito u naseljenim mestima, da su pojedini lokaliteti na odbrambenoj liniji

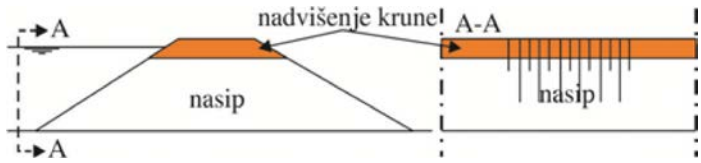
niži iz funkcionalnih razloga (prelazi, silazne rampe, otvori za stepeništa i sl.). Ovi lokaliteti moraju biti evidentirani u tehničkoj dokumentaciji, tako da se na njima mogu na vreme preduzeti potrebne mere zatvaranja;

- na bujičnim vodotocima, ukoliko dođe do stvaranja prepreka u proticajnom profilu (naročito na mostovima) i neočekivanog povišenja nivoa;
- zbog povišenja nivoa vode nastalog stvaranjem ledenih barijera;
- na kanalisanim vodotocima, ukoliko se, zbog kvara, zatvarači na ustavama ili branama ne mogu blagovremeno otvoriti pri nailasku poplavnog talasa. Slično tome, podizanje vode iznad očekivanog nivoa se može desiti i usled prinudnog zatvaranja zatvarača (u havarijskim slučajevima) ili diverzije.

16.3.2.1 Zaštita od prelivanja na većim dužinama

Mere za zaštitu nasipa od prelivanja na velikim dužinama moguće je primeniti samo na rekama sa relativno malim intenzitetom porasta vodostaja, tako da, nakon dobijanja prognoze o daljem porastu vodostaja, ima dovoljno vremena za preduzimanje mere nadvišenja. Tip mera zavisi od dužine raspoloživog vremena, terenskih uslova, kao i sredstava, materijala i opreme kojima služba raspolaže. U nastavku je dat pregled osnovnih mera zaštite nasipa od prelivanja.

Generalno nadvišenje krune nasipa je najsigurniji način zaštite od prelivanja, koji trajno povećava sigurnost odbrambene linije i istovremeno rešava problem saobraćaja po nasipu. Međutim, ovaj vid intervencije zahteva dosta vremena za izvođenje, najčešće je dužina deonice ograničena zbog terenskih uslova, a rad se mora prekidati u slučaju loših vremenskih uslova.



Slika 16.5: Šematski prikaz nadvišenja krune nasipa po celoj širini [60]

Generalno nadvišenje krune nasipa po celoj širini (slika 16.5) se primenjuje samo u slučajevima kada terenski uslovi omogućavaju pristup mehanizaciji, a u blizini nasipa postoji pozajmište materijala (prašinasto-glinovitog sastava, pogodne vlažnosti). Nasipanje materijala se vrši "s čela", po celoj širini krune, tako da se transportna mehanizacija sa punim teretom kreće po već nasutom materijalu, čime se istovremeno vrši zbijanje.

Izrada **"zečijih" nasipa** na kruni odbrambenog nasipa je najčešći vid zaštite od prelivanja. Relativno mala količina materijala ugrađenog u "zečiji" nasip može izdržati vodostaj koji krunu nasipa nadvišuje za 20-30cm (izuzetno i za 50-60 cm), što može biti od izuzetnog značaja za zaštitu branjenog područja.

Osnovni materijal za izradu "zečijih" nasipa su vreće napunjene peskom ili zemljanim materijalom koji se nalazi na licu mesta. Mala količina materijala, upakovana u vreće i ugrađena u privremenu konstrukciju, može u potpunosti da obavi funkciju zaštite i udovolji postavljenim zahtevima (slike 16.6 i 16.7).

Dobre strane konstrukcije od vreća su: dobra otpornost od erozije talasima, velika otpornost na klizanje (mogu se graditi čak i vertikalni zidovi), mogućnost korišćenja raznih materijala za ispunu, koji se uvek mogu naći na licu mesta, laka manipulacija i mogućnost ugradnje i pri lošim vremenskim uslovima, kao i na raskvašenom nasipu, kada se mehanizacijom ne može raditi, dok su loše strane: potreba za velikim angažovanjem radne snage za punjenje i ugradnju vreća (slika 16.8), privremeno i najčešće samo jednokratno korišćenje.

Korišćenje vreća u odbrani od poplava nije jeftino (zbog cene samih vreća i troškova rada na ugradnji). Međutim, ovaj način se koristi samo u izuzetnim slučajevima, u cilju sprečavanja šteta velikih razmera, tako da je uvek isplativ.

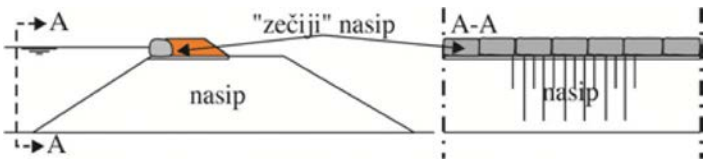
Vreće mogu biti jutane ili od raznih vrsta sintetičkog materijala, tkanog ili netkanog. Prema iskustvu učesnika u odbranama od poplava je da su pogodnije vreće od jute ili od tkanog sintetičkog materijala, jer bolje prijanjaju jedna uz drugu, tako da je konstrukcija kompaktnija (nisu "klizave").

Slika 16.6: Zečiji nasip postavljen na uređenoj obali (Izvor: IJČ)

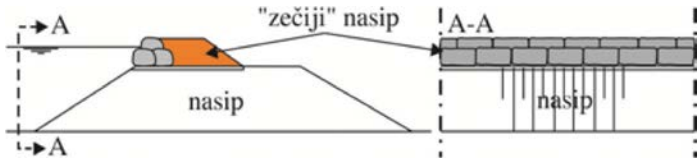
Slika 16.7: Zečiji nasip postavljen na glavnom nasipu nedovoljne visine (Izvor: floodresolutionsusa.com)

Slika 16.8: Punjenje i postavljanje vreća zahteva veliko angažovanje radne snage (Izvor: IJČ)

Najprostiji oblik "zečijeg" nasipa je od jednog reda vreća, koje se polažu na prethodno očišćenu podlogu (uklonjena trava i blato) na nebranjenoj ivici krune nasipa (slika 16.9). Nasip od jednog reda vreća se koristi kada odbrambenu liniju treba nadvisiti za 10-15 cm na velikoj dužini. Sa unutrašnje strane "zečijeg" nasipa se dodaje još izvesna količina zemljanog materijala, radi boljeg zaptivanja sa podlogom i između vreća.

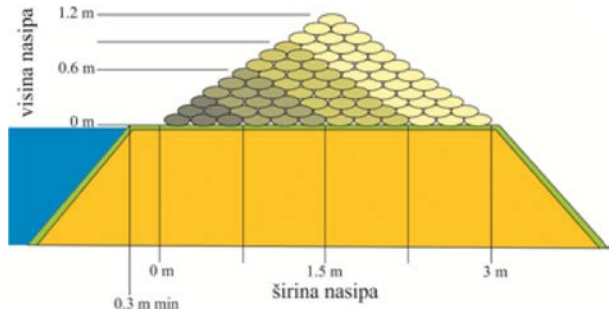


Slika 16.9: Zečiji nasip od jednog reda vreća [60]



Slika 16.10: Zečiji nasip od dva reda vreća [60]

Ako je potrebno veće nadvišenje nasipa, mogu se postaviti dva, pa i više redova vreća po visini (slika 16.10). U tom slučaju i osnova "zečijeg" nasipa mora biti šira, sa dva ili više redova vreća. Vreće se postavljaju tako da su spojnice između susednih redova po širini i po visini uvek smaknute (kao zid od opeke – slika 16.11).



Slika 16.11: Postavljanje vreća [78]

Za izvođenje nasipa se mogu koristiti i „džambo" vreće donekle napunjene zemljanim materijalom (slike 16.12 i 16.13), koje se umotavaju u foliju, radi boljeg povezivanja. Zbog velike težine napunjenih „džambo" vreća, njima se manipuliše isključivo mašinski.

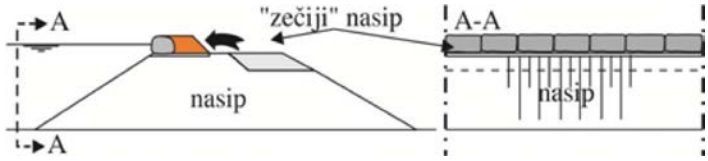
Slika 16.12: „Džambo" vreća

Vreće se najčešće pune materijalom na pozajmištu i transportuju do mesta ugradnje kamionima ili traktorima sa prikolicom, kao i materijal za balast iza vreća. Za to je uslov dobra prohodnost za mehanizaciju po kruni nasipa.

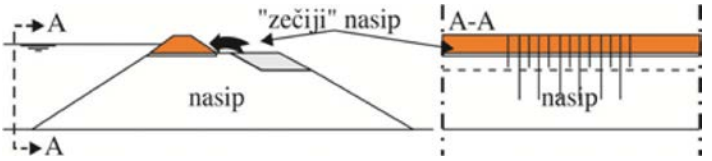
Kada kruna nasipa nije prohodna (oštećena kruna ili loši vremenski uslovi) ili nema vremena za dovoz materijala iz pozajmišta, materijal za izradu "zečijeg" nasipa se uzima sa lica mesta. Materijal se skida sa krune prema branjenoj strani nasipa, pune vreće i postavljaju na nebranjenu ivicu krune (slika 16.14).

Slika 16.13: Zečiji nasip od „džambo" vreća, Zemun 2006 (Izvor: IJČ)

Kada nema vreća ili vremena za njihovo punjenje jer neposredno preti prelivanje, "zečiji" nasip se izvodi bez vreća, od zemljanog materijala koji se uzima sa krune sa branjene strane i ugrađuje u nasip na nebranjenoj ivici krune (slike 16.15 i 16.16). Ovaj način zaštite se primenjuje samo izuzetno (u krajnjoj nuždi), na nasipima duž` vodotoka sa kratkim trajanjem poplavnih talasa.



Slika 16.14: Šematski prikaz izvođenja "zečijeg" nasipa na kruni od vreća i materijala sa lica mesta [60]



Slika 16.15: Šematski prikaz "zečijeg" nasipa na kruni od materijala sa lica mesta [60]

Slika 16.16: Nadvišenje desnog nasipa Drine, maj 2014. godine (Izvor: JVP Srbijavode)

"Zečiji" nasipi se ponekad moraju raditi i na potezima gde nema odbrambenih nasipa odnosno na "visokom" terenu, gde usled izuzetno visokih vodostaja preti prelivanje (slika 16.17). Van naselja, nasip se gradi od zemljanog materijala sa lica mesta (buldozerom, poprečnim transportom) ili dovoženjem materijala iz pozajmišta (ako nema dovoljno prostora za pozajmište). U naseljenim mestima "zečiji" nasipi se po pravilu rade od vreća.

Slika 16.17: Šematski prikaz izgradnje "zečijeg" nasipa na visokom terenu [60]

16.3.2.2 Zaštita od prelivanja na pojedinim lokalitetima

Slika 16.18: Zatvaranje prolaza ispod pruge gredičnim zatvaračima (Izvor: IJČ)

Na odbrambenim linijama u naseljenim mestima često postoje lokaliteti na kojima su iz funkcionalnih razloga ostavljeni otvori (silazne rampe, ukrštanja, stepeništa). Ove lokalitete u vreme nailaska poplavnih talasa treba zatvoriti. Najbolji način zatvaranja otvora je pomoću za to predviđenih pomoćnih zatvarača (po pravilu u vidu gredičnih zagata, koji se montiraju u bočne vođice – slika 16.18). Otvori većih širina otvora se dele na dva, pa i više raspona, pomoću montažnih stubova koji se postavljaju u pripremljena ležišta i ankeruju. Gredični zagati mogu biti drveni ili čelični, a montažni stubovi su po pravilu čelični. I grede i stubovi se čuvaju u magacinima i montiraju po potrebi. U slučajevima kada pomoćni zatvarači nisu predviđeni ili ih nema iz bilo kojih razloga, otvori se zatvaraju vrećama.

16.3.2.3 Zaštita od prelivanja savremenijim sredstvima

Napred opisani načini zaštite od prelivanja su tradicionalni i primenjuju se veoma dugo. Nastojanja da se zaštita nasipa od prelivanja osavremeni svode se na projektovanje pogodnog tipa montažne konstrukcije, čija primena skraćuje vreme potrebno za nadvišenje odbrambene linije i smanjuje učešće radne snage u izgradnji.

Slika 16.19: Postavljene kutije (Izvor: Hrvatske vode)

Pri projektovanju montažne konstrukcije postavljaju se dva osnovna problema: kako horizontalne sile hidrostatičkog pritiska preneti na tlo i kako obezbediti zaptivanje u podnožju konstrukcije i na spojevima između pojedinih delova.

U nastavku su dati primeri različitih tipova montažnih konstrukcija, koje se koriste u svetu.

Kutije od sintetičkog materijala (slika 16.19) punjene peskom ili zemljom (slika 16.20) se mogu koristiti za brzo formiranje odbrambene linije, ukoliko je moguća primena teške mehanizacije za njihovo postavljanje i punjenje. Koriste se samo na uređenoj obali ili sličnoj tvrdoj podlozi, a ne za povećanje visine nasipa jer bi ih velika težina kutija mogla oštetiti. Kutije se mogu puniti i vodom.

Slika 16.20: Punjenje kutija zemljom (Izvor: Hrvatske vode)

Slika 16.21: Montažna barijera sa vertikalnim i kosim nosačima (Izvor: hydroresponse.com)

Slika 16.22: Montažna barijera sa kosim nosačima (Izvor: hydroresponse.com)

Za nešto veće visine i neograničenu dužinu "zečijeg" nasipa može se koristiti montažna konstrukcija u vidu privremenog zagata. Konstrukcija se sastoji od trouglastih ramovskih nosača od pocinkovanog lima (na međusobnom odstojanju od 1-1,2 m), preko kojih se postavljaju drvene palete i polivinilska folija (slike 16.21 i 16.22). Kako je položaj palete kos u odnosu na vodu, uz težinu konstrukcije na podlogu deluje i značajna vertikalna komponenta hidrostatičkog pritiska, što povećava otpor na trenje. U celini, konstrukcija je vrlo jednostavna i praktična. Dobre osobine konstrukcije su: mala težina, stabilnost na klizanje obezbeđuje sama voda, a može se montirati veoma brzo.

Za "zečije" nasipe manje visine koriste se dugačke vreće od sintetičkog materijala (prečnika 80-100 cm, dužine 12-15 m) koje se polažu po trasi odbrambene linije i pune vodom (slika 16.23). Podlogu je potrebno prethodno očistiti i, po mogućstvu, oblikovati ležište za vreće. U cilju boljeg zaptivanja, vreće se pune samo do određene mere, jer tako imaju šire naleganje i bolje prijanjaju za tlo. Nizovi vreća mogu biti dugački stotinama metara. Spojevi između susednih vreća se posebno obezbeđuju folijom, uz dodatno opterećenje.

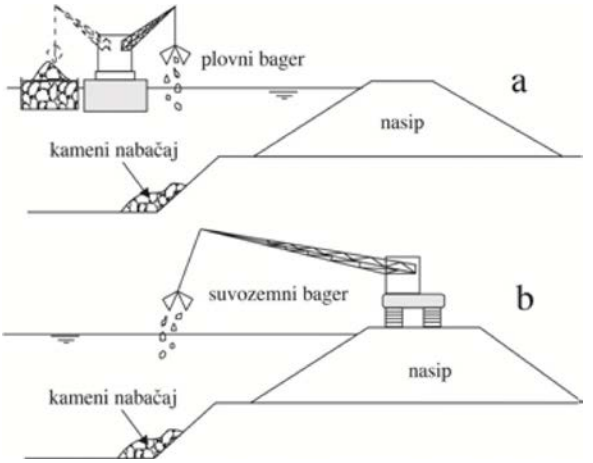
Sistemi zidova od talpi (slika 16.24) spadaju u nepokretne elemente za zaštitu od poplava. Mogu se postaviti duž šetališta uz obalu, ali i za zatvaranje prolaza ili povišenje nasipa. Sastoje se od sidrene ploče izrađene od plemenitog čelika i učvršćene u tlo, uspravnih čeličnih ili aluminijumskih podupirača kao i vodoravno postavljenih talpi. Radi se o prilično efikasnom sistemu, koji je skup pa se koristi uglavnom u gradovima.

Slika 16.23: Creva punjena vodom (Izvor: geoline.ie)

Slika 16.24: Vertikalni zid od talpi u Golupcu, Srbija (Izvor: JVP Srbijavode)

16.3.3 Zaštita obala minor korita od erozije

Erozija obala minor korita vodotoka može ugroziti odbrambeni nasip koji se nalazi u neposrednoj blizini. Naime, ako u toku prolaska velikih voda povećane vučne sile premaše kritične vrednosti, dolazi do odnošenja materijala sa obale, potkopava se podnožje nasipa i dolazi do klizanja. Zaštita se vrši kamenim nabačajem (slika 16.25), koji se izvodi pomoću suvozemne, ili, kad god je to moguće, plovne mehanizacije.



Slika 16.25: Izrada kamenog nabačaja za zaštitu obale od erozije, plovnom ili suvozemnom mehanizacijom [60]

16.3.4 Zaštita nebranjene kosine nasipa od erozije

Najčešći uzrok oštećenja nebranjene kosine nasipa je eroziono dejstvo talasa od vetra. Oštećenja mogu prouzrokovati i talasi od plovila, kao i eroziono dejstvo vodenog toka. Posledica oštećenja može biti klizanje nebranjene kosine nasipa, kao i pojačana prokvašenja i procurenja kroz telo nasipa.

Trajna zaštita nebranjene kosine nasipa od erozije od talasa postiže se formiranjem zaštitnog šumskog pojasa na inundaciji ispred nasipa. Ako nema uslova za uzgoj šumskog pojasa (korito vodotoka u neposrednoj blizini ili trajno potopljen teren ispred nasipa), nebranjena kosina nasipa se oblaže. Kako je zaštita nasipa oblaganjem dosta skupa, neobložene deonice nasipa se moraju štititi od talasa u toku odbrane od poplava.

Tradicionalan način zaštite je izrada talas-brana od snopova fašina (snopovi pruća, prečnika oko 30 cm, dužine 3-4 m) ili koba (povezane fašine, dužine 9-15 m), koje se u jednom, dva ili tri reda pričvršćuju za nasip pomoću drvenih kolaca (prečnika 6-8 cm, dužine 1,5 m).

U novije vreme koriste se različite vrste plastičnih folija ili netkani tekstil koji se polažu po kosini nasipa u zoni ureza vode. Ove obloge se za kosinu nasipa pričvršćuju specijalnim klinovima i opterećuju vrećama napunjenim peskom (slika 16.26) da ih talasi ne bi podizali.

Slika 16.26: Zaštita nebranjene kosine nasipa od talasa (Izvor: m.ammoth.us)

16.3.5 Zaštita od prodora vode kroz telo nasipa

16.3.5.1 Prokvašenja i procurenja nasipa

Prokvašenje nastaje kad procedna linija kroz telo nasipa izbije na branjenu kosinu nasipa. Vreme pojave zavisi od dužine trajanja visokih nivoa vode, kao i geomehaničkog sastava i kvaliteta materijala ugrađenog u nasip. Procedna linija se najpre javlja u nožici nasipa, a zatim se postepeno podiže do bankine, pa i iznad (slika 16.27). Povećani porni pritisci u ovoj zoni mogu izazvati klizanje branjene kosine nasipa. Pojava prokvašenja nasipa se može blagovremeno uočiti samo na dobro održavanom nasipu, sa uredno pokošenim kosinama.

Slika 16.27: Pojava većeg broja izvora na kosini nasipa [60]

Slika 16.28: Izvor na branjenoj strani nasipa

Posle prokvašenja nasipa dolazi do veće koncentracije proticaja vode na privilegovanim mestima, odnosno do procurenja kroz telo nasipa. Ova pojava je opasna zbog procesa sufozije, odnosno iznošenja materijala iz tela nasipa.

Koncentrična procurenja kroz telo nasipa postepeno prerastaju u izvore (slika 16.28). Proces je progresivan, pa bistri izvori postaju mutni usled iznošenja materijala. Ako se proces ne zaustavi, neminovno dolazi do velikih deformacija, koje isprovociraju klizanja, a zatim i pojavu prodora kroz telo nasipa.

Do prodora može doći i ako se uspostavi direktan tok vode kroz telo nasipa, u obliku kratera koji se postepeno proširuje. Ova pojava se može desiti na loše održavanim nasipima, na kojima razne životinje (bizamski pacovi, lisice, krtice i dr.) stvaraju svoja staništa, koja otvaraju privilegovane puteve za prodor vode kroz telo nasipa.

Osnovna pravila za interventne radove na zaštiti od prodora vode kroz telo nasipa su:

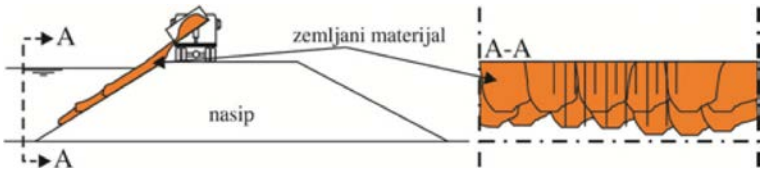
a) Sve intervencije na nebranjenoj strani nasipa izvode se u cilju sprečavanja ili smanjenja ulaza vode u telo nasipa (dakle, u smislu zaptivanja),
b) Sve intervencije na branjenoj strani nasipa izvode se u cilju brze i kontrolisane evakuacije vode koja je već prodrla u telo nasipa.

U nastavku su dati opisi interventnih radova i mera koji se najčešće primenjuju, polazeći od navedenih osnovnih pravila.

16.3.5.2 Intervencije na nebranjenoj kosini nasipa

Ukoliko su zapažene pojave prokvašenja, procurenja i izvora, mogu se primeniti različite mere na nebranjenoj kosini nasipa.

Najjednostavniji način je **izrada ekrana na nebranjenoj kosini nasipa** (slika 16.29), kipovanjem zemljanog materijala u vodu, po kosini, koje ima za cilj zaptivanje ulaznih pora na nebranjenoj kosini nasipa. Efikasnost ove metode zavisi od propusnosti materijala (poželjni su sitnozrni, vodonepropusni materijali), debljine sloja, dužine i položaja ekrana u odnosu na nožicu nasipa.

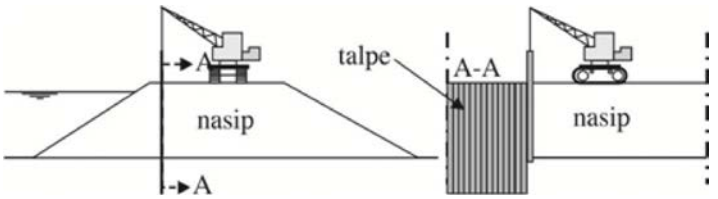


Slika 16.29: Izrada ekrana kipovanjem zemljanog materijala [60]

Drugi način zaštite je **polaganje plastične folije** po nebranjenoj kosini nasipa, koja se zatim opterećuje vrećama napunjenim peskom ili drugim zemljanim materijalom (slika 16.26).

Na deonicama nasipa na kojima su zapažena jača procurenja, treba potražiti ulaz vode i pokušati sa zatvaranjem ulaza napunjenim vrećama, koje se polažu po nebranjenoj kosini. Foliju i vreće polaže ekipa gnjuraca, ukoliko je na raspolaganju ili se formira nabačaj od veće količine vreća. Uslov za sve intervencije je dobro održavana kosina nasipa.

Izvođenjem **zavese od specijalnih lakih čeličnih talpi** (slika 16.30) do dubine od najmanje 2 m ispod podnožja nasipa, postiže se i veća sigurnost od loma tla ispod nasipa.

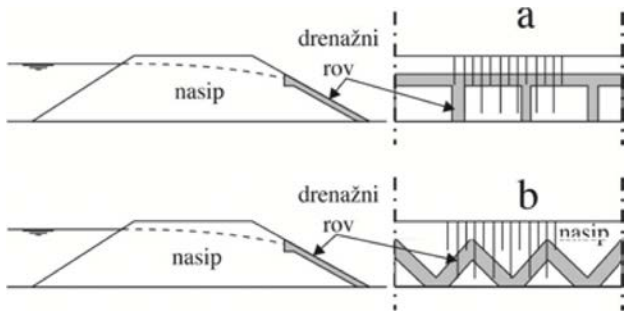


Slika 16.30: Protivfiltraciona zavesa od čeličnih talpi [60]

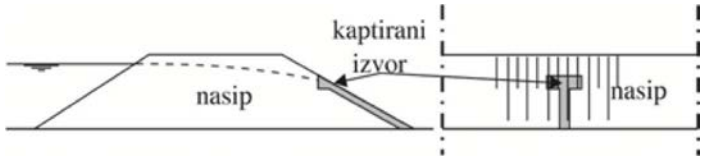
Injektiranje se primenjuje ako postoje kaverne u telu nasipa ili u tlu ispod nasipa. Izvodi se u zoni prema vodi, najčešće duž ivice krune nasipa sa nebranjene strane. Kao injekciona masa koristi se bentonit.

16.3.5.3 Intervencije na branjenoj kosini nasipa

Kada se na branjenoj kosini pojavi prokvašenje, to je znak da je procedna linija kroz telo nasipa izbila na površinu. Čak i ako nema izrazitih procurenja, tada je potrebno uraditi drenažu da bi se voda iz tela nasipa odvela na kontrolisan način. Istovremeno, ovom merom se postiže i obaranje procedne linije, uz sniženje pornih pritisaka i smanjenje opasnosti od klizanja kosina. Drenaža se izvodi tako što se iskopa jedan podužni, horizontalni rov dubine do 30 cm po celoj dužini deonice nasipa na kojoj su se pojavila prokvašenja (slika 16.31). Od podužnog rova do nožice nasipa kopaju se odvodni rovovi, na razmacima 3-4 m. Rovovi se ispunjavaju drenažnim materijalom koji stoji na raspolaganju (prirodna mešavina šljunka ili separisan šljunak, tucanik i sl.).



Slika 16.31: Drenaža na branjenoj strani nasipa [60]



Slika 16.32: Kaptaža izvora na branjenoj strani nasipa [60]

Kaptaža izvora na branjenoj kosini nasipa (slika 16.32) mora se izvršiti, pogotovu ako je izvor "mutan" (sa iznošenjem materijala). Zona izvora se otkopa i ispuni drenažnim materijalom, a po kosini nasipa se iskopa odvodni "šlic", koji treba, po mogućnosti, ispuniti drenažnim materijalom.

16.3.6 Zaštita od negativnih pojava u tlu sa branjene strane nasipa

Skoro po pravilu, podlogu nasipa čini povlatni sloj koherentnog materijala manje ili veće debljine, ispod koga se nalazi vodonosni sloj (peskovi ili šljunkovi). Vodonosni sloj u podlozi nasipa ima direktnu vezu sa koritom reke ili se prihranjuje vertikalnom infiltracijom kroz povlatni sloj u predterenu, ispred nasipa. Pri dužem trajanju visokog nivoa vode u reci, u vodonosnom sloju se javlja hidrostatički pritisak, čija pijezometarska kota nadvišava kotu branjenog terena.

Visoki pritisak u vodonosnom sloju sa branjene strane nasipa može izazvati više negativnih pojava koje mogu ugroziti stabilnost nasipa. To su:

- **Izdizanje tla u celini**: Ako hidrostatički pritisak na podnožje povlatnog sloja premašuje težinu povlatnog sloja, dolazi do izdizanja tla u celini, koje prati iznošenje peskovitog materijala u vidu erupcije. Nastaje takozvani "**lom tla**" ispod nasipa, zatim sledi sleganje nasipa, prelivanje i prodor.
- **Pojava izvora**: Češći je slučaj da, pre nego što hidrostatički pritisak dostigne visinu potrebnu za izdizanje tla u celini, dođe do pojave procurenja sa vertikalnim tokom na gore. Jača procurenja sa iznošenjem materijala nazivaju se izvori (slika 16.28). Proces je progresivan, tako da se ispod nasipa stvaraju protočni krateri, zatim sledi sleganje nasipa, prelivanje i prodor.

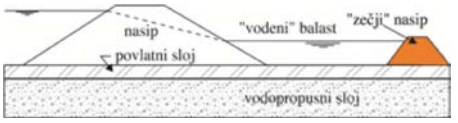
Osnovni uslov za praćenje i uočavanje pojava u tlu sa branjene strane nasipa, kao i za preduzimanje interventnih radova i mera, je dobro prethodno održavanje prinasipskog pojasa (iskrčeno šiblje, pokošena trava).

Za sprečavanje ovih pojava primenjuju se dva načina intervencije: izrada balasta na branjenoj strani nasipa ili veštačko sniženje hidrostatičkog pritiska ispod povlatnog sloja.

U **balast na branjenoj strani nasipa** se ugrađuje isključivo vodopropustan materijal (slika 16.33). Balast od vodonepropusnog materijala bi bio samo štetan, jer se izlaz vode ne može sprečiti, već se problem samo premešta na drugo mesto. Na manjim vodotocima se retko može javiti potreba za izradom balasta, jer poplavni talasi traju kratko.

Slika 16.33: Balast na branjenoj strani [78]

Umesto balasta ponekad se koristi **"vodeni jastuk"** (slika 16.34). Ugrožena deonica nasipa se sa branjene strane ogradi "zečijim" nasipom i taj prostor napuni vodom. Na taj način se dobija potrebno opterećenje i smanjuju izlazni gradijenti kroz povlatni sloj. Na obodnom nasipu je potrebno na jednom mestu improvizovati preliv, kako bi se odvela voda koja i dalje pritiče iz podzemlja, iako u smanjenim količinama. Izradom balasta ili "vodenog jastuka" rešava se i problem izdizanja tla u celini i pojava izvora.



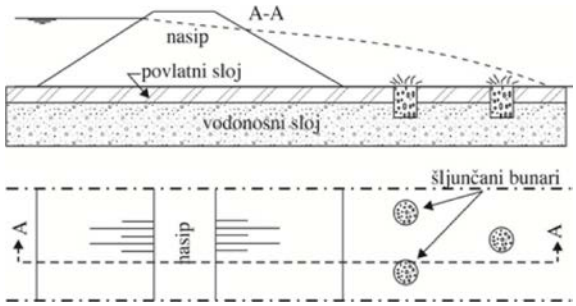
Slika 16.34: "Vodeni" jastuk na branjenoj strani nasipa [60]

Veštačko sniženje hidrostatičkog pritiska ispod povlatnog sloja, izradom **šljunčanih bunara** (slika 16.35). Bunari se izvode spuštanjem kolone (prečnika 250-350 mm) kroz povlatni sloj, sve dok ne zađe u vodonosni sloj. Posle ispiranja, kolona se zasipa šljunkom ili nekim drugim drenažnim materijalom i postepeno vadi.

Međusobno rastojanje i broj redova bunara zavise od lokalnih uslova i teško ih je unapred odrediti. Stoga se bunari najpre izvode na većim me|usobnim rastojanjima, a zatim se, po

potrebi, mreža bunara progušćuje dok se ne obori pritisak na povlatni sloj, tako da nema pojave novih izvora. Samoizlivne šljunčane bunare izvodi specijalizovana ekipa. Oticanje vode iz bunara se obezbeđuje improvizovanom plitkom kanalskom mrežom do najbližeg recipijenta.

Cilj ove mere je da se vodi, koja se nalazi pod pritiskom u donjem vodonosnom sloju ispod povlatnog sloja, omogući kontrolisani izlaz, čime se istovremeno i snižava pritisak na povlatni sloj.

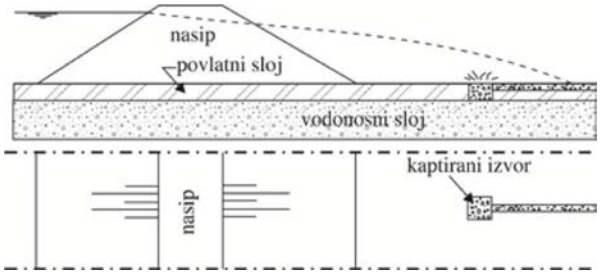


Slika 16.35: Šljunčani bunari [60]

Ove mere se češće koriste za sanaciju slabih mesta duž odbrambenih linija, nakon prolaska poplavnog talasa.

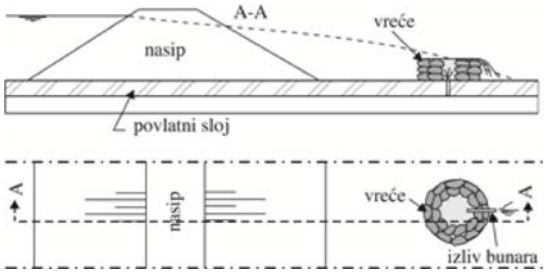
Ako se u tlu sa branjene strane nasipa pojavljuju izvori, a nema uslova za izradu balasta ili veštačko sniženje pritiska, pribegava se kaptaži izvora. Cilj ove mere je da se spreči iznošenje materijala iz povlatnog sloja, a zatim i iz vodonosnog sloja, što bi dovelo do stvaranja kratera.

Kaptaža izvora ima za cilj da se spreči iznošenje materijala iz povlatnog sloja, a zatim i iz vodonosnog sloja, što bi dovelo do stvaranja kratera. U lakšim slučajevima, pre nego što počne iznošenje materijala, dovoljno je zonu izvora otkopati i ispuniti šljunkom ili nekim drugim drenažnim materijalom (slika 16.36).



Slika 16.36: Kaptaža izvora sa branjene strane nasipa [60]

Ako se pojavljuju znaci iznošenja materijala, zonu izvora treba okružiti zidom od vreća napunjenih zemljom ("bunar"), čime se podiže nivo vode na izlivu i tako smanjuje izlazni gradijent (slika 16.37). "Bunar" se podiže do visine koja može da obezbedi nivo vode potreban da se onemogući iznošenje materijala (podizanje se zaustavlja kada se konstatuje isticanje čiste vode). U težim slučajevima, kada samo izdizanje nivoa vode u bunaru nije dovoljno da zaustavi iznošenje materijala, unutrašnjost "bunara" treba ispuniti šljunkom ili nekim drugim drenažnim materijalom. Voda iz "bunara" se izliva preko improvizovanog preliva u improvizovanu kanalsku mrežu i odvodi do najbližeg recipijenta.



Slika 16.37: "Bunar" na branjenoj strani nasipa [60]

16.3.7 Negativne pojave u zoni objekata u telu nasipa

16.3.7.1 Objekti i njihov uticaj na nasipe

Objekti u telu nasipa su uvek potencijalno slaba mesta, čak i kada se grade i održavaju u skladu sa vodoprivrednim uslovima. Po našim zakonskim propisima, o objektima u telu nasipa se staraju njihovi vlasnici, koji najčešće nemaju odgovarajući stručni kadar ni interes za to. Zbog toga objekti u telu nasipa moraju biti predmet posebne pažnje službe za odbranu od poplava, kako u periodu pre, tako i u periodu odbrane, kada se vrše osmatranja i preduzimaju interventni radovi ili mere u slučaju potrebe. U dosadašnjoj praksi zabeleženo je više slučajeva prodora nasipa u zoni objekata i bezbroj odbrana sa veoma teškim interventnim merama.

Objekti na nasipima su najčešće ustave, crpne stanice (vodozahvatne i vodoispusne) i drugi objekti, koji se ukrštaju sa nasipskom linijom (naftovodi, gasovodi, vodovodi i sl.) ili vode u neposrednoj blizini nasipa (putevi, pruge). U tabeli 16. 3 dat je pregled mogućih uticaja radova i objekata u blizini nasipa na integritet objekta.

Tabela 16.3: Nepovoljni uticaji objekata na nasipe [78]

Tip objekta/radova	Mogući negativni uticaji /Potrebne mere
Objekti i radovi na samom nasipu	
Iskop	Nestabilnost kosina nasipa
Uklanjanje materijala iz tela ili podloge nasipa, ili bilo gde u zoni uticaja	Rušenje nasipa ili zaštitnog zida
Usmereno bušenje	Oštećenje nepropusnih delova nasipa može da prouzrokuje ozbiljno proviranje vode. Potrebna je velika pažnja i praćenje tokom procesa bušenja.
Cevi koje prolaze kroz telo nasipa	Isto
Sniženje krune nasipa na mestima prelaza puteva i pruga	Potrebne su posebne mere tokom odbrane od poplava
Objekti koji mogu izazvati hidrauličke ili hidrostatičke uticaje na nasip	
Prelazi puteva i pruga, komunalne infrastrukture, zgrade, stubovi mostova, pristani	Svi ovi objekti menjaju strujnu sliku pri protocima koji su van punog korita. Ukoliko je strujna slika nepovoljna, može izazvati eroziju nasipa i njegovo rušenje pri nižim protocima od onih koji su bili merodavni za projekat nasipa. Potrebno je da se još u fazi planiranja objekata ispita njihov uticaj na nasip i predvide mere zaštite.
Mostovi	Mostovi nedovoljne visine zadržavaju plivajući nanos i izazivaju uspor, što ugrožava nasip
Bilo koji radovi u koritu za veliku vodu tokom prolaska poplavnog talasa	Smanjuju proticajni profil i ugrožavaju funkcije nasipa. Ugroženi su izvršioci radova i mehanizacija
Pristani	Smanjuju propusnu sposobnost vodotoka. Mogu da ugroze nasip ako ga probiju.
Bazeni, bunari, bušotine, kanali za navodnjavanje uz branjenu nožicu nasipa	Mogu da povećaju hidraulički gradijent, što dopunski ugrožava nasip
Nekontrolisani ili nedovoljno kontrolisani nivoi podzemnih voda	Usled hidrostatičkog pritiska i proceđivanja, smanjuje se stabilnost nasipa i temeljnog tla

16.3.7.2 Negativne pojave i mere u zonama ustava i crpnih stanica

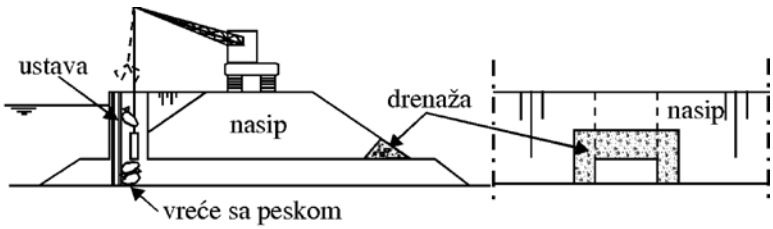
Najčešće negativne pojave u zonama ustava i crpnih stanica u telu nasipa su:

- Neispravnost mehanizama za zatvaranje, tako da se ustave ne mogu na vreme zatvoriti. Mogući uzrok je i zaglavljivanje stranog tela ispod zatvarača (panjevi i sl.);

- Dotrajalost glavnih zatvarača, uz nedostatak ili neispravnost pomoćnih zatvarača;
- Pojava kontaktne filtracije sa iznošenjem materijala, praćena deformacijama,
- Erozija slapišta na izlivima gravitacionih ustava ili potisnih cevovoda crpnih stanica. Ako su slapišta blizu nožice nasipa, što je najčešći slučaj, progresivna erozija dovodi do klizanja nasipa, a zatim i do prodora,
- Pojava izvora u dnu i na kosinama dovodnog kanala do ustave ili crpne stanice, sa branjene strane nasipa. Ako izvore prati i iznošenje materijala, proces je progresivan, tako da može doći do prodora.

U slučaju da su zatvarači na ustavama neispravni, tako da se ne mogu zatvoriti, pristupa se prinudnom zatvaranju, pre nailaska poplavnog talasa. Najjednostavniji način je da se postave pomoćni zatvarači, koji su obavezni po vodoprivrednim uslovima za izgradnju objekta. Međutim, ukoliko pomoćnih zatvarača nema ili postoji neka smetnja da se oni postave, prinudno zatvaranje se vrši na improvizovan način.

Ako je u pitanju kvar na mehanizmu za dizanje, treba pokušati da se zatvarač odvoji od mehanizma i spusti sam, a popravka mehanizma se ostavlja za period posle prolaska poplavnog talasa. U slučaju da to ne može da se izvede (zbog zaglavljivanja, prisustva stranih predmeta i sl.), zatvaranje se vrši pomoću nabačaja od vreća napunjenih peskom (slika 16.38). Ako je otvor na ustavi suviše veliki, tako da voda pronosi vreće, treba najpre preko otvora postaviti neke prepreke kao što su table, stubovi i sl.



Slika 16.38: Prinudno zatvaranje ustave napunjenim vrećama i zaštita od kontaktne filtracije izvođenjem drenaže [60]

Kada se pojave znaci **kontaktne filtracije** u zoni objekta na nasipu, a pogotovo ako dođe i do iznošenja materijala, mora se intervenisati. Cilj intervencije je da se spreči iznošenje materijala iz nasipa, jer je proces progresivan i može doći do prodora.

Jedan od načina zaštite je zatvaranje ulaza vode na nebranjenoj strani (izradom ekrana od plastične folije, nabačaja od napunjenih vreća ili prostim kipovanjem zemljanog materijala u vodu oko objekta). Drugi način intervencije je izrada drenaže na nizvodnoj strani ili kaptaža izvora.

Kod starih crpnih stanica sa nisko položenim potisnim cevovodima voda curi zbog vibracija, kad pumpe rade. U tom slučaju je ponekad dovoljno obustaviti rad pumpnih agregata.

U dovodnom kanalu ustave ili crpne stanice pojavljuju se izvori kada dođe do prekoračenja kritične vrednosti izlaznih gradijenata. Moguća su dva načina intervencije:

- Smanjenje izlaznih gradijenata, podizanjem nivoa vode u kanalu. To se postiže izvođenjem pregrade na dovodnom kanalu. Na pregradi treba improvizovati preliv, jer bi nekontrolisano prelivanje vode moglo porušiti pregradu. Kad je potrebno značajno povišenje nivoa vode, mogu se praviti dve, pa čak i više stepenasto poređanih pregrada, koje formiraju bazene sa različitim nivoima vode. Na kanalima

manjih dimenzija pregrade mogu biti od vreća, a na većim kanalima mehanizacijom se izvode zemljane pregrade (slika 16.35);

- Polaganjem šljunka ili nekog drugog drenažnog materijala po dnu dovodnog kanala, čime se sprečava iznošenje materijala.

Slika 16.39: Pregrade na dovodnom kanalu crpne stanice Čevrntija, 2014. (Izvor: JVP Srbijavode)

Moguća je i kombinacija navedenih mera. Podrazumeva se da crpne stanice za odvodnjavanje u toku odbrane od poplava prekidaju rad.

Ako dođe do erozije slapišta kod izliva ustave ili potisnih cevovoda crpne stanice, prva mera je prekid rada crpne stanice. Ukoliko je slapište blizu odbrambenog nasipa, mora se intervenisati izradom nabačaja od kamena ili vreća da bi se sprečilo klizanje nasipa i rušenje objekta.

16.3.8 Zaštita gradilišta na odbrambenim nasipima

Za vreme izvođenja radova na odbrambenim linijama po pravilu dolazi do privremenog smanjenja njihove zaštitne sposobnosti. Razlikuju se dva slučaja:

a) Radovi se izvode na dužem potezu odbrambenog nasipa, obično u okviru rekonstrukcije (pojačanja i nadvišenja). U procesu rada neminovno dolazi do slabljenja tela nasipa u jednom vremenskom periodu (skinut humus sa branjene kosine i tla na branjenoj strani nasipa, privremeno oslabljeno telo nasipa, onemogućen saobraćaj po nasipu i sl.), kada je njegova funkcija bitno umanjena;

b) Radovi se izvode na jednom lokalitetu u samom telu nasipa, gde je prekinut kontinuitet odbrambene linije ili oslabljeno telo nasipa.

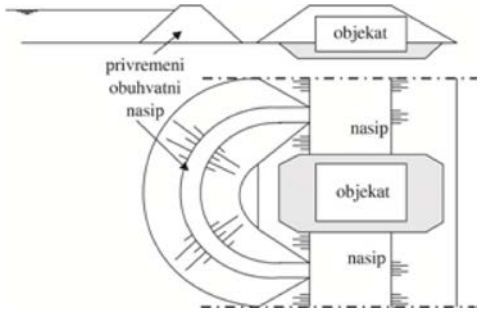
Najbolja zaštita je dobro planiranje i pridržavanje dinamike radova. Uobičajeno je da se radovi planiraju tako da se na jednoj deonici nasipa započnu i završe u jednoj građevinskoj sezoni, što podrazumeva početak rada posle prolaska prolećnih velikih voda i završetak pre zime. Takođe, pravilo je da se u vreme rekonstrukcije jedne deonice nasipa ne započinju i radovi na drugim deonicama.

Ukoliko naiđe velika voda, a nasip nije funkcionalan, preduzimaju se izuzetno obimne mere na njegovom ojačanju. Na slikama 16.40 i 16.41 su data dva primera iz najnovijih odbrana od poplava, na Dunavu i Savi.

Slika 16.40: Radovi na ojačanju dunavskog nasipa u Mađarskoj, 2013. [213]

Slika 16.41: Radovi na ojačanju savskog nasipa u Mačvi, 2014. (Izvor: JVP Srbijavode)

Zaštita lokalnih gradilišta objekata na nasipu najčešće se postiže privremenim obuhvatnim nasipom ispred gradilišta (slika 16.42), koji može imati i nešto niži stepen zaštite, pod uslovom da se u slučaju potrebe može intervenisati u cilju njegovog povišenja i ojačanja. Ako nema prostora za obuhvatni nasip, može se primeniti zagat od čeličnih talpi i slično.



Slika 16.42: Zaštita gradilišta izradom privremenog obuhvatnog nasipa ispred odbrambene linije [60]

Kao zaštitna mera u toku odbrane od poplava primenjuje se i privremeno potapanje građevinske jame, u cilju smanjenja izlaznih gradijenata. U tom slučaju se radovi na gradilištu moraju prekinuti. U zonama lokalnih gradilišta se primenjuju i druge vrste intervencija, kao što je izrada zavesa ili sistema iglofiltera.

16.4 Vanredne mere

Ukoliko se u toku trajanja poplavnog talasa na pojedinim deonicama ili lokalitetima nasipa konstatuju slaba mesta i oštećenja, njihova se sanacija, odgovarajućim intervencijama manjeg ili većeg obima, mora sprovesti u okviru operativne odbrane od poplava.

Na bazi permanentnog praćenja stanja nasipa i hidroloških prognoza o razvoju poplavnog talasa, može se dati procena sigurnosti nasipa s obzirom na različite uticaje. Sa određenom sigurnošću se može predvideti nastanak kritičnog stanja, usled nekog nepovoljnog uticaja, na određenom lokalitetu i po vremenu. Na bazi identifikovanog merodavnog uticaja, koji ugrožava stabilnost nasipa, projektuju se sanacione mere, koje treba izvršiti u određenom roku.

Kako se u slučaju izostanka ili neadekvatne primene mera operativne odbrane od poplava na kritičnom lokalitetu mogu očekivati plavljenje i ogromne štete u branjenom području, za sanaciju uočenog slabog mesta na nasipu - potencijalnog mesta proboja ulažu se veliki napori, bez obzira na troškove.

Međutim, proboj nasipa se ponekad ne može sprečiti, bez obzira na preduzete mere. U tom slučaju se preduzimaju, najpre, radovi na sprečavanju širenja i eventualnom zatvaranju breše. Ukoliko ovakav pokušaj ne uspe, započinje formiranje lokalizacione linije i organizacija odbrane na njoj. Po prolasku poplavnog talasa neophodno je omogućiti evakuaciju vode iz poplavljenog područja i, na kraju, izvršiti sanaciju proboja i ispusta na odbrambenom nasipu.

Slika 16.43: Prelivanje nasipa u BiH, 2014. (Izvor: Savska komisija)

Slika 16.44: Proboj nasipa u Hrvatskoj, 2014. (Izvor: Savska komisija)

16.4.1 Zatvaranje proboja nasipa

Zatvaranje proboja nasipa je izuzetno teška operacija, koja je u dosadašnjim odbranama od poplava više puta bezuspešno pokušavana. Naime, na mestu proboja nasipa, usled velike denivelacije, nastaje burno tečenje vode, koje izaziva brzu i snažnu eroziju samog nasipa i okolnog tla. Međutim, razvoj opreme i tehnologije danas omogućuje ograničavanje erozije na mestu proboja, pa i zatvaranje manjih proboja nasipa (koje se preduzima ukoliko vodostaji u reci imaju tendenciju opadanja).

Zatvaranje proboja nasipa je veoma složen posao, te se stoga izvodi samo ako je ugroženo veliko područje i ukoliko je odbrana dugotrajna. Ukoliko je branjeno područje manje, izvode sa samo radovi na ograničavanju širenja proboja. Ograničavanje širenja proboja nasipa je izuzetno značajno, jer se na taj način smanjuje doticanje vode u poplavljeno područje i produžava vreme punjenja basena. Ograničenje širine proboja se postiže osiguranjem bokova i dna na mestu proboja. Za osiguranje bokova nasipa se koriste:

- Kameni nabačaj ili vreće punjene peskom;
- Oplata koja se postavlja na bokovima proboja (tako da obuhvati tri strane) i ankeruje u zdrav deo nasipa;
- Šipovi koji se pobijaju jedan uz drugog. Šipovi i oplata se moraju zaštititi od podlokavanja, tako što se uz nožice sa prednje i zadnje strane postavljaju fašine, punjene vreće ili kamen.
- Za osiguranje dna se koriste lomljeni kamen, punjene vreće ili rolirani tepisi od lomljenog kamena u žičanom povezu.

Mali proboji (širine 10-15 m) se, ukoliko dubina vode ne prelazi 0,6 do 1,5 m, mogu zatvoriti na jedan od sledećih načina:

- Pobijanjem oplate od bokova ka sredini proboja. Uz oplatu se odmah postavlja kamen, fašine ili vreće punjene peskom ili zemljom;
- Bacanjem međusobno povezanih punjenih vreća, od kojih se stvara pregrada preko koje se zatim nasipa materijal;
- Potapanjem opterećenih fašinskih madraca, tonjača, manjih plovnih objekata opterećenih kamenom i slično.

Zatvaranje većih proboja nasipa (širine veće od 15 m, a pri dubinama vode većim od 2,0 m) je znatno teže, jer se svaki proboj veoma brzo širi. U ovom slučaju je moguće intervenisati samo sa vode, izgradnjom kružnog (obuhvatnog nasipa) oko mesta proboja, sa prečnikom koji je najmanje 3 puta veći od širine proboja.

Veštački proboj nasipa u cilju punjenja "nužne" retenzije se izaziva miniranjem nasipa ili prosecanjem pomoću bagera, tako da dođe do prelivanja nasipa i daljeg spontanog rušenja.

16.4.2 Izgradnja lokalizacionih nasipa

Izgradnja lokalizacionih nasipa je neophodna u slučaju proboja prve odbrambene linije. Radi se po unapred pripremljenoj tehničkoj dokumentaciji, u kojoj su definisani trasa i gabariti nasipa.

Lokalizaciona linija se gradi u vanrednim uslovima, uz uključenje svih raspoloživih građevinskih kapaciteta, mehanizacije, ljudstva i opreme, kao i civilne zaštite i stanovništva

iz ugroženog područja. Izgradnju lokalizacione linije treba da vodi više stručnjaka građevinske struke, koji se angažuju na podjednakim deonicama nasipa, kako bi njihova izgradnja tekla istovremeno.

Rad na izgradnji lokalizacionog nasipa se odvija u sledećim fazama:

- utvrđivanje trase i prenošenje kota sa mreže na teren,
- obeležavanje širine stope nasipa i čišćenje površine,
- fundiranje i izgradnja nasipa.

Tip i način izvođenja nasipa sekundarne odbrambene linije zavise od dužine raspoloživog vremena, terenskih uslova, kao i sredstava, materijala i opreme kojima služba i drugi učesnici u odbrani od poplava raspolažu. Za izvođenje se, zavisno od tipa profila, primenjuje mehanizacija, ljudska radna snaga ili kombinovano.

Najčešće se izvode zemljani nasipi. S obzirom na obim radova i ograničen rok izgradnje, ovaj tip nasipa je najbolje izvoditi uz pomoć mehanizacije. To je moguće samo u slučajevima kada terenski uslovi omogućavaju pristup mehanizaciji, dok je na nepristupačnijim delovima terena neophodno angažovanje velikog broja radnika za izvođenje nasipa.

S obzirom na to da i lokalizacioni nasipi treba da zadovolje osnovne parametre sigurnosti, za njihovo izvođenje se koristi materijal prašinasto-glinovitog sastava, pogodne vlažnosti. Najpovoljniji slučaj je da u blizini nasipa postoji pozajmište ovakvog materijala, dok se u suprotnom on mora dovoziti sa strane.

Najkvalitetniji način izvođenja je nasipanjem materijala “s čela”, po celoj širini krune, jer se tada transportna mehanizacija sa punim teretom kreće po već nasutom materijalu i time istovremeno vrši zbijanje materijala u nasipu.

Zbog kratkoće vremena i drugih nepovoljnih uslova, u praksi se lokalizacioni nasipi najčešće grade od zemljanog materijala iskopanog sa lica mesta, u nebranjenom delu terena. Materijal se, zatim, poprečnim transportom - uz pomoć buldozera gura i oblikuje u nasip. Samo u slučaju da nema prostora za pozajmište ili kvalitet materijala ne odgovara, potrebno je obezbediti njegov dovoz sa pozajmišta odgovarajućom transportnom mehanizacijom.

Drugi način za izvođenje nasipa sekundarne odbrambene linije je od vreća punjenih peskom ili zemljanim materijalom, na deonicama kroz naseljena mesta.

Slika 16.45: Lokalizacioni nasip u Sremu, 2014. (Izvor: JVP Vode Vojvodine)

Lokalizacioni nasipi su veoma izloženi dejstvu vode jer nemaju travni pokrivač, a ponekad su, zbog žurbe, i nesolidno izgrađeni (slabo fundiranje, nabijanje zemlje i dr.). Na lokalizacionim nasipima je, stoga, potrebno organizovati intenzivnu odbranu, koja se sastoji u stalnom praćenju stanja nasipa i hitnom izvođenju radova na sanaciji uočenih nedostataka. Na lokalizacionim nasipima se najčešće javlja prokvašavanje i procurivanje, koje se sanira dreniranjem, postavljanjem filtarskih materijala ili proširenjem tela nasipa. Za to se masovno koristi ljudska radna snaga.

Sledeći problem, koji se često javlja usled nepostojanja travnatog pokrivača na novoizgrađenom nasipu, je raskvašavanje i površinska erozija od kiše. Sanacija se postiže zemljanim materijalom, džakovima i filtarskim materijalom, koji se ugrađuju u oslabljena mesta.

16.4.3 Evakuacija vode iz poplavljenog područja

Nivo vode u poplavljenom području se formira u zavisnosti od kote vode u reci na mestu proboja. Ukoliko je proboj nasipa nastao na uzvodnom delu duže deonice nasipa, nivo jezera na nizvodnom delu poplavljenog sektora može biti znatno viši od nivoa vode u reci. Tada je nužno na nizvodnom delu minirati nasip i tako ispustiti vodu iz zaliva, čime se postiže sniženje nivoa vode u jezeru i rasterećenje lokalizacione linije. Ako je proboj nasipa nastao na nizvodnom delu deonice nasipa, nema nepoželjne denivelacije između nivoa u zalivu i u reci, tako da otvaranje nasipa nije potrebno.

Po prolasku talasa velikih voda, za evakuaciju voda iz niskih delova poplavljenog područja se koriste postojeći sistemi za odvodnjavanje ili se nasip otvara na najnižem delu terena, kako bi voda gravitacijom otekla u reku (slika 16.46).

Slika 16.46: Ispuštanje vode iz poplavljenog područja (Izvor: JVP Vode Vojvodine)

Potreban presek za isticanje vode iz branjenog područja se određuje na osnovu procene doticaja kroz aktivan proboj ili proračunom, za određenu zapreminu vode u zalivu i određeno vreme koje je usvojeno kao rok za sanaciju poplavljenog područja. Kada je određen potreban presek na mestu isticanja, na osnovu denivelacije nivoa vode u reci i jezeru se određuje dužina na kojoj treba otvoriti (minirati) nasip. Za ovu dužinu se određuju potrebna eksplozivna punjenja, njihov razmak, dubina ukopavanja, obim radova, potrebno ljudstvo i dr.

16.4.4 Sanacija proboja i ispusta

Kontinualna odbrambena linija se, nakon prolaska poplavnog talasa i ispuštanja vode iz poplavljenog područja, uspostavlja ponovnim zatvaranjem otvora u nasipu (proboja i ispusta). U sklopu zatvaranja nasipske linije potrebno je izvršti i sanaciju erozije tla oko nasipa, koja je nastala pri prelivanju nasipa ili pri ispuštanju vode iz poplavljenog područja. Posebna pažnja u ovim radovima se posvećuje ostvarenju veze postojećeg nasipa uzvodno i nizvodno od proboja sa novim delom nasipa (slika 16.47).

Slika 16.47: Sanacija proboja nasipa: gore – nasip pre sanacije, dole – saniran nasip (Izvor: JVP Beogradvode)

17 KONTROLA LEDA

Hidrogrami u zimskom periodu imaju karakterističan tok. Sa opadanjem temperature vazduha, na početku zime, smanjuje se i dotok sa sliva, tako da protoci opadaju do malih voda. U periodu niskih temperatura vazduha i ledenih pojava, protoci obično stagniraju. U proleće, nagli porast temperature vazduha praćen je topljenjem snega i povećanjem dotoka sa sliva. Zbog toga se na rekama javlja prolećni talas velikih voda, uporedo sa pokretanjem leda i prolećnim ledohodom. Generalno se može reći da ledene pojave počinju u opadajućoj grani jesenjeg talasa, a završavaju se u rastućoj grani prolećnog talasa velikih voda.

U jakim zimama se najpre javlja tzv. "jesenji" priobalni led i ledohod, zatim se ledostaj, a sa porastom temperatura na početku proleća tzv. "prolećni" ledohod. Ovaj period je najopasniji jer može doći do zastoja leda u krivinama, kod mostova ili na plitkim deonicama. Ukoliko se led na kritičnim deonicama nagomila, stvarajući ledeni čep ili barijeru (slika 17.1), može doći do "ledene" poplave (slika 17.2).

Metode kontrole režima leda mogu se svrstati u dve osnovne kategorije: (a) preventivne mere i (b) operativne metode.

Slika 17.1: Ledena barijera
(Izvor: arhiva IJČ)

Slika 17.2: Ledena poplava
(Izvor: arhiva IJČ)

17.1 Preventivne mere kontrole leda

Osnovna preventivna mera odbrane od leda sastoji se u obezbeđenju kontinuiteta transporta leda duž vodotoka. Ovo se može postići uređenjem korita vodotoka, u cilju poboljšanja hidrauličko-morfoloških faktora režima leda (ujednačavanja propusne moći korita za ledohod, ublažavanja oštrih krivina toka, uklanjanja prirodnih i veštačkih prepreka iz glavnog korita i inundacija, itd.), kao i izgradnjom specifičnih objekata za kontrolu režima leda (za zadržavanje ili usmeravanje leda u pokretu, evakuaciju leda i dr.).

Hidraulički i morfološki uslovi vodotoka, uz klimatske parametre, predstavljaju osnovne faktore režima leda na vodotoku. Od hidrauličko-morfoloških parametara vodotoka od posebnog su značaja srednja brzina toka (V) i širina (B). Na osnovu analize dinamike i kontinuiteta kretanja ledenih formacija na vodotoku, definisan je i specifičan parametar režima leda - propusna moć rečnog korita za ledohod (V·B). Na osnovu dijagrama varijacije ovog parametra duž vodotoka pri određenom protoku, mogu se determinisati kritične zone sa aspekta režima leda. Minimalne vrednosti parametara (V·B) ukazuju na "uska grla" za tranzit leda.

Faktor (V·B) ne obuhvata uticaj zakrivljenosti trase rečnog korita. S druge strane, u praksi je poznato da oštre krivine rečnog toka predstavljaju vrlo nepovoljne lokacije sa aspekta režima leda.

Na deonicama koje imaju nepovoljne hidrauličko-morfološke uslove za kretanje leda preduzimaju se regulacioni radovi. To zahteva dosta visoke investicije, ali zato daje dugoročna i pouzdana rešenja problema leda. Kada je u pitanju uređenje vodotoka, treba istaći da je u većini slučajeva ono diktirano ne samo potrebama odbrane od leda, već i drugim razlozima (povećanje propusne moći korita za vodu i nanos, poboljšanje plovidbenih uslova itd.). Prema tome, ukoliko se uređenjem vodotoka ostvaruju višestruki ciljevi, onda će i kontrola i poboljšanje režima leda, sigurno biti racionalni i ekonomski opravdani.

17.2 Operativne metode kontrole leda

Operativne metode odbrane od leda [35] mogu biti:

- **Termičke metode** - obuhvataju i odnose se, uglavnom, na sprečavanje ili smanjenje hlađenja vode i slabljenje čvrstine ledene kore, povećanjem efekta sunčane radijacije (posipanjem leda tamnim prahom).
- **Mehaničke metode** - obuhvataju rušenje i lomljenje leda ledolomcima, sečenje leda specijalnim uređajima, kao i miniranje ledenih formacija.

Pored napred pomenutih, na vodotocima sa izgrađenim branama i ustavama, u odbrani od leda primenjuje se uslovno nazvana "hidraulička metoda", koja se sastoji u prilagođavanju režima uspora uslovima u vodotoku.

17.2.1 Primena ledolomaca

Najpoznatija mehanička metoda odbrane od leda sastoji se u primeni specijalno konstruisanih plovila - ledolomaca. Osnovni zadaci ledolomaca tokom sprovođenja odbrane od leda su sledeći:

- U primarnom (jesenjem) ledohodu obezbeđuju kontinuitet pronosa leda duž vodotoka. Pritom redovno patroliraju na svojoj deonici u cilju eliminisanja početnih zastoja leda i otklanjanju preduslova za formiranje ledenih barijera, uz nastojanje da se formiranje ledostaja koliko god je moguće duže odgodi;
- U periodu neminovnog zaustavljanja leda sprečavaju veća nagomilavanja i nastoje da se ledeni pokrivač ravnomerno rasporedi duž vodotoka;
- U toku formiranog ledostaja otvaraju i održavaju koridor širine 30 do 40 metara, radi komuniciranja i obezbeđenja povoljnih uslova za ravnomerno pokretanje leda pri sekundarnom ledohodu;
- U fazi sekundarnog (prolećnog) ledohoda sprečavaju nagomilavanje leda i ruše ledene barijere, u cilju obezbeđenja kontinuiteta protoka leda duž vodotoka.

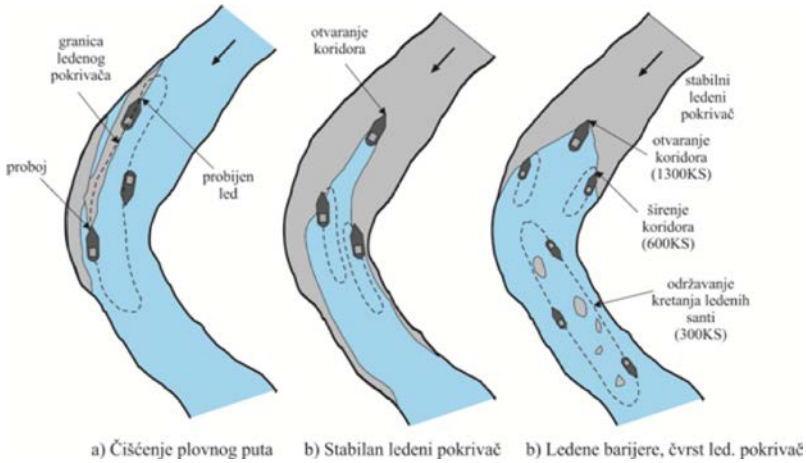
Dejstvo ledolomaca može biti dvostruko - statičko i dinamičko. Statičko dejstvo je direktnim pritiskom i naslanjanjem ledolomaca na ledenu koru, dok dinamičko dejstvo obuhvata i silu inercije kretanja ledolomaca. Konsekventno tome, statički efekat ledolomaca determiniše najveća debljina ledene kore koju može da slomi, a dinamički efekat se izražava odnosom debljine slomljenog leda i brzine ledolomaca.

Zavisno od usvojene koncepcije rada, ledolomci pri razbijanju ledene kore mogu delovati na više načina (slika 17.3):

- Ledolomac počinje kretanje od ivice ledenog pokrivača, delujući vertikalnom silom na ledenu koru. Kada ta sila pređe kritičnu vrednost, jednaku potencijalnoj energiji

rušenja leda, dolazi do prskanja i lomljenja ledene kore. U ovakvom načinu rada koristi se samo statičko dejstvo ledolomca, pa je i efekat rada najslabiji. Medutim, ovaj način, u izvesnim slučajevima (zaglavljivanje ledolomaca u ledenoj masi), može biti jedino moguć.

- Ledolomac se kreće kroz ledenu masu bez zastoja, sa promenljivom brzinom. U ovom slučaju se koristi kinetička energija ledolomca, koja se jednim delom troši na deformaciju čeone ivice ledene kore, a drugim, na uspinjanje ledolomca na površinu leda.
- Ledolomac razbija ledenu koru sa zaletom. Sila udara i dinamički pritisak ima veliko dejstvo na ledenu koru, zbog čega je ovakav način rada ledolomca najefikasniji, ukoliko su uslovi povoljni i primena ovog načina moguća (postojanje dovoljnog prostora za manipulisanje ledolomca).



Slika 17.3: Šematski prikaz kretanja ledolomaca u različitim uslovima [22]

Iako je primena ledolomaca jedna od osnovnih metoda borbe sa ledom, ona ima nekoliko nedostataka. To su: (a) relativno ograničeno kretanje ledolomaca kroz veće zaleđene zone i mogućnost njihovog zarobljavanja ledenom masom; (b) česti kvarovi i lomovi na ledolomcu, usled velikog opterećenja pri radu; (c) velike investicije za izgradnju ledolomaca; (d) relativno visoki troškovi rada i održavanja ledolomaca.

Slika 17.4: Mađarski ledolomci (Izvor: IJČ)

Slika 17.5: Ledolomac razbija led na Dunavu, 1985. (Izvor: IJČ)

Pored ledolomaca, primenjuju se i drugi mehanički uređaji za rušenje ledene kore, mašine za sečenje leda i specijalna svrdla za bušenje leda.

17.2.2 Miniranje leda

Miniranje leda je druga značajna mehanička metoda odbrane od leda. Za miniranje se upotrebljava više vrsta eksploziva (trotil, dinamit, amonit). Eksplozivna punjenja mogu biti postavljena na površini leda, u ledenoj kori i ispod ledene kore, ali najbolji efekat ima ukoliko je postavljen ispod ledene kore.

Raspored eksplozivnih punjenja, dubina postavljanja, međusobno rastojanje i ukupna količina eksploziva zavise od debljine i stanja leda i usvojene koncepcije rada. Pri rušenju barijera se obično koriste veće količine punjenja koje se, prema mogućnosti, postavljaju u zoni matice vodotoka. Da bi se obezbedili uslovi za normalan protok leda, potrebno je otvoriti koridor po matici reke u širini od 1/4 do 1/3 ukupne širine minor korita.

Miniranje formiranih ledenih barijera spada u najdelikatnije i najopasnije zadatke, zbog čega su neophodne posebne mere obezbeđenja izvršilaca. Pritom je neophodno da sektor nizvodno od barijere bude slobodan za oticanje leda.

Ponekad se miniranje primenjuje i pri ledohodu u cilju usitnjavanja velikih ledenih santi, kada preti opasnost od njihovog zaustavljanja u koritu ili ako ugrožavaju neki objekat u vodotoku. Tada se manja eksplozivna punjenja bacaju sa obale, što zahteva dobro obučene i iskusne izvršioce.

17.2.3 Ostale metode kontrole leda

Hemijska sredstva takođe imaju značajnu primenu u odbrani od leda. Od materija koje se upotrebljavaju za topljenje leda treba pomenuti $KHCO_3$ i NaF. Jedan gram $KHCO_3$ može da istopi 59 grama leda, a gram NaF topi 33 grama leda, na temperaturi od 5°C. Metod posipanja leda tamnim prahom dosta je tretiran u literaturi. U te svrhe najviše se upotrebljavaju pepeo i čađ, šljaka i zemlja.

Upoređenje efikasnosti pojedinih metoda da prikazano je u tabeli 17.1.

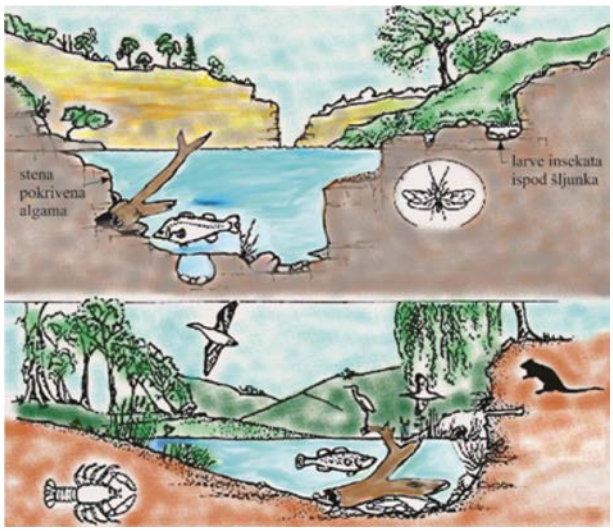
Tabela 17.1: Upoređenje efikasnosti metoda odbrane od leda

Metoda	Indeks efikasnosti
Mehanička	100
Razdvajanje ledenog polja na više manjih “ostrva”	50
Zagrevanje električnom strujom	200
Hemijska	200
Vazdušni mlazevi	50

18 UREĐENJE VODOTOKA U SVETLU ZAŠTITE KVALITETA VODA

18.1 Kvalitet rečne vode

Kvalitet rečne vode obuhvata brojne hemijske, fizičke i biološke parametre. **Hemijski parametri** kvaliteta vode su tvrdoća, alkalnost, pH, sadržaj nutrijenata (azot, fosfor), metala (bakar, cink, olovo, kadmijum) i rastvorenih materija, toksičnost, boja itd. **Fizički parametri** kvaliteta su temperatura vazduha i vode, svetlost, sadržaj suspendovanih čestica, a **biološki** su mikro i makro organizmi u vodi i na obalama.



Slika 18.1: Ekosistem reke sa stenovitim dnom (gore) i aluvijalnim dnom (dole)

Biljni i životinjski svet u rečnom ekosistemu (slika 18.1) čine: alge, više biljke (pričvršćene za dno ili plivajuće), drveće i žbunje na obalama, mikroorganizmi, beskičmenjaci, ribe i drugi kičmenjaci.

Na veoma osetljiv ekosistem vodotoka utiču brojni činioci: brzina rečnog toka, svojstva materijala na dnu (sastav i krupnoća), temperatura vode, sadržaj kiseonika, osvetljenost toka, pH vode, erozija dna i obala.

Ekosistemi se razlikuju, zavisno od veličine vodotoka, geografskog položaja, visinskog položaja (planinske i ravničarske reke), podloge i drugih parametara. Generalno, ekosistemi malih vodotoka (slika 18.3) su znatno više osetljivi na spoljne uticaje od ekosistema velikih reka (slika 18.2).

Sa aspekta uređenja vodotoka, važno je **ne poremetiti stabilnost ekosistema hidrotehničkim merama** odnosno neophodne intervencije zadržati u okvirima koji neće dovesti do poremećaja. Generalno, regulacione mere ne utiču na hemijske i fizičke parametre rečne vode, ali mogu znatno uticati na biljni i životinjski svet.

U projektima uređenja vodotoka je poželjno održati raznovrsnost hidrauličkih i morfoloških elemenata rečnog toka, koja se inače sreće u prirodnom vodotoku, tako što će se projektovati korito krivudave trase, promenljivih poprečnih profila, promenljivog podužnog nagiba dna, sa smenjivanjem plitkih i dubokih zona, promenljivim režimom tečenja i obalama obraslim vegetacijom. Ovi principi se koriste u projektima "naturalne" regulacije.

Slika 18.2: Ekosistem velike reke (Izvor: IJČ)

Slika 18.3: Ekosistem male reke (Izvor: envis.praha-mesto.cz)

18.2 Hidromorfološke promene

U dosadašnjoj praksi upravljanja vodama se ocena kvaliteta vode u vodotocima vršila samo na osnovu fizičko-hemijskih i bioloških parametara. U novije vreme se u evropskim zemljama upravljanje vodama uređuje na osnovu principa definisanih u Okvirnoj direktivi o vodama (ODV), koja kvalitet površinskih voda određuje na osnovu ocene njegovog hemijskog i ekološkog statusa. Pritom je "ekološki status" iskaz o kvalitetu strukture i funkcionisanja vodenih ekosistema u površinskim vodama. Klasifikacija ekološkog statusa se zasniva na tri grupe pokazatelja: biološki elementi (sastav i bogatstvo akvatične flore i faune), hidromorfološki elementi (hidrološki režim, kontinuiranost rečnog toka i morfološki uslovi), hemijski i fizičko-hemijski elementi, kao i specifični polutanti.

U ODV su definisani hidromorfološki elementi kvaliteta koji odgovaraju odličnom statusu površinske vode. To su uslovi koji su postojali u vodotoku u prirodnom, neporemećenom stanju, pre bilo kakvih ljudskih uticaja.

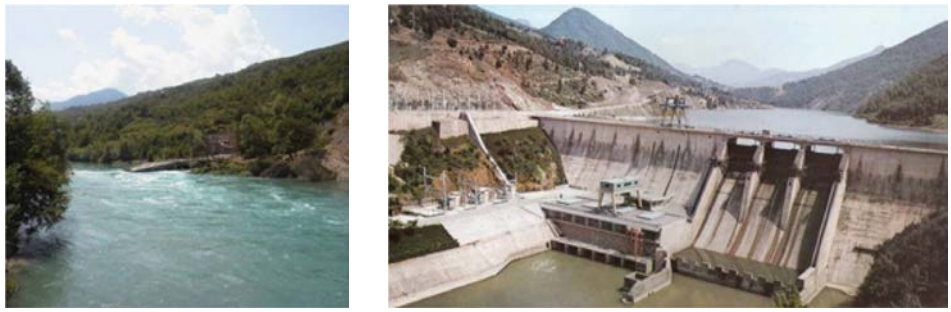
Tabela 18.1: Hidromorfološki elementi kvaliteta vode prema ODV [8]

Element	Odličan status	Dobar status	Umeren status
Hidrološki režim	Količina vode i dinamika toka, kao i povezanost s podzemnim vodama, potpuno ili gotovo potpuno odražavaju neporemećeno stanje	Male promene	Umerene promene
Kontinuitet rečnog toka	Kontinuitet rečnog toka nije narušen antropogenim aktivnostima i dozvoljava neporemećenu migraciju akvatičnih organizama i pronos nanosa	Male promene	Umerene promene
Morfološki uslovi	Oblici korita, varijacije širine i dubine, brzina toka, stanje rečnog dna, kao i struktura i stanje priobalja, potpuno ili gotovo potpuno odgovaraju neporemećenim uslovima	Male promene	Umerene promene

Upoređenjem neporemećenog i sadašnjeg stanja određuju se **hidromorfološke promene**, nastale kao posledica ljudskih aktivnosti na korišćenju ili zaštiti od štetnog dejstva voda odnosno izgradnje hidrotehničkih objekata (brane, ustave, nasipi, regulacioni objekti itd.) za potrebe različitih vidova korišćenja i/ili zaštite od štetnog dejstva voda. Kako je u ODV definisana obaveza praćenja statusa voda u procesu upravljanja vodama, obavezno je i praćenje hidromorfoloških promena u domenu njihovog uticaja na stanje i kvalitet vodenih ekosistema.

Specifičnost ODV je potpuno nova kategorija "značajno izmenjenog vodnog tela" površinskih voda. U nju se svrstavaju ona vodna tela koja su, kao rezultat fizičkih izmena usled ljudske aktivnosti, izmenjena do te mere da više ne mogu dostići dobar ekološki status bez značajnih posledica po životnu sredinu i ljudske aktivnosti na održivom razvoju. Postoji obaveza da vodna tela u ovoj kategoriji dostignu dobar ekološki potencijal, koji podrazumeva izmenjene hidromorfološke parametre ali i primenu mera za poboljšanje stanja.

ODV predstavlja prekretnicu u upravljanju vodama jer zahteva multidisciplinarni pristup i uvodi u praksu nove obavezne aktivnosti. Jedna od najinteresantnijih je analiza i praćenje hidromorfoloških promena. Ova potpuno nova aktivnost je otvorila niz pitanja o tome na koji način vrednovati ove promene i upravljati njima.



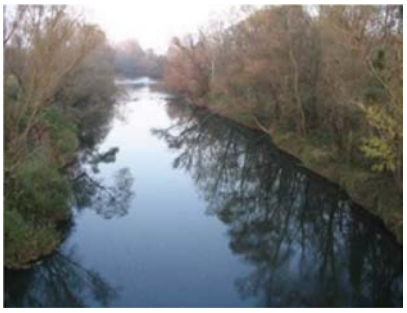
Slika 18.4: Primer vodnog tela pre i posle izgradnje brane (Izvor: hidrotehnika.rs)

Najznačajnije hidromorfološke promene na vodnim telima površinskih voda nastaju kao posledica korišćenja vode za potrebe hidroenergetike, plovidbe, vodosnabdevanja, poljoprivrede, urbanizacije i dr, kao i izgradnjom sistema zaštite od poplava [8].

Hidroenergetsko korišćenje vodotoka najčešće podrazumeva izgradnju brana i akumulisanje vode. Ovi objekti dovode do značajnih hidromorfoloških promena na vodnom telu (slika 18.4) koje kao posledicu imaju nepovoljne uticaje na ekosisteme i njihova staništa, kao što su prekid kontinuiteta vode, nanosa i kretanja riba, promena morfologije vodotoka, sastava rečnog dna, izmena karakteristika priobalja (šema na slici 18.5). Naravno, iste ili slične uticaje imaju i drugi objekti koji pregrađuju vodotoke (brane, ustave, pragovi, pregrade), a izvode se radi obezbeđenja zaštite od voda (zaštita od poplava i kontrola fluvijalne erozije), vodosnabdevanja, uslova plovidbe.

Slika 18.5: Promene na vodnim telima izazvane izgradnjom brane [8]

Izgradnja **linijskih objekta za zaštitu od voda** takođe predstavlja značajan pritisak na vodno telo. U slučaju regulacionih radova na vodotocima (slika 18.6) javljaju se određene promene hidrološkog režima i režima nanosa, morfološke promene, gubitak staništa vodenih vrsta (šema na slici 18.7). Izgradnjom nasipa se sužava rečni koridor, redukuju prirodna plavna područja i menja režim plavljenja (šema na slici 18.8).



Slika 18.6: Primer vodnog tela pre i posle regulacije za velike vode [8]

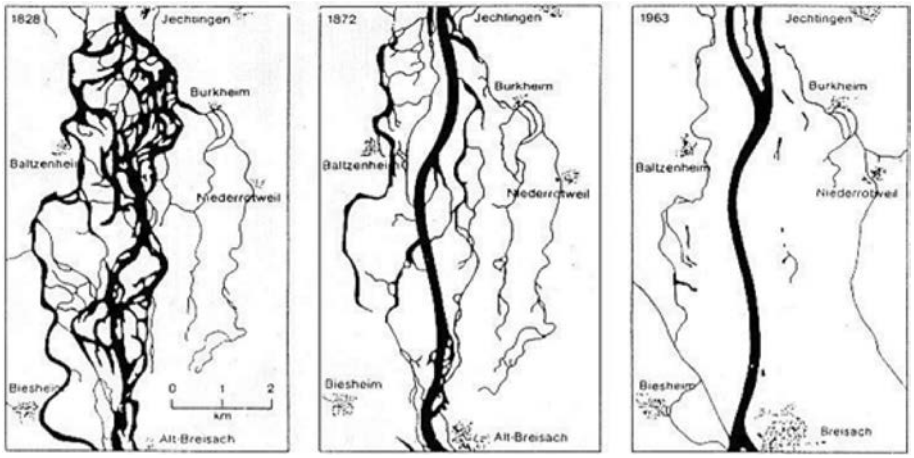
Slika 18.7: Promene na vodnim telima izazvane regulacijom vodotoka [8]

Slika 18.8: Promene na vodnim telima izazvane izgradnjom nasipa [8]

Izvođenje aktivnosti kojima se obezbeđuje plovnost vodotoka i održavanje plovnog puta takođe izaziva brojne hidromorfološke promene na vodnom telu (ujednačena morfologija,

promene režima nanosa, gubljenje kontakta reke i priobalja usled oblaganja obala). Fazno pogoršanje hidromorfoloških uslova na jednom rečnom sistemu, nastalo regulacionim radovima koji su u dužem periodu vršeni radi uspostavljanja povoljnih plovidbenih uslova ilustrovano je na slici 18.9.

U budućnosti, naročito u uslovima pridruživanja Evropskoj uniji i primeni upravljanja vodama u skladu sa principima ODV, neophodno je već u što većoj meri smanjiti nepovoljni uticaj objekata na životnu sredinu (npr. u projektu brane predvideti objekte za migraciju riba i sl.). Regulaciju vodotoka treba planirati u skladu sa principima naturalne regulacije, gde god je to moguće i u što većoj meri.



Slika 18.9: Promene na vodnim telima izazvane regulacionim radovima za potrebe plovidbe (isključenje rukavaca iz rečnog sistema i ispravljanje rečnih krivina) [8]

18.3 RAZLIKE IZMEĐU KLASIČNE I "NATURALNE" REGULACIJE VODOTOKA

U **klasičnim regulacionim radovima** od interesa su bili samo tehnički i ekonomski efekti koje treba postići. Inženjeri su analizirali samo uticaj projektovanih radova na morfološke i hidrauličke karakteristike toka i režim rečnog nanosa. Najčešće su regulacioni radovi projektovani tako da se ujednače morfološki i hidraulički uslovi duž vodotoka. Ovakvom vrstom intervencija na reci su često brzine vode povećavane iznad određene granice, uklanjanjem vegetacije smanjena osenčenost i povećana temperature vode, a smanjena je i količina biološkog otpadnog materijala koji je bitan za održanje biološkog "lanca". To je dovodilo do pogoršanja uslova života podvodne i priobalne flore i faune, smanjenja biološke raznovrsnosti i generalnog pogoršanja kvaliteta životne sredine. Takođe, prisutni su negativni hidrološko-hidraulički efekti regulacije, koji se ogledaju u povećanju maksimalnih protoka i brzine prostiranja talasa velikih voda.

Krajem osamdesetih godina javlja se koncept **"naturalne" regulacije** u kontekstu zaštite životne sredine i primene koncepta "održivog razvoja". "Naturalna" regulacija se primenjuje uglavnom na malim vodotocima, jer na njima efekti klasične regulacije mogu biti veoma nepovoljni.

Pri planiranju radova se, pored tehničkih i ekonomskih, sagledavaju ekološki, estetski i socijalni efekti regulacije. Iako se u fazi projektovanja koriste klasične metode hidrološke, hidrauličke i morfološke analize, u fazi realizacije se primenjuju ekološki i estetski principi u pogledu izbora trase, oblikovanja poprečnih profila i izbora materijala za izradu regulacionih građevina. Osnovni principi naturalne regulacije su (Đorđević i Jurak, 1992):

a) Ako je korito relativno stabilno, obim radova svesti na najmanju moguću meru;
b) Ako se bitno menja hidraulički i psamološki režim vodotoka, analizirati moguće morfološke promene;
c) Težiti očuvanju prirodne trase vodotoka, jer biološka raznovrsnost zavisi od rasporeda proloka i sprudova duž vodotoka;
d) Trasa i obim radova treba da obezbede očuvanje prirodnih biotopa;
e) Izbegavati uklanjanje velikog drveća sa obala i iz priobalja;
f) Oblik i dimenzije poprečnih profila treba da obezbede zahtevanu propusnu moć, ali i protočnost u periodu malih voda;
g) Ukoliko se prosecaju krivine, očuvati "starače" kao biološke rezervate;
h) Posebnu pažnju posvetiti odlaganju iskopanog/refulisanog materijala, i to sa aspekta količina materijala (odnos deponije i okolnog terena, uticaj na evakuaciju velikih voda) i zagađenosti materijala (konzervacija i biološka revitalizacija deponije);
i) Predvideti taložnike za plivajuće predmete, granje i druge vrste naplava;
j) Regulacione građevine izvoditi od lokalnih materijala (kamen, biološki materijali).

18.4 Radovi na poboljšanju ekološkog statusa površinskih voda

18.4.1 Renaturalizacija korita

U sklopu sprovođenja mera za poboljšanje ekološkog statusa površinskih voda, u mnogim zemljama se radi na renaturalizaciji vodotoka. To su radovi na ranije regulisanim vodotocima, koji se vrše u cilju skladnijeg uklapanja trase i građevina u ambijentalnu celinu i podizanja kvaliteta priobalja u ekološkom, rekreativnom i estetskom smislu

18.4.1.1 Mere renaturalizacije minor korita

Renaturalizacija minor korita (slike 18.10 do 18.12) ima pozitivan uticaj na podvodni i priobalni biljni i životinjski svet jer povećanje raznovrsnosti morfoloških i hidrauličkih uslova vodi povećanju biološke raznovrsnosti.

Slika 18.10: Primer renaturalizacije vodotoka – promena poprečnog profila reke Drave u Austriji (Izvor: wau.boku.ac.at)

Slika 18.11: Primer renaturalizacije vodotoka – promena poprečnog profila reke Isar kod Minhena (Izvor: restorerivers.eu)

Slika 18.12: Primer renaturalizacije vodotoka – promena poprečnog profila reke Itači, Japan (Izvor: pwri.go.jp)

18.4.1.2 Mere renaturalizacije major korita (obnavljanja plavnih područja)

Prirodni potencijali plavnih područja značajni su sa vodoprivrednog aspekta (u kontroli poplava i erozije, održanju kvaliteta površinskih voda, kao i snabdevanju i održanju nivoa podzemnih voda), ekološkog (održanje visokoproduktivnih šuma, ribljih i životinjskih zajednica) i drugih aspekata (rekreacija i dr.).

Plavna područja imaju brojne funkcije: smanjuju vrhove poplavnih talasa na nizvodnom području, obezbeđuju prirodne mehanizme za poboljšanje kvaliteta vode (zadržavanje nutrijenata, ugljenika i teških (otrovnih) elemenata, regulacija rastvorenog organskog ugljenika) i očuvanje habitata (naročito retkih vrsta), predstavljaju dinamički sistem koji se prirodno adaptira na klimatske promene, obezbeđuju brojne resurse (riba, drvo i dr.) i mogu se koristiti za razvoj rekreacije i turizma.

Kako je priobalje svakog vodotoka atraktivno zbog ravnog terena, blizine vode, dostupnosti građevinskog materijala, pogodnosti saobraćaja itd., u veoma dugom vremenskom periodu su postepeno isključivane ili menjane inundacije (prosecanjem krivina, izgradnjom nasipa, pretvaranjem u poljoprivredno ili gradsko zemljište).

Sa porastom svesti o ekološkoj vrednosti plavnih područja i njihovog značaja u uslovima klimatskih promena, počeli su projekti njihove rehabilitacije, odnosno postepenog obnavljanja (slika 18.13).

Slika 18.13: Korito reke Brede u Danskoj pre i posle delimične rehabilitacije (Izvor: therrc.co.uk)

18.4.2 Riblje staze

Izgradnja ribljih staza radi ponovnog uspostavljanja migracije riba na lokalitetima koji su bili prepreka njihovom kretanju je bitna riblju populaciju, koja je važan element kvaliteta vodotoka.

Riblje staze su konstrukcije kojima se olakšava primarno uzvodna migracija ribljih vrsta i drugih rečnih organizama preko poprečnih objekata. Nizvodna migracija može se ostvariti i prelivanjem preko objekta, naročito ako je mala visinska razlika gornje i donje vode.

Najveća prepreka migraciji riba su visoke brane (visine preko 15 m), na kojima se grade riblji liftovi ili se riba lovi i prevozi kamionima ili baržama sa donje na gornju vodu brane.

Za manje prepreke (pregrade u koritu i sl.) postoje brojni tipovi ribljih staza, koji se uglavnom razlikuju po obliku i rasporedu pregrada duž staze. Generalno se mogu podeliti na "tehničke" i "prirodne" riblje staze.

18.4.2.1 Tehničke riblje staze

Tehničke riblje staze su betonske konstrukcije u kojima se određeni uslovi tečenja ostvaruju time što se veštački povećava rapavost i postavljaju pregrade sa različitim otvorima. Najzastupljenije su: staze s bazenima, staze s vertikalnim otvorima, Denilove staze i kanali s veštački povećanom rapavošću.

Riblje staze s bazenima se projektuju tako da se ukupni pad savlada pomoću niza stepenica (bazena). Bazeni su odvojeni vertikalnim pregradama sa otvorima kroz koje ribe plivaju. Tečenje vode iz bazena u bazen se može odvijati na više načina: (a) isticanjem kroz otvor na dnu pregrade, što je pogodno za ribe koje ne mogu da preskaču pregrade; (b) prelivanjem preko pregrade, što zahteva da riba preskače pregradu (slika 18.14) ili (c) kombinacijom isticanja i prelivanja preko pregrade. Kanal i pregrade su uglavnom pravougaoni, iako mogu biti i trapeznog ili trougaonog oblika.

Slika 18.14: Tehnička riblja staza sa prelivanjem iz bazena u bazen (Izvor: hehuzhili.com)

Slika 18.15: Tehnička riblja staza sa vertikalnim otvorima (Izvor: finterest.com.au)

Riblje staze sa vertikalnim otvorima (slika 18.15) su podvarijanta kod koje nije pregrađen ceo poprečni presek, nego je pregrada na određenim mestima prorezana po celoj visini. Pregrade mogu imati prorez na istoj strani ili se prorezi postavljaju naizmenično.

Denilova riblja staza je poznat tip, jer je razvijena još početkom XX veka. Staza se sastoji od pravolinijskog kanala sa podužnim padom, u kome su pregrade raspoređene na kratkim rastojanjima. Vrlo je pogodna za velike padove jer je, zbog velikog gubitka energije na pregradama, njena dužina manja u odnosu na druge tipove ribljih staza.

Slika 18.16: Tehničke riblje staze sa veštački povećanom rapavošću

Kanali sa veštački povećanom rapavošću (slika 18.16) imaju pragove u dnu, koji povećavaju rapavost i rasipanje energije, a to omogućuje smanjenje brzine toka. Pragovi se mogu različito oblikovati i rasporediti: upravno na tok, sa jednim ili dva preloma itd.

Preporučuje se da dno svake tehničke riblje staze, na celoj dužini, bude pokriveno slojem prirodnog nanosa debljine min 0,2 m.

18.4.2.2 Prirodne riblje staze

Prirodne riblje staze su trapezni kanali u kojima se potrebni hidraulički uslovi postižu raspoređivanjem kamenih blokova. Riblja staza može da se izvede celom širinom toka (slika 18.17) ili na jednom delu (slika 18.18). Kanal se oblaže prirodnim rečnim materijalom, da bi se što približnije imitirao prirodni tok. Broj i rastojanje kamenih blokova se određuje hidrauličkim proračunom za zadati pad, tako da se pri merodavnom protoku obezbedi da brzina toka bude u granicama koje riba može podneti.

Slika 18.17: Riblja staza – rampa od kamena celom širinom korita (Izvor: mawsons.com.au)

Slika 18.18: Riblja staza – rampa od kamena u delu korita (Izvor: fishhabitatnetwork.com.au)

Tipične vriednosti nagiba ove riblje staze su 1:3 do 1:10. Na podlogu od šljunka ili geotekstila postavlja se „tepih“ od najmanje dva sloja lomljenog kamena (donji sloj je od sitnijeg, a gornji od krupnijeg kamena). U podlogu se ukomponuju nepravilno raspoređeni krupni kameni blokovi prečnika 0,6 do 1,0 m. Dubina toka na kamenoj rampi treba da bude 1/3 do 1/2 razlike kota nivoa na uzvodnom i nizvodnom kraju staze. Nizvodno od riblje staze postavlja se kameni tepih minimalne dužine 5 m, radi zaštite korita od erozije. Takođe, potrebno je zaštiti obale oblogom od kamenog nabačaja i vegetacije, koja se uklapa u ambijent.

Da bi riblja staza bila funkcionalna, ulaz u stazu treba dobro postaviti u prostoru, tako da privuče ciljne riblje vrste. Jako strujanje privlači ribe, pa je ulaz najbolje postaviti uz

konkavnu obalu, što bliže brani ili izlazu iz turbine hidroelektrane. I u samoj stazi je potrebno obezbediti odgovarajuće uslove, a posebno pogodne izlazne brzine i protoke. Preporučuje se brzina toka na izlazu iz riblje staze 0,8-2,0 m/s, a protok 1-5% ukupnog protoka.

Hidrauličkim oblikovanjem ribljih staza postižu se uslovi tečenja koji odgovaraju ciljnim ribljim vrstama. Generalno, turbulencija toka u ribljoj stazi treba da bude što manja da bi svi organizmi mogli migrirati, bez obzira na njihove plivačke sposobnosti. Takođe, preporuka je da maksimalna brzina tečenja (u suženjima, procepima i otvorima) bude ispod 2,0 m/s, dok na ostalim delovima riblje staze brzina treba da bude manja.

Bez obzira na iznete preporuke, treba istaći da je svaka riblja staza poseban slučaj i zahteva posebno prilagođena rešenja koja zavise od ciljnih vrsta, vremena migracije, hidroloških uslova vodotoka itd.

Problem pri izboru i koncipiranju riblje staze predstavlja često nedostatak podataka o plivačkim sposobnostima i navikama ribljih vrsta određenog područja, a ti podaci su ulazni parametri za hidrauličkog oblikovanje ovog objekta. Problem se rešava usvajanjem vrednosti za koje se smatra da odgovaraju većem broju ribljih vrsta, kao i praćenjem funkcionalnosti riblje staze posle njene izgradnje. Stoga oblikovanje ribljih staza zahteva multidisciplinaran pristup problemu i blisku saradnju biologa (ihtiologa) i građevinskih inženjera.

Riblje staze se grade da se obezbedi uzvodna migracija, dok problematika nizvodnih migracija riba još uvek nije rešena. Ukoliko ribe prelaze pregradu preko preliva, česte su povrede i uginuća zbog velikih brzina i izražene turbulencije toka. Pritom manje ribe bolje podnose padove, dok velike u većini slučajeva imaju posledice.

Poseban problem je kako pri nizvodnoj migraciji sprečiti ulaz riba u turbine hidroelektrana. U tu svrhu se postavljaju posebni objekti, čija je funkcija da ribe na siguran i efikasan način usmere ka ribljoj stazi. To su najčešće fizičke barijere, ali se ispituju i drugi načini za privlačenje riba u riblju stazu.

Kompletnu riblju stazu je potrebno zaštititi od nedozvoljenih radnji, što uključuje postavljanje zaštitnih ograda i mreža, kao i zabranu ribolova, kupanja i sportskih aktivnosti.

19 PROJEKAT UREĐENJA VODOTOKA

Planiranje i projektovanje se najčešće odnosi na nove objekte i radove na uređenju vodotoka. Međutim, sve češće se javlja potreba da se održavaju, poprave, modifikuju ili nadvise postojeći objekti, a ove aktivnosti takođe zahtevaju planiranje i projektovanje.

19.1 Faze projekta uređenja vodotoka

Projekat uređenja vodotoka sastoji se od više faza:

- predlog projekta,
- projektovanje,
- izvođenje,
- operativna faza (praćenje, održavanje, popravke i rekonstrukcije objekata, ako su potrebne) i eventualni prestanak rada (uključujući i uklanjanje objekata, ukoliko je to moguće).

19.1.1 Predlog projekta

Svi projekti uređenja vodotoka počinju definisanjem potrebe (na pr. potrebno je da se od poplava zaštiti naselje A ili da se zaštiti od fluvijalne erozije deonica reke M). U fazi predlaganja projekta definišu se ciljevi, koji su obično zasnovani na aspiracijama predlagača (na primer da se naselje A zaštiti od poplava povratnog perioda X).

Ciljevi obuhvataju i zahteve (ono sto je propisano) i ograničenja (ono što je nepoželjno ili nedozvoljeno). Postavljanje jasnih ciljeva je vrlo bitna početna tačka, jer pomaže projektantu da nađe adekvatno inženjersko rešenje kojim se zadovoljava iskazana potreba.

19.1.2 Projektovanje

U fazi **generalnog projekta** se razmatra šira lepeza mogućih rešenja (uz definisanje prostornog rasporeda i tipskih rešenja objekata), kako bi se ispitala njihova opravdanost. Jedna od glavnih aktivnosti u ovoj fazi je identifikacija funkcija, ograničenja i informacija potrebnih za dalje faze projekta. Na primer, u generalnom projektu se daje program terenskih istraživanja i analiza koje je potrebno izvršiti da bi se za dalje faze projektovanja obezbedili neophodni podaci o fizičkim uslovima na razmatranom području.

U fazi **idejnog projekta** se sprovode brojna istraživanja i analize, uključujući i analizu postojećeg režima vodotoka, analizu uticaja projekta na životnu sredinu i ekonomsku analizu. U ovoj fazi se više pažnje posvećuje tehničkoj opravdanosti rešenja - objekti se detaljnije definišu (poprečni i podužni profil, sve kote i dimenzije) i predlažu materijali koji će se koristiti za izvođenje. I u idejnom projektu se može predložiti više alternativnih rešenja, za koja treba razmotriti:

- funkcionalnost,
- postizanje političkih, socijalnih i zakonskih uslova,
- uticaj na životnu sredinu i optimalno korišćenje resursa,
- troškove tokom projektnog veka,

- identifikovane rizike (tehničke, ekonomske i po životnu sredinu),
- probleme funkcionisanja i održavanja.

Izrada idejnog projekta treba da bude interaktivan proces, da bi se na kraju postigao dogovor između zainteresovanih strana (naručioca, korisnika i projektanta) i izabralo najbolje rešenje radova na uređenju vodotoka.

Posle toga počinje faza **glavnog projekta** u kojoj se nadalje detaljno razrađuje izabrano rešenje. U okviru glavnog projekta se rade detaljni istražni radovi, definišu detalji svih objekata i izrađuju crteži, specifikacije i predmer radova.

Idejni i glavni projekti moraju da poštuju planske akte i uslove koje su definisale nadležne institucije da bi mogla da se dobije dozvola za izgradnju i nastavi sa fazom izvođenja.

19.1.3 Izvođenje

Tokom izvođenja se dalje razrađuju crteži, a moguće su i modifikacije projekta usled problema koji se konstatuju na gradilištu (na pr. neočekivani uslovi fundiranja itd.). Ukoliko se to dogodi, dužnost projektanta je da detaljno objasni koncept originalnog projekta i obezbedi da izmene ne ugroze ni jedan aspekt funkcionisanja objekata. Ukoliko su takvi problemi očekivani, naručilac angažuje projektanta da vrši projektantski nadzor na izvođenju radova.

19.1.4 Operativna faza projekta

U operativnoj fazi je potrebno obezbediti praćenje efekata projekta i stalno održavanje objekata. Ukoliko se uoče oštećenja objekata potrebne su sanacije. Promena namene projekta zahteva modifikacije ili rekonstrukciju. Da bi se to uradilo potrebno je poznavati početno rešenje i posledice koje će proizaći iz naknadnih radova.

Ako je potrebno da se objekat ukloni, potrebno utvrditi najmanje rizičan način uklanjanja i sagledati uticaj uklanjanja na životnu sredinu. Za to je potrebno poznavati osnovni projekat, kao i naknadno izvršene radove.

19.2 Integralno sagledavanje problema

Projektant obično mora da sagleda potrebe, reši probleme i definiše rešenja u okviru projekta uređenja vodotoka i to na tri nivoa:

- Makro nivo: sistem (objekat ili sistem objekata koji postiže utvrđeni cilj – na pr. sistem napera)
- Srednji nivo: komponente sistema (uključujući i komponente objekata – na pr. nožica, obloga..)
- Mikro nivo: pojedini elementi (lomljeni kamen, betonski blokovi itd.).

Proces projektovanja čini niz projektnih ciklusa, u kojima se povećava stepen detaljnosti:

- u prvom ciklusu se jasno definišu ciljevi projekta (na pr. zaštita erodirane obale),
- u drugom ciklusu određuju se kvantitativne i merljive funkcije projekta, koje nedvosmisleno opisuju šta treba postići da bi se dosegao postavljeni cilj (na pr. zaštita obale pri brzini toka od 3 m/s),

- treći ciklus rezultira definisanim oblikom i dimenzijama objekata (na pr. odluka da li se gradi obaloutvrda ili paralelna građevina i sl.),
- u četvrtom ciklusu se pripremaju detalji izgradnje objekata (materijali, dimenzije i dozvoljena odstupanja).

Svi objekti se projektuju tako da ispune određeni cilj ili više ciljeva. Pored toga, postoje drugi kriterijumi koje objekat mora da ispuni. To su tehnički kriterijumi (fizički uslovi, uslovi izvođenja i održavanja), ekonomski kriterijumi (troškovi izvođenja, održavanja, dobit), kriterijumi životne sredine i socijalni kriterijumi (radna snaga, korisnici, javnost itd.). U tabeli 19.1 dati su tipični faktori koji mogu uticati na projekat. Oni nisu poznati na početku projekta, nego se postepeno identifikuju tokom procesa projektovanja, koji zbog toga mora biti iterativan.

Tabela 19.1: Pitanja koja treba razmotriti u projektu uređenja vodotoka [76]

	Aspekt	Pitanja
Tehnička pitanja	Funkcionalnost	Postizanje funkcionalnih zahteva (na pr. sprečiti prelivanje nasipa ili eroziju obale)
		Prihvatljiva stabilnost objekta i mali rizik od otkaza (izbor odgovarajućih uslova u projektu)
		Promene dozvoljene verovatnoće otkaza tokom vremena
		Prilagodjivost (na pr. moguća je promena načina korišćenja objekta tokom vremena)
		Obezbeđeni zdravstveni i sigurnosni zahtevi
	Fizički uslovi	Geotehničke karakteristike tla
		Topografski i batimetrijski uslovi
		Hidraulički uticaji (nivoi vode, brzine vode, talasi, led)
		Morfološke promene
		Pronos nanosa
		Nedovoljno poznavanje fizičkih uslova (granice poverenja)
	Tehnički podaci	Karakteristike materijala (na pr. krupnoća lomljenog kamena), kvalitet, izdržljivost i raspoloživost
		Tačnost informacija, parametara i metoda analize
		Metode dimenzionisanja pojedinih objekata
		Priroda rušenja (progresivno ili trenutno, kompletan objekat ili delovi)
	Izvođenje	Mogućnost izgradnje
		Iskustvo i resursi izvođača
		Pitanja zdravlja i sigurnosti
		Uslovi tokom izgradnje (na pr. veličina i učestalost velikih voda)
		Pristup gradilištu
		Materijali za izvođenje – osobine i kvalitet
		Raspoloživost alternativnih materijala
		Veličina gradilišta (skladištenje materijala i operacije tokom gradnje)
	Održavanje	Karakteristike odgovora objekta na uticaje
		Učestalost i tip intervencija
		Raspoloživost odgovarajućih resursa za popravke (materijali, uređaji, znanje)
		Finansiranje
		Pristup izvedenom objektu
Ekonomija		Razrada alternativa
		Koristi i troškovi (odnos između potpunog ili delimičnog postizanja ciljeva za višu ili nižu cenu)
		Prihvatljiv rizik od otkaza
		Ulaganja
		Potencijalni troškovi održavanja

Aspekt	Pitanja
Životna sredina	Prilagođavanje zahtevima životne sredine
	Zaštita resursa (voda, kamen i sl.)
	Potencijalni uticaji na životnu sredinu tokom izvođenja
	Rizik od vandalizma
	Potencijalne koristi po životnu sredinu
	Uticaji na morfologiju i režim nanosa
	Prihvatljivost izgleda
Društvo	Zdravlje i sigurnost
	Izvođenje i funkcionisanje
	Učešće zainteresovanih strana

Rezultat uspešnog integralnog projekta će biti objekat (na pr. obaloutvrda, pregrada i sl. ili sistem objekata) kojim se postiže postavljeni cilj, koji je izdržljiv, lak za izvođenje i održavanje, društveno i vizuelno prihvatljiv, ekonomski opravdan i sa minimalnim negativnim uticajima na životnu sredinu.

U praksi, svaki projekat uređenja vodotoka će morati da postigne odgovarajuću ravnotežu između postavljenih zahteva. U ekonomskom pogledu, potrebno je postići ravnotežu između vrednosti projekta (uglavnom je uslovljena funkcionalnim zahtevima i uticajem na životnu sredinu) i troškova, koji zavise od tehničkih aspekata i izvođenja. Stepen pažnje koja se posvećuje ovim aspektima se menja iz faze u fazu projekta. Na primer, u kasnijim fazama se manje pažnje posvećuje funkcionisanju objekta (odnosno njegovoj vrednosti), a više izvođenju (odnosno troškovima).

Pri planiranju i projektovanju uređenja vodotoka treba uzeti u obzir radove koji će nadalje biti potrebni. Tu treba uključiti i izmene uslova ili funkcija projekta tokom planiranog projektnog veka. Gde god je moguće, projekat treba da bude adaptibilan, da bi se odgovorilo mogućim promenama u životnoj sredini ili eventualnim promenama funkcija objekta. Ovde spadaju promena načina korišćenja objekata, podizanje nivoa vode, morfološke promene, povećani saobraćaj, promene raspoloživih lokalnih materijala i radne snage za održavanje itd.

Informacije potrebne za razumevanje problema i/ili ograničenja koja se postavljaju projektu uređenja vodotoka će projektantu obezbediti naručilac i institucije nadležne za planiranje prostora i upravljanje vodama, plovidbu ili zaštitu životne sredine. Te informacije veoma zavise od tipa i lokacije projekta.

S druge strane, informacije o očekivanom funkcionisanju/korišćenju objekata mogu biti veoma široko definisane. Detalji o očekivanom ponašanju projekta i ograničenjima često na početku projekta uređenja vodotoka i nisu poznati, ali ih projektant kasnije analizira i argumentovano prezentira naručiocu, koji ih obično i prihvata.

Ograničenja često diktiraju projekat. Tipični primeri su sledeći:

- Hidraulički uticaji su takvi da se neki materijali i tehnike izvođenja moraju isključiti odnosno izabrati;
- Uslovi fundiranja su loši, pa se nepogodna podloga (na primer meka prašina) mora ukloniti tokom izvođenja;
- Nedostaju određeni materijali, mehanizacija ili uređaji, tako da se mora usvojiti drugačiji oblik i konstrukcija građevina;

- Drugačiji radovi na izvođenju ili održavanju, pa čak i same karakteristike projekta mogu proisteći iz potrebe da se zaštiti životna sredina;
- Zbog potrebe vizuelnog uklapanja objekta u okolinu, neće biti dozvoljena gradnja određenih tipova objekata ili će objekti imati ograničenu visinu,
- Potrebno je uspostaviti ravnotežu između raspoloživog budžeta za izvođenje i sredstava za održavanje.

Projektant je odgovoran da detaljno razmotri sva ova pitanja, a prikupljene informacije će koristiti da bi se projektovana rešenja uskladila sa potrebama, ograničenjima i prioritetima koji će postojati tokom veka projekta. Raspoložive informacije i znanje će se menjati tokom razvoja projekta, tako da će se projektna rešenja tome prilagođavati.

Funkcionalni zahtevi. U svakom projektu uređenja vodotoka je važno da se u potpunosti razume funkcija koju je potrebno ostvariti, kao i problemi i zahtevi koje treba rešiti. Očekivane funkcije projekta treba da na samom početku jasno definiše naručilac. Pre nego što započne proces projektovanja, održavanja ili sanacije/rekonstrukcije objekta potrebno je odgovoriti na ova dva pitanja:

- Koje funkcije projekat treba da ostvari?
- Koji su projektni zahtevi?

Iako ova pitanja izgledaju potpuno jasno, često se ne formulišu dobro. Stoga se u praksi priprema lepeza funkcionalnih zahteva za projekat, a onda se to razmatra i koristi kao projektni uslov.

Poznavanje fizičkih uslova je generalno najvažnije za projektovanje i izvođenje projekta uređenja vodotoka. Tu spadaju, pre svega, hidraulički uticaji koji definišu projektovane objekte, odnosno njihov položaj u planu, visinu, profil, širinu i materijale, kao i način izvođenja. Cena projekta se tačnije definiše ukoliko se bolje sagledaju fizički uslovi. Zbog toga se uvek isplati investirati u istražne radove, jer je za njih potreban samo delić sume koja se može uštedeti racionalnim projektom.

Radi definisanja fizičkih uslova potrebno je: snimanje topografije i morfologije vodotoka, geotehnička ispitivanja, merenje i analiza hidrauličkih uticaja (nivoi vode, talasi, strujanje vode), kao i istraživanje drugih uticaja (led, plovila). Najčešće se fizički uslovi definišu kombinacijom terenskih merenja i numeričkih analiza, i to za normalne uslove i ekstremne uslove funkcionisanja.

Da bi se postiglo dugoročno upravljanje projektom uređenja vodotoka, pažnju treba posvetiti i monitoringu kojim se utvrđuju promene na samim objektima, prati funkcionisanje projekta i njegovi uticaji na okolni prostor i životnu sredinu.

Tehnička pitanja su bitna i za projektovanje i za izvođenje. U okviru projektovanja, potrebno je izabrati odgovarajući pristup i alate. Vrlo je važno poznavanje ponašanja objekta, kao i funkcionisanja različitih komponenti objekta. Uslovi izvođenja i održavanja su takođe bitni. Na primer, potrebno je razmotriti:

- **Raspoloživost materijala**, jer to diktira izbor obloge građevina (lomljeni kamen, betonski elementi ili drugo), kao i oblik građevine (nagibi kosina, položaj bermi i sl.);
- **Lokalne kapacitete za izvođenje**: Ako postoji sumnja u kvalitet izvođenja, definisati dopuštena odstupanja i tolerancije;
- **Kako najbolje iskoristiti materijale**: Proveriti da li kamenolomi mogu da isporuče kamen potrebnih dimenzija u dovoljnim količinama. Ukoliko to nije moguće, razmotriti mogućnost da se u projektu što više koriste lokalni materijali.

- **Tip mehanizacije koja se koristi za izvođenje**: Razmotriti maksimalni domet mehanizacije, naročito za postavljanje velikih elemenata. Na primer, izvođenje sa vode pomoću plovne mehanizacije je dvostruko sporije nego izvođenje sa obale, ali suvozemna mehanizacija zahteva veliki prostor za manevrisanje na kruni objekta.

Generalno treba težiti da rešenja budu što jednostavnija, da bi se broj različitih aktivnosti pri izvođenju sveo na minimum.

Iako **izvođenje** ne treba da diktira rešenja, mora se uzeti u obzir prilikom projektovanja. Naime, ako se objekat može izvesti jednostavno, onda će biti i jeftiniji, bez obzira na eventualno veću količinu materijala. To je još važnije ukoliko je objekat deo većeg infrastrukturnog projekta i obezbeđuje zaštitu narednim fazama radova. Ipak, ponekad je teško objasniti naručiocu da najmanja količina ugrađenog materijala ne znači i najjeftinije rešenje.

Zahtevi budućeg **održavanja** su bitan element u planiranju i projektovanju uređenja vodotoka. Ovde je potrebno da projektant razmotri slična pitanja kao i za izvođenje, ali mora da razume da održavanje predstavlja veći izazov. Na primer, pristup objektu i obezbeđenje odgovarajuće mehanizacije su važniji za održavanje nego za izvođenje. Naime, pri održavanju su aktivnosti ograničene na način koji nije postojao prilikom izvođenja (na pr. ograničen pristup mehanizacije).

Ekonomske analize. Cena projekta se detaljno razmatra tokom projektovanja uređenja vodotoka. Cena zavisi od mnogo parametara, ali su najznačajniji količina materijala i izvodljivost radova.

Naručilac ponekad na početku ne prepoznaje sve ekonomske posledice izvođenja projekta i nivo rizika tokom vremena. Jedna od opcija je objekat koji ima malu cenu izvođenja, ali i veliki rizik od oštećenja tokom vremena. Ova opcija može biti prihvatljiva ukoliko naručilac nema dovoljno novca za inicijalno ulaganje, ali on mora da bude svestan da su mogući visoki troškovi održavanja u budućnosti i mora da nađe način da ih obezbedi.

Zaštita životne sredine. Projektant, izvođač i korisnik projekta moraju da budu svesni njegovog uticaja na životnu sredinu. Razmatranje ove problematike obično počinje još u fazi definisanja projekta i nastavlja se kontinualno, kroz razmatranje samih radova (materijali i način izvođenja) i njihovog uticaja na okruženje (fizičke parametre, habitat i vrste, ljude i njihove aktivnosti). U uticaje se ubrajaju korišćenje resursa, zagađenje vazduha, vode i zemljišta, nepovoljne promene habitata, flore i faune usled izvođenja projekta. Međutim, projekat uređenja vodotoka može doprineti i poboljšanju uslova u životnoj sredini, ako se njima stvaraju novi ili povezuju postojeći habitati.

Da bi se sagledali svi ovi uticaji, tokom planiranja i projektovanja uređenja vodotoka radi se i procena uticaja projekta na životnu sredinu.

Usklađivanje sa zahtevima zaštite životne sredine, sa koracima koji su defisani zakonskim i planskim aktima, može biti dugotrajan posao, koji zahteva izradu obimnih studija i obezbeđenje mera za smanjenje nepovoljnih uticaja. Dozvole se dobijaju od niza nadležnih institucija, sa kojima su potrebne konsultacije. Preporučuje se stoga da se planeri, projektanti i izvođači povežu sa nadležnim institucijama što ranije, kako bi proces usklađivanja bio što lakši.

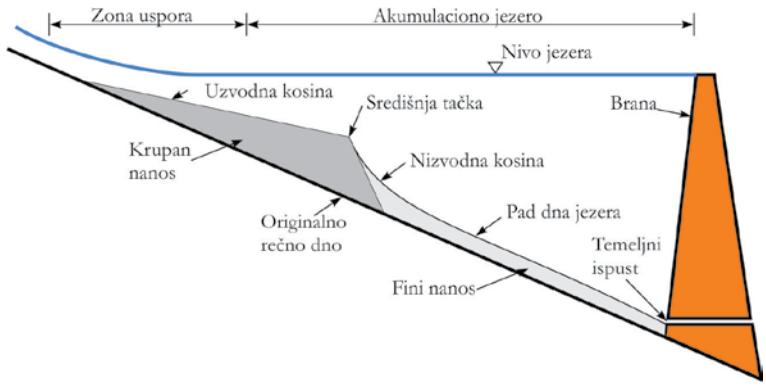
Zaštita životne sredine nije bitna samo u fazama projektovanja i izvođenja, već tokom kompletnog trajanja projekta, sve do prestanka funkcije i eventualnog uklanjanja.

20 KONTROLA ZASIPANJA AKUMULACIJA

20.1 Nastanak i raspored nanosnih naslaga u akumulaciji

Snimanja stanja dna postojećih akumulacija su pokazala da se u jednom jezeru najčešće javlja više tipova nanosnih naslaga (slika 20.1). Najčešće se, u akumulacijama u kojima se održava relativno visok i stabilan nivo vode, krupne frakcije nanosa zadržavaju na uzvodnom kraju akumulacije, formirajući deltu. Finije čestice nanosa kreću se i u prostoru akumulacije i talože u znatno širem prostoru. Najčešće se najsitnije čestice nanosa talože tek u najdubljim delovima akumulacije ili, u slučaju vrlo finog nanosa, ostaju u suspenziji i prelaze preko objekta.

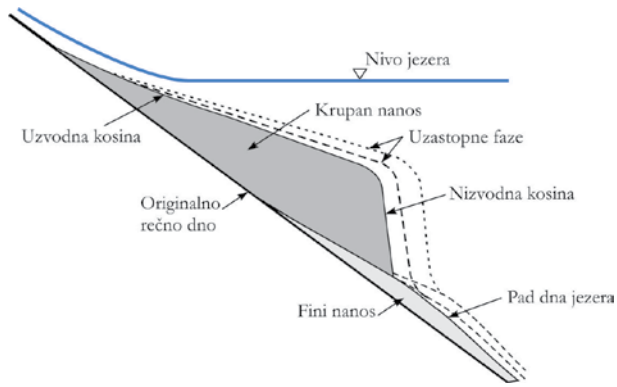
Prašinaste i glinovite frakcije nanosa ostaju u suspenziji duže vreme i nošene strujama ulaze u sve delove akumulacije. Pored strujanja vode, nanos se kroz akumulaciju kreće i pod uticajem lokalnih strujanja, kad nastaju pod uticajem vetra ili usled stratifikacije.



Slika 20.1: Najčešći raspored nanosnih naslaga u akumulaciji [56]

Delta ima različite padove uzvodne i nizvodne kosine. Nanosne naslage klinastog oblika i sa ujednačenim padom se ređe javljaju, samo u akumulacijama formiranim u klisurama, koje imaju malu zapreminu u odnosu na ulazne količine nanosa, tako da nanos brzo stiže do profila brane i taloži se u mrtvoj zapremini.

Ukoliko je u pitanju relativno uska akumulacija (akumulacija u kojoj u tečenju učestvuje ceo poprečni profil), delta će rasti u nizvodnom pravcu (slika 20.2). Brzina rasta delte može biti velika, a zavisiće od proticaja i karakteristika sliva, kao i od oblika akumulacije. Prema nekim istraživanjima (Borland, 1971.), u većini rezervoara uzvodna kosina delte ima pad dvostruko manji od pada prirodnog rečnog korita, dok je pad nizvodne kosine oko 6,5 puta veći od pada uzvodne kosine.

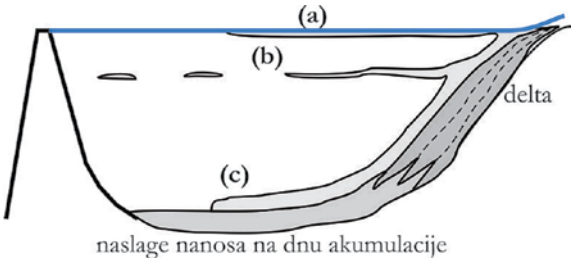


Slika 20.2: Faze rasta delte [56]

Ukoliko se vodotok uliva u akumulacioni prostor koji je znatno širi od njega, delta se proširuje i u podužnom i u poprečnom pravcu, dobijajući oblik lepeze. Vodotok useca podvodne kanale kroz deltu, kojima se nanos pronosi u nizvodne delove akumulacije. Delte nastaju i na ušćima manjih vodotoka koji se ulivaju u akumulaciju.

Položaj i oblik naslaga finijeg materijala će zavisiti od karakteristika čestica, hemijskih osobina vode i načina regulisanja protoka u akumulaciji. Ukoliko su frakcije gline jonski aktivne, čestice će se spajati formirajući flokule. Zbog svoje težine flokule glinovitih čestica će se istaložavati na rečno dno, isto kao i frakcije sitnog peska ili prašine. U slučaju hemijski neaktivnih čestica, frakcije gline će ostati dispergovane u vodi i neće se istaložiti u prostoru akumulacije.

U većini akumulacija, posebno ukoliko su duboke ili imaju dugo vreme izravnanja, javlja se stratifikacija masa po gustini. Gustina vode koja dotiče u akumulaciju se takođe menja, u funkciji temperature i sadržaja supendovanog nanosa. U zavisnosti od odnosa gustine vode koja dotiče i gustine pojedinih slojeva u akumulaciji, ulazna struja (slika 20.3) se može širiti u vidu tankog sloja po površini akumulacije (a), u vidu sloja na nekoj dubini akumulacije (b), potonuti na dno (c) ili se potpuno izmešati sa vodom u akumulaciji.



Slika 20.3: Mehanizmi distristribucije finih frakcija nanosa u akumulaciji [56]

U slučaju da voda koja dotiče u akumulaciju sadrži visoke koncentracije nanosa, a naročito u dubokim akumulacijama sa izrazitim padom dna, javljaju se teške ili **mutne struje**. Mutna struja predstavlja podvodnu struju veće gustine od gustine vode u akumulacionom bazenu, koja na nekom odstojanju od uzvodnog kraja akumulacije tone i nastavlja da teče po dnu. Nanos koji transportuje mutna struja se istaložava kada se, usled trenja sa okolnim fluidom, njena brzina redukuje do nule ili kada struja naiđe na branu. Prema nekim autorima, mutne struje se javljaju kada je srednja krupnoća nanosa manja od 0,2 mm.

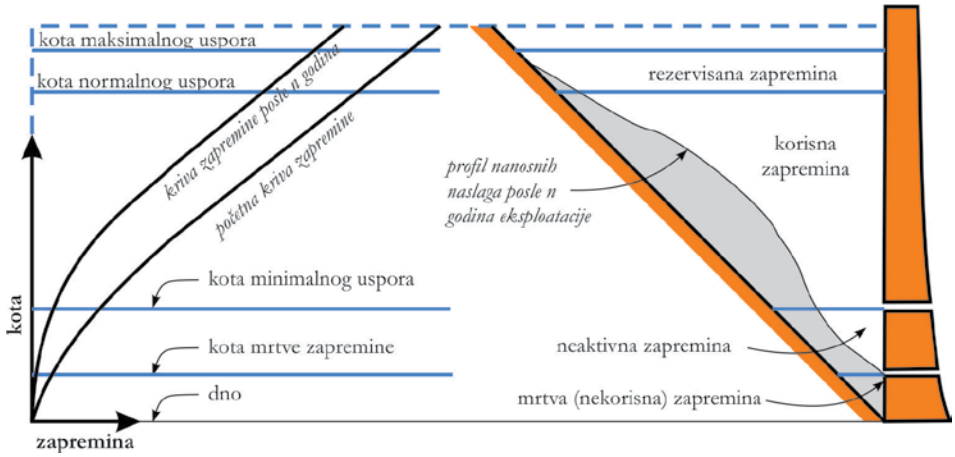
20.2 Posledice zasipanja akumulacija

Istaložavanje nanosa u akumulaciji ima brojne nepovoljne posledice, kao što su: smanjenje korisne zapremine, nastanak sprudova koji ometaju plovidbu ili umanjuju estetske kvalitete akumulacije, zamuljenje i pogoršanje kvaliteta vode, i dr.

U slučaju nekih akumulacija, proces taloženja je tako intenzivan da se korisna zapremina akumulacije veoma brzo gubi. Troškovi stalnog uklanjanja nanosa mogu biti tako veliki da se dovodi u pitanje ekonomska opravdanost iskorišćavanja objekta. Čak i ako proces nije intenzivan, taloženje nanosa u akumulaciji predstavlja problem za njene korisnike, jer nanosne naslage mogu da ometaju ili onemoguće funkcionisanje objekata u akumulaciji.

U slučaju akumulacija sa hidroenergetskom namenom, smanjenje korisne zapremine predstavlja veliki problem. Zbog smanjenja zapremine akumulacije mora se promeniti režim rada hidroelektrane, uz smanjenje energetske proizvodnje, a redukuje se i proizvodnja postrojenja tokom kritičnih perioda - kada je potrošnja velika, a dotok u akumulaciju nedovoljan. Pored toga, nanosne naslage mogu da ugroze sigurnost i funkcije

brane i hidroelektrane. Najpre, postoji mogućnost da istaloženi rečni nanos, zatvori ulaz u evakuacione organe (ispuste) na brani ili ulaze u turbine. Oštećenja turbina, usled abrazivnog dejstva nanosnih čestica, takođe su nepovoljna pojava koja se često javlja.



Slika 20.4: Redukcija korisne zapremine akumulacije usled istaložavanja nanosa [56]

U akumulaciji se zadržavaju skoro sve frakcije nanosa, tako da se iz nje ispušta relativno čista voda. Ispuštanje vode neopterećene nanosom kroz ispuste, turbine ili preko preliva, dovodi do poremećaja prirodnog kvazi-ravnotežnog režima vodotoka na sektoru **nizvodno od akumulacije**. Naime, s obzirom da u vodotoku postoji višak energije, jer nije zadovoljen njegov transportni kapacitet za nanos, dolazi do pokretanja čestica nanosa iz rečnog dna. Rezultat je pojava erozije rečnog dna, koja postepeno napreduje u nizvodnom pravcu, prolazeći kroz više faza. Tokom procesa degradacije korita, finije čestice nanosa će se pokretati pre nego krupne. Stoga će dno biti pokriveno sve krupnijim nanosom, koji će se sve sporije kretati, dok na kraju kretanje ne prestane (efekat "samopopločavanja" rečnog dna).

Erozija dna počinje da napreduje od profila brane u nizvodnom smeru. Naime, kako se na jednoj deonici završi proces samopopločavanja, proces erozije se pomera na nizvodnu deonicu, itd. Postepeno se, međutim, postiže relativna ravnoteža rečnog dna, jer se, usled erozije, smanjuje pad dna, što doprinosi smanjenju brzina i usporavanju procesa degradacije korita. Uslovi za pokretanje krupnog šljunka i oblutaka javljaće se samo u ekstremnim hidrološkim uslovima, odnosno u pikovima poplavnih talasa, koje mnoge akumulacije u velikoj meri transformišu i ublažavaju.

Proces erozije rečnog dna na potezu nizvodno od brane povoljan je za energetsku proizvodnju, jer se snižava donja voda hidroenergetskog objekta. Međutim, erozija ima i mnogobrojne negativne posledice: dolazi do rušenja obala, potkopavanja obaloutvrda i drugih regulacionih objekata, ugroženi su mostovski stubovi i oslonci, a može čak biti ugrožena i stabilnost same brane.

Uzvodno od akumulacije se rečni nanos najpre delimično zadržava u zoni isklinjavanja uspora od akumulacije, u kojoj su smanjene brzine toka i transportne sposobnosti za nanos u odnosu na prirodan rečni tok. Nanosne naslage u ovoj zoni postepeno rastu u uzvodnom pravcu, sve dok se ne dostigne novo ravnotežno stanje. Ovaj proces ima više nepovoljnih posledica: grananje toka, dopunski uspor, potapanje priobalnih površina i povišenje nivoa podzemnih voda. Nanos koji se u ovoj zoni taloži u periodima u kojima se održavaju visoki nivoi u akumulaciji spiraće se kada se u akumulaciji obori nivo.

Do pojave dopunskog uspora (povišenje nivoa vode za isti protok) dolazi zbog smanjenja propusne moći korita, koje je posledica istaložavanja nanosa. Dopunski uspor, koji se javlja i u plitkim i u dubokim akumulacijama, može dostići značajnu veličinu tokom veka korišćenja akumulacije. Najopasniji je dodatni uspor pri velikim vodama, jer smanjuje stepen zaštite od poplava.

20.3 Faze procesa zasipanja akumulacije

Razvoj procesa zasipanja jedne akumulacije se odvija u četiri faze, koje su ilustrovane na slici 20.5:

I faza: Prirodni režim. U ovoj fazi se vodotok nalazi u stanju dinamičke ravnoteže. Na deonici buduće akumulacije postoji ravnoteža između ulaznih i izlaznih količina nanosa, koje se ne razlikuju bitno po osnovnim fizičkim karakteristikama. Pri malim vodama se nanos istaložava na rečnom dnu, a pri velikim vodama dolazi do njegovog pokretanja i odnošenja.

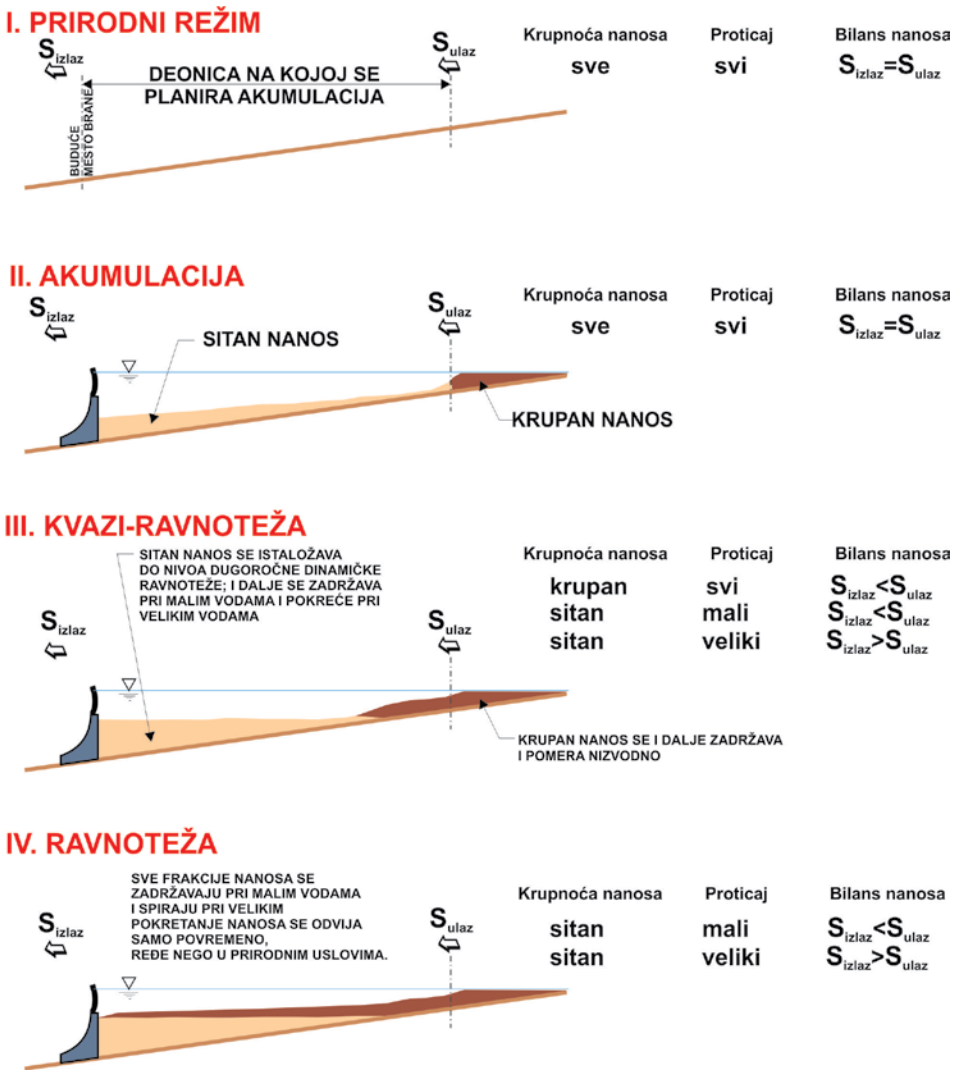
II faza: Smanjenje zapremine. Izgradnjom brane su hidraulički uslovi u vodotoku sasvim izmenjeni. Akumulacioni prostor se postepeno zasipa nanosom različite krupnoće. Krupniji nanos se zadržava na uzvodnom kraju akumulacije, u obliku delte, dok se sitnije frakcije talože nizvodnije.

III faza: Kvazi-ravnoteža. Uspostavljena je ravnoteža između ulaznih i izlaznih količina suspendovanog nanosa, ali se krupnije frakcije vučenog nanosa i dalje zadržavaju u prostoru akumulacije. U ovoj fazi nanos zauzima najveći deo akumulacionog prostora. Akumulacija je sada plitka, pa se u njoj pri prolazu velikih voda javljaju značajne brzine toka. U malovodnim periodima se i dalje sve frakcije nanosa istaložavaju u akumulaciji. Velike vode, međutim, spiraju velike količine finog nanosa iz prostora akumulacije. Zona delte se stalno pomera nizvodno ka profilu brane.

IV faza: Ravnoteža. Ulaz i izlaz nanosa su (skoro) u ravnoteži. Naslage krupnog materijala su stigle do brane. I u ovoj fazi će se nanos zadržavati u prostoru akumulacije, ali će pri velikim vodama dolaziti do pokretanja svih frakcija nanosa (osim najkrupnijih). S obzirom da rečni nanos obično sadrži mali procenat vrlo krupnih frakcija, vremenski period između faza III i IV će biti daleko duži nego između faza II i III.

Tradicionalni inženjerski stav je da se vek korišćenja akumulacije završava na kraju II faze, odnosno u momentu kada se zbog problema nanosa akumulacija više ne može koristiti u skladu sa projektovanom namenom.

Većina postojećih akumulacija u našem regionu je sada u II fazi, pri čemu proces zasipanja nanosom još ne ugrožava funkcije akumulacije. Neke starije akumulacije, na kojima je proces zasipanja nanosom odmakao, i dalje se koriste u maksimalno mogućoj meri. Korisnici traže načine da produže vek korišćenja akumulacije, pokušavajući da uspostave ravnotežu između ulaza i izlaza nanosa, uz istovremeno postizanje zadovoljavajućih ekonomskih efekata. Zbog toga se može reći da se "život" jedne akumulacije ne završava kada je ona u velikoj meri zasuta nanosom.



Slika 20.5: Faze zasipanja akumulacija [5]

20.4 Istraživanje procesa zasipanja akumulacije

Uobičajeno je da se istraživanja zasipanja akumulacija realizuju u više faza: tokom planiranja, projektovanja i eksploatacije objekta.

Na taj način se stvaraju uslovi za preispitivanje i blagovremenu izmenu osnovnih karakteristika projekta (režima rada akumulacije itd.), ukoliko se pokaže da je tokom prethodnih faza istraživanja došlo do progrešnih procena dinamike ili drugih parametara procesa zasipanja akumulacije nanosom. Pored procesa koji se odvijaju u prostoru same akumulacije posle izgradnje brane i punjenja vodom, moraju se prognozirati i posledice izmene prirodnog režima nanosa vodotoka, koje će se javiti na sektorima uzvodno i nizvodno od brane.

Istraživanja zasipanja akumulacije treba da odgovore na jasno definisana pitanja o ovom procesu, koja se postavljaju tokom planiranja, projektovanja ili upravljanja vodoprivrednim sistemom.

U fazi planiranja se radi **prethodna analiza zasipanja akumulacije**, kao integralni deo studije ekonomske opravdanosti izgradnje objekta. Prvi zadatak prethodne analize zasipanja akumulacije je procena dužine veka korišćenja (vreme u toku koga će nanos ispuniti korisnu zapreminu akumulacije), kao najvažnijeg podatka za procenu ekonomske opravdanosti izgradnje ovog vodoprivrednog objekta. Da bi se procenio vek korišćenja akumulacije potrebno je poznavati prosečni ulaz nanosa, kao i procenat ulaznih količina koji će se zadržati u akumulaciji. U nekim slučajevima, međutim, i raspored nanosnih naslaga u akumulaciji može uticati na iskorišćenje delova korisne zapremine namenjenih pojedinim korisnicima akumulacije. Zato se već u početnoj fazi planiranja radi i preliminarna procena dinamike razvoja i rasporeda nanosnih naslaga u akumulaciji.

U studiji ekonomske opravdanosti izgradnje akumulacije, osim investicione vrednosti same brane i pripadajućih objekata, moraju se uzeti u obzir i investicije vezane za zaštitu akumulacije od nanosa. U ovu grupu spadaju: (a) Investicije u protiverozione mere u slivu, koji se planiraju ukoliko je potrebno smanjiti ulaz nanosa u akumulaciju da bi se produžio njen vek korišćenja. Obim planiranih protiverozionih radova zavisiće od njihovog efekta na smanjenje ulaza nanosa i zasipanja akumulacije; (b) Investicije u radove na uzvodnim i nizvodnim deonicama vodotoka, kojima se smanjuju negativne posledice poremećaja prirodnog režima nanosa koji nastaje izgradnjom brane. U nekim slučajevima poremećaj prirodnog režima nanosa će imati vrlo štetne posledice, tako da njihova ekonomska valorizacija može dovesti u pitanje opravdanost izgradnje brane.

Rezultati prethodne analize zasipanja akumulacije stoga služe i za planiranje obima protiverozionih radova i mera u gravitirajućem slivu i vrste i obima radova na deonicama vodotoka koje će biti pod uticajem brane i akumulacije.

U fazi projektovanja brane se radi tačnija analiza zasipanja akumulacije, na nivou studije. Studija zasipanja akumulacije mora da definiše sve karakteristike procesa i posledice zasipanja akumulacije i predvidi mere upravljanja nanosom. Planirane mere upravljanja nanosom u akumulaciji se moraju uzeti u obzir pri projektovanju brane i pripadajućih objekata. Od njih će zavisiti, pre svega, položaj i dimenzije vodozahvata, preliva, temeljnih ispusta, ustava i drugih objekata.

Režim korišćenja akumulacije utiče značajno na proces zasipanja, pa se stoga pri planiranju mera upravljanja nanosom moraju imati u vidu potrebe korisnika (vodosnabdevanje, proizvodnja energije, navodnjavanje, zaštita od poplava itd.). U mnogim slučajevima se pokazalo veoma važno da se pri izboru režima korišćenja vodi računa o njegovom uticaju na režim nanosa u akumulaciji.

U okviru projekta brane radi se i projekat protiverozionih mera u slivu (mera za smanjenje erozione produkcije nanosa u slivu i kontrolu bujične i fluvijalne erozije).

U projektu brane se planiraju mere i radovi za zaštitu od dodatnog uspora, koji je jedna od nepovoljnih posledica istaložavanja nanosa na uzvodnom sektoru akumulacije. Naime, dodatni uspor, koji će se povećavati u toku vremena, uporedo sa rastom nanosnih naslaga u nekim slučajevima može da ugrozi sigurnost sistema zaštite od poplava ili funkcionisanje nekih značajnih objekata na vodotoku (mostova, luka). Isti je slučaj sa nepovoljnim efektima izgradnje brane koji se javljaju na nizvodnom sektoru (erozija korita koja utiče na stabilnost obala i objekte na vodotoku).

U fazi korišćenja objekta, koja počinje punjenjem akumulacije, odvijaju se aktivnosti na praćenju deformacije korita vodotoka i drugih posledica izgradnje objekta. Ovo su trajne aktivnosti, koje se odvijaju tokom celog veka korišćenja akumulacije. Istraživanja i merenja tokom faze korišćenja akumulacije se vrše da bi se uporedile prognoze zasipanja sa karakteristikama stvarnog procesa. Može se, umesto simulacije, razviti i sistem za prognozu zasipanja u realnom vremenu, ukoliko je to predviđeno u planiranoj metodi upravljanja nanosom.

Mere upravljanja nanosom u akumulaciji, planirane u projektu, proveravaju se na bazi upoređenja planiranih rezultata sa efektima postignutim u praksi. Ukoliko je potrebno, planiraju se i dopunske mere zaštite od nanosa, kao što je rekonstrukcija delova brane i pripadajućih objekata (proširenje i povećanje broja temeljnih ispusta i ustava), obezbeđenje uslova za skretanje vode opterećene nanosom, izvođenje dodatnih protiverozionih radova u slivu, izvođenje kontrolnih brana uzvodno ili pragova u koritu nizvodno od objekta itd.

Metode **prognoze zasipanja akumulacija** mogu biti vrlo različitih nivoa složenosti: od jednostavnih empirijskih metoda do veoma kompleksnih, baziranih na matematičkom ili fizičkom modeliranju procesa. Međutim, nivo složenosti prognoznih proračuna zavisiće od faze i cilja istraživanja:

- U dokumentaciji koja se radi u fazi planiranja akumulacije primenjuju se empirijske metode za procenu ulaza nanosa sa sliva i procenta zadržavanja nanosa u akumulaciji, a ponekad se prognozira i raspored naslaga.
- U okviru projekta brane se procesu zasipanja posvećuje daleko veća pažnja. Uobičajeno je da se u studiji zasipanja primeni matematičko modeliranje procesa u akumulaciji, koje se mora zasnivati na podacima obimnih terenskih istražnih radova. Terenski podaci služe za definisanje ulaznih podataka i za kalibraciju primenjenih formula.
- U fazi eksploatacije objekta je osnovno organizovati terenska merenja i osmatranja, kako bi se obezbedili podaci za upoređenje prognoznih proračuna sa procesima koji se odvijaju u akumulaciji. U ovoj fazi je moguće izvršiti i verifikaciju matematičkog modela zasipanja akumulacije, kako bi se model mogao koristiti za dalje prognoze zasipanja.

Generalni cilj upravljanja nanosom u akumulaciji je da se smanji potencijalna opasnost da istaložavanje nanosa onemogući adekvatno funkcionisanje akumulacije. Odgovarajući način upravljanja nanosom, kojim će se ublažiti uticaj zasipanja na funkcionisanje vodoprivrednog sistema (akumulacije), određuje se na bazi prognoze zasipanja.

Objekat modeliranja je vodotok (ili više vodotoka) kojima voda i nanos ulaze u akumulaciju, sama akumulacija u kojoj se vrši transformacija protoka vode i zadržava deo nanosa, kao i deonica vodotoka nizvodno od akumulacije, na koju utiče izmenjeni režim vode i nanosa.

Tačnost prognoze opšte deformacije rečnog korita na potezu akumulacije ograničena je tačnošću ulaznih podataka i modela koji se koristi za prognozu.

Bez obzira na nivo modela koji se koristi za prognozu, stanje i parametri objekta modeliranja (akumulacije i sektora vodotoka uzvodno i nizvodno) moraju se definisati na bazi određenog obima osmatranja i merenja. Najznačajniji su podaci osmatranja i merenja parametara vode i nanosa na ulazu akumulaciju, kao i podaci snimanja prostora akumulacije. Kada akumulacija započne sa radom, osmatranjima i merenjima se mogu dobiti i podaci o izlazu vode i nanosa, kao i promenama morfoloških karakteristika akumulacije.

Osim osmatranja nivoa vode i snimanja topografije akumulacionog prostora, sve druge informacije o posmatranom sistemu se obezbeđuju merenjima ili uzimanjem uzoraka. Pritom treba imati u vidu da su nivo i obim informacija koji se mogu dobiti merenjima tehnički, finansijski ili na drugi način ograničeni. U merenjima se često javljaju greške, prouzrokovane različitim faktorima (sistematske greške zbog neadekvatne metodologije merenja ili slučajne greške). Zbog nepotpunih informacija (smanjen obim istraživanja iz finansijskih razloga i sl.) i grešaka merenja, stanje akumulacije može da ostane nedovoljno poznato i pored merenja.

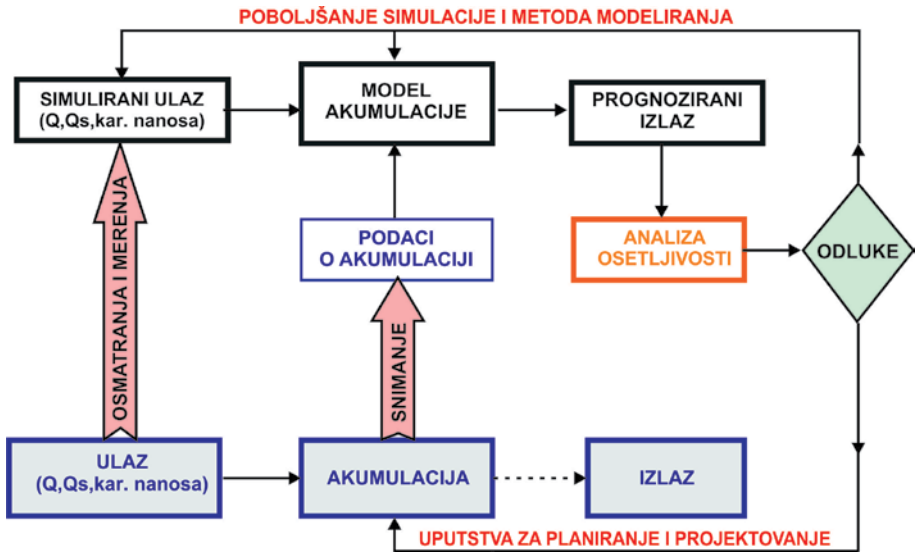
Matematički model akumulacije se sastoji od skupa teoretskih ili empirijskih jednačina kojima se simulira ponašanje sistema. Za proračune se primenjuju tehnike različitih nivoa složenosti, od korišćenja empirijskih dijagrama do aplikacije softverskih paketa. Kako matematički model akumulacije sačinjavaju relacije bazirane na velikom broju pretpostavki, hipoteza, uprošćenja i empirijskih ili poluempirijskih koeficijenata, model ne predstavlja ponašanje analiziranog fizičkog sistema u potpunosti.

Tačnost prognoznih proračuna, prema tome, ograničavaju i nepotpuno poznavanje sistema i greške samog modela proračuna. Vrednost primenjenog modela se, stoga, meri sposobnošću modela da predvidi ponašanje sistema sa tačnošću dovoljnom da se donesu ispravne projektantske ili upravljačke odluke.

U fazama planiranja i projektovanja akumulacije, model se koristi da bi planer ili projektant akumulacije imali podatke za donošenje odluka o lokacije brane, zapremini akumulacije, karakteristikama brane i akumulacije, kao i za preliminarno definisanje režima rada akumulacije. Kako projektovana akumulacija ne postoji, nije moguće izvršiti verifikaciju rezultata modela, ali se neizvesnosti koje su posledica nedovoljne tačnosti ulaza u model i samog modela mogu prevazići primenom analize osetljivosti modela. U analizi osetljivosti modela se svi relevantni parametri modela variraju u određenim granicama i ispituje uticaj varijacije parametara na rezultate proračuna.

U okviru analize treba ispitati i one planerske i upravljačke odluke koje zavise od prognoze ponašanja planirane akumulacije. Naime, prognoza istaložavanja nanosa u akumulaciji mnogo više zavisi od tačnosti ulaza u model i tačnosti samog modela nego planerske ili projektantske odluke koje se na bazi nje donose. U mnogim slučajevima, iako se u analizi osetljivosti modela dobijaju veoma različite prognozirane količine nanosa koji će se istaložiti u akumulaciji, projektant će usvojiti približno iste karakteristike akumulacije. Proces istaložavanja nanosa je uglavnom vrlo spor, tako da može da protekne mnogo godina dok posledice zasipanja akumulacije ne budu imale ekonomske efekte. Zbog toga veoma grubi modeli mogu da obezbede podatke dovoljne za donošenje odluka u fazi planiranja akumulacije, a često se dobra projektna rešenja donose na osnovu relativno netačnog modela akumulacije.

Ako analiza osetljivosti modela pokaže da parametri projektovanog sistema veoma zavise od tačnosti modela, prognozi procesa se mora posvetiti veća pažnja. Poboljšanje tačnosti prognoze se može postići poboljšanjem simulacije ulaza (kroz povećanje obima osmatranja i merenja veličina od kojih zavisi tačnost simulacije ulaza u model) ili poboljšanjem samog modela (unapređenje računskih metoda koje se koriste u modelu). Ovaj proces u principu treba ponavljati sve dok se ne postigne zadovoljavajuća pouzdanost odluka koje se donose u fazama planiranja i projektovanja akumulacije (slika 20.6). Međutim, u praksi se postavljaju vremenska i finansijska ograničenja, tako da planeri i projektanti često moraju da donesu konačne odluke, a da nisu u potpunosti ispitali problem zasipanja akumulacije. U takvom slučaju, planeri i projektanti moraju da budu svesni mogućih posledica odluka koje su doneli.



Slika 20.6: Dijagram toka prognoze zasipanja akumulacije u fazama planiranja i projektovanja [5]

20.4.1 Prethodna analiza zasipanja akumulacije

U prethodnoj analizi se rade prva istraživanja procesa zasipanja akumulacije. Kao što je već rečeno, prethodna analiza čini integralni deo prethodne studije opravdanosti (odnosno generalnog projekta) izgradnje brane i akumulacije.

U prethodnoj analizi se, uz korišćenje empirijskih metoda, okvirno procenjuju neki parametri procesa zasipanja projektovane akumulacije. Ukoliko rezultati analize pokažu da će zasipanje projektovane akumulacije biti ozbiljan problem, nastavljaju se dalja istraživanja u okviru izrade sledećih nivoa tehničke dokumentacije. Izuzetno, u slučaju malih akumulacija se može smatrati da je nivo prethodne analize dovoljan i za glavni projekat objekta. U prethodnoj analizi se mora proceniti intenzitet zasipanja buduće akumulacije, uticaj zasipanja akumulacije na režim rada i održavanje sistema, kao i uticaj izgradnje i eksploatacije objekta na uzvodni i nizvodni potez vodotoka.

Prethodna analiza se bazira na ograničenom fondu podataka o: (a) Slivu koji gravitira ka akumulaciji (topografski podaci za sliv i akumulaciju, podaci o poreklu vode i nanosa, eventualno postojećim uzvodnim akumulacijama, hidrauličkim i psamološkim uslovima na granicama akumulacije itd.); (b) Osnovnim karakteristikama projektovane akumulacije (namena i projektni vek korišćenja akumulacije, geometrija i zapremina akumulacije, projektovani režim rada); (c) Osnovnim karakteristikama projektovane brane (veličina i položaj ispusnih organa); (d) Vodotoku na potezu akumulacije (podužni profil, podaci o padu dna, rapavosti i sastavu rečnog dna); (e) Hidrološkom režimu vodotoka (prosečan godišnji dotok vode u akumulaciju, učestalost pojave i oblik poplavnih talasa); (f) Režimu nanosa vodotoka (sadašnji i budući način korišćenja zemljišta u slivu, karakteristike erozionih procesa i tipovi zemljišta u slivu, količina i karakteristike nanosa koji ulazi u akumulaciju; (g) Ostalim relevantnim uticajima (pojave i trajanje leda, talasi od vetra i plovila, hemijski i biološki procesi).

Prethodna analiza mora da rezultira podacima o: ukupnoj količini nanosa koja će ući u akumulaciju tokom projektnog veka korišćenja, procentu ulaza nanosa koji će se zadržati u akumulaciji, dinamici smanjenja korisne zapremine akumulacije, specifičnoj težini nanosnih naslaga, procenjenom smanjenju zapremine akumulacije (izraženom preko nivoa u akumulaciji), nivoima vode u akumulaciji posle formiranja naslaga (kao osnov za definisanje površine akumulacije i eksproprijaciju zemljišta), uticaju istaložavanja nanosa na izmenu nivoa vode na potezu vodotoka uzvodno od akumulacije (dopunski uspor), mutnoći vode u akumulaciji (zavisi od tipa zemljišta), potencijalnoj eroziji obala (zavisi od geološkog sastava obala, oscilacija nivoa, visine talasa i dr., veličini erozije rečnog dna nizvodno od brane i očekivanom sniženju kote donje vode, kao i drugim relevantnim pojavama u akumulaciji i izvan nje, koje su posledica izmenjenog režima vode i nanosa.

Za prethodnu procenu se koriste empirijske metode, zasnovane na osmatranjima i merenjima na brojnim akumulacijama širom sveta. Empirijskim metodama se mogu proceniti samo neki od parametari procesa zasipanja akumulacija.

Intenzitet zasipanja akumulacije se procenjuje preko parametra Φ kojim se opisuje odnos zapremine akumulacije i veličine vodotoka i korespondentnog sliva:

$$\Phi = \frac{W_{ak}}{W_{nan}^{ulaz}} \tag{20-1}$$

gde je: W_{ak} - zapremina akumulacije (m^3), W_{nan} - zapremina godišnjeg ulaza nanosa u akumulaciju (m^3).

Prema podacima iz literature, ako je:

- Φ < 25-30, akumulacija će godišnje gubiti više od 2% korisne zapremine.
- Φ < 50-100 postoji mogućnost da se projektovana akumulacija intenzivno zasipa nanosom, pa treba pažljivije analizirati ovaj proces u sledećim fazama istraživanja.

Procenat ulaza nanosa koji će se zadržati u akumulaciji (β) se izražava kao:

$$\beta = \frac{(W_{nan}^{ulaz} - W_{nan}^{izlaz})}{W_{nan}^{ulaz}} \tag{20-2}$$

gde je: W_{nan}^{ulaz} - ulaz nanosa u akumulaciju, W_{nan}^{izlaz} - izlaz nanosa iz akumulacije.

Procenat zadržavanja nanosa se koristi za određivanje količine nanosa koja se taloži u prosečnoj godini, odnosno prosečnog godišnjeg smanjenja zapremine akumulacije. Treba imati u vidu da se procenat zadržavanja nanosa (β) postepeno smanjuje tokom procesa zasipanja (odnosno tokom smanjenja zapremine) akumulacije. Za praktične potrebe, može se pretpostaviti da procenat zadržavanja nanosa ostaje konstantan dok se akumulacija ne zaspe do 50% početne zapremine, a zatim se smanjuje. Na procenat zadržavanja nanosa u akumulaciji utiču neke karakteristike akumulacije (odnos zapremine akumulacije i dotoka vode, oblik akumulacije, tip ispusta, režim rada), karakteristike nanosa koji u nju ulazi (granulometrijski sastav, oblik čestica, koncentracija nanosa), karakteristike vode (temperatura, hemijski sastav), sekundarna strujanja itd.

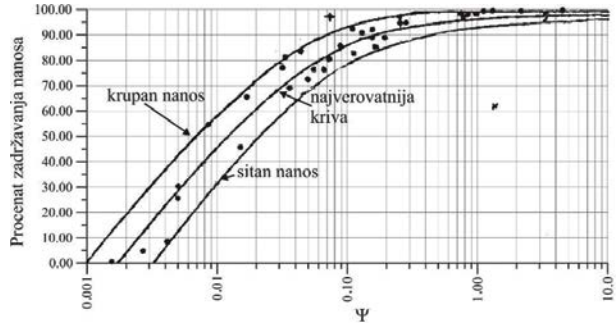
U literaturi se može naći više metoda za procenu procenta istaložavanja nanosa u akumulaciji. Najčešće se koristi metod Brun-a (Brune, 1953), zasnovan na korelaciji između procenta zadražavanja nanosa (β) i bezdimenzionog parametra Ψ:

$$\Psi = \frac{W_{ak}}{W_{vode}} \tag{20-3}$$

gde je: Wak - zapremina akumulacije, Wvode - zapremina godišnjeg dotoka vode. Procenat zadražavanja nanosa u akumulaciji se može odrediti na osnovu dijagrama na slici 20.7 ili pomoću jednačine najverovatnije krive:

$$\beta = 100 \cdot (0{,}97^{0{,}19\Psi}) \tag{20-4}$$

Metod Brun-a se primenjuje širom sveta, a posebno se preporučuje za veće akumulacije, odnosno za akumulacije sa velikim stepenom izravnanja. Koristi se isključivo za procenu količina nanosa koje će se zadržati u akumulaciji u toku višegodišnjeg perioda (dužeg od 10 godina).



Slika 20.7: Dijagram Brun-a [56]

Vek akumulacije (T) je period tokom koga će se određeni procenat njene zapremine (ζ=80%, 90%,...) zasuti nanosom:

$$T = \frac{\zeta \cdot W_{ak}}{\beta \cdot W_{nan}} \tag{20-5}$$

gde je: β - procenat zadržavanja nanosa, W_{ak} - zapremina akumulacije (m^3), W_{nan} - zapremina nanosa (m^3).

Procenat zadržavanja nanosa se smanjuje sa starenjem akumulacije, tako da se vek akumulacije može proceniti na bazi sledeće empirijske relacije:

$$T = \frac{1-(1-\zeta)^{1-n}}{(1-n)\cdot\frac{\beta_o}{\Phi_o}} \tag{20-6}$$

gde su: β_o - procenat zadržavanja nanosa na početku rada akumulacije, Φ_o - odnos početne zapremine akumulacije i zapremine godišnjeg ulaza nanosa, n - indeks koji se može odrediti na bazi istraživanja postojećih akumulacija ($1>n\geq 0$).

Položaj i oblik nanosnih naslaga u akumulaciji zavisiće od više različitih faktora: veličine, oblika i pada dna akumulacije; izvora, količina i karakteristika nanosa; režima rada akumulacije; veličine, učestalosti i redosleda pojavljivanja poplavnih talasa; konsolidacije naslaga; prisustva vegetacije i objekata u akumulaciji. Po obliku naslage u akumulaciji mogu biti: (a) U obliku delte, što je tipična pojava u većini akumulacija u kojima se održava relativno visok i stabilan nivo vode; (b) Klinastog oblika, uniformne se javljaju u akumulacijama formiranim u klisurama, koje imaju malu zapreminu u odnosu na ulaz nanosa (Φ), tako da nanos brzo stiže do profila brane; (c) Trakaste naslage su retka pojava koja se javlja samo u klisurastim akumulacijama, u slučaju malih ulaznih količina finog nanosa i čestih i izrazitih fluktuacija nivoa vode.

U prethodnoj analizi se za prognozu rasporeda nanosnih naslaga u akumulaciji koriste empirijske metode, iako one nisu podjednako primenljive na sve akumulacije. Zbog toga se preporučuje primena više metoda, kako bi se izbegle moguće loše procene. U američkoj

literaturi se za procenu rasporeda nanosnih naslaga u prostoru akumulacije preporučuju: (a) metod indeksa poplava, (b) metod profila delte, (c) metod prirasta površine, (d) metod redukcije površina i (e) metod trajanja nivoa. Sve navedene metode se zasnivaju na podacima o ukupnom ulazu nanosa, prosečnom procentu zadržavanja nanosa i ukupnoj količini nanosa koja će se zadržati u akumulaciji tokom razmatranog vremenskog perioda.

Sa gledišta korisnika akumulacije, najveći problem predstavljaju naslage koje zauzimaju deo korisne zapremine na uzvodnom kraju akumulacije. Hidraulički uslovi u ovom delu akumulacije, međutim, variraju u veoma širokim granicama, zavisno od topografskih i hidroloških uslova, kao i karakteristika nanosa. Zbog toga u ovom slučaju nije pogodno koristiti empirijske dijagrame, osim za veoma grube procene.

Generalno, proces zasipanja akumulacije se može opisati sledećom eksponencijalnom funkcijom (Lapshenkov, 1979):

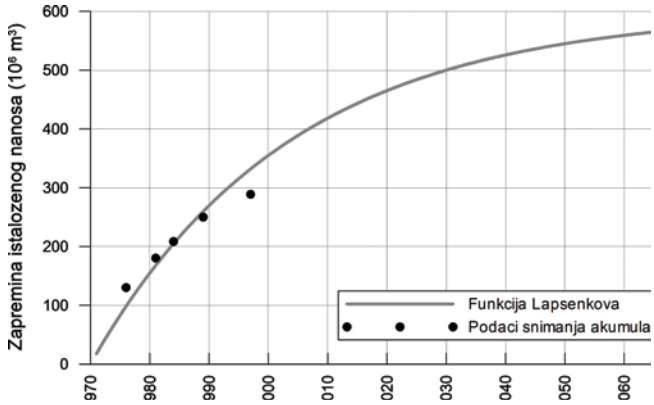
$$V_{x,t} = V_{x,n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{E_{x,t}}} \right) \qquad (20\text{-}7)$$

gde je: $V_{x,t}$ - zapremina nanosa istaloženog na deonici x u vremenu t, $V_{x,n}$ - ukupna (konačna) zapremina nanosa koji će se istaložiti na deonici x, $E_{x,t}$ - indeks zasipanja, koji ima dimenziju vremena. Zavisi od geometrije akumulacije, hidroloških karakteristika vodotoka i karakteristika nanosa.

Ova eksponencijalna funkcija opisuje napredovanje procesa zasipanja tokom starenja akumulacije. Konačna zapremina nanosa u akumulaciji će se dostići na kraju dugog perioda korišćenja akumulacije, kada se postigne novo ravnotežno stanje. Ona se može lako odrediti ukoliko se od početne zapremine akumulacije oduzme zapremina nekadašnjeg rečnog korita.

Autor je predložio način kako da se indeks zasipanja odredi kombinovanjem analitičkih i empirijskih metoda, u slučaju akumulacije koja je u fazi planiranja. Međutim, ova jednačina se može lako iskoristiti za određivanje indeksa zasipanja, ukoliko je posle određenog perioda rada akumulacije izvršeno snimanje i time određena vrednost $V_{x,t}$. Kada je određena vrednost $E_{x,t}$ (koja se menja i po deonicama i u vremenu) moguće je iskoristiti prikazanu eksponencijalnu jednačinu za prognozu zasipanja akumulacije u narednom periodu. Na slici 20.8 prikazano je korišćenje funkcije Lapšenkova u prognozi daljeg razvoja procesa zasipanja deonice akumulacije HE Đerdap 1 kod Donjeg Milanovca.

Empirijske metode za prethodnu procenu zasipanja akumulacije su jednostavne, relativno lake za primenu i jeftine. Mogu da posluže da se, sa dovoljnim stepenom tačnosti, proceni zasipanje malih akumulacija ili da predstavljaju prvi korak u istraživanju procesa zasipanja velikih akumulacija.



Slika 20.8: Prognoza taloženja nanosa na jednoj deonici akumulacije HE Đerdap 1 (Izvor: IJČ)

Empirijske metode su obično bazirane na poznavanju najznačajnijih faktora koji utiču na proces zasipanja akumulacija, dok se manje značajni faktori zanemaruju. Međutim, kasnije se može pokazati da baš ti "manje značajni" faktori imaju dominantan uticaj na proces zasipanja konkretne akumulacije. Takođe, empirijskim metodama se ne može predvideti ponašanje akumulacije u kraćim vremenskim periodima (jedan ili nekoliko hidroloških ciklusa) niti su one pogodne za analizu akumulacija koje imaju specifične režime rada. S obzirom da su empirijske metode zasnovane na određenim regionalnim podacima, one se ne mogu primeniti u slučaju uslova koji se značajno razlikuju od podataka korišćenih za njihov razvoj.

U slučaju većih akumulacija, moguća su dva pristupa. Ukoliko se na bazi empirijskih proračuna utvrdi da su količine nanosa koji će se taložiti u akumulaciji relativno male, tako da ni 1,5-2 puta veće količine nanosa neće ugroziti sigurnost objekta ili uticati na ekonomsku opravdanost njegove izgradnje može se doneti odluka o nastavku rada na projektu i faznoj realizaciji istraživanja taloženja nanosa. U tom slučaju se istraživanja postepeno proširuju i dopunjavaju u okviru sledećih faza planiranja i projektovanja objekta. Naravno, uvek postoji rizik da je u okviru prethodne analize, koja je bazirana na ograničenom fondu raspoloživih podataka, došlo do pogrešne procene problema zasipanja akumulacije. Ovaj rizik se mora prevazići postepenim obezbeđenjem podataka terenskih merenja, kojima se potvrđuju prethodni rezultati.

Ukoliko, međutim, rezultati prethodne analize pokažu da proces zasipanja projektovane akumulacije može da ugrozi sigurnost i ekonomičnost projekta, neophodno je da se uradi posebna studija, bazirana na podacima terenskih istraživanja. Studija taloženja se mora raditi i ako se u postojećoj akumulaciji javljaju značajniji problemi vezani za nanos.

20.4.2 Prognoza zasipanja akumulacije

U studiji zasipanja akumulacije se analiziraju isti procesi kao i u prethodnoj analizi, ali na znatno višem nivou obrade. U ovoj dokumentaciji se prognoziraju ulazne i izlazne količine nanosa, dinamika nastajanja i prostorni raspored nanosnih naslaga. Pored toga, studija mora da predloži način upravljanja nanosom odnosno rešenja zaštite akumulacije od zasipanja nanosom. U tom okviru se ispituje režim i efekti hidrauličkih metoda za kontrolu zasipanja akumulacija (ispiranje nanosa, ispuštanje mutnih struja itd.).

Za prognozu evolucije i prostornog rasporeda naslaga u akumulaciji danas se najčešće primenjuju matematički modeli. Matematički modeli su bazirani na rešavanju osnovnih jednačina mehanike fluida koje opisuju kretanje mešavine vode i nanosa iznad pokretnog rečnog dna i pomoćnih jednačina kojima se opisuje kretanje nanosa. Posle definisanja početnih i graničnih uslova, sistem jednačina se rešava primenom odgovarajućih numeričkih metoda i uz određene pretpostavke i uprošćenja. U novijoj svetskoj literaturi se može naći opis velikog broja matematičkih modela zasipanja akumulacija, koji se razlikuju po primenjenoj jednačini za transport nanosa, pretpostavkama i empirijskim koeficijentima, numeričkim metodama itd.

Savremeni matematički modeli zasipanja akumulacija uključuju modele za strujanje vode, transport vučenog nanosa, transport nanosa u suspenziji, razmenu nanosa između ova dva različita transportna mehanizma, kao i deformaciju (zasipanje ili eroziju) rečnog korita.

Kompletna oblast strujanja i transporta nanosa deli se na aktivni sloj pri dnu korita i suspenziju iznad njega. Aktivni sloj predstavljaju čestice koje se kreću kao vučeni nanos,

kao i čestice na dnu i neposredno ispod površine dna, koje su direktno izložene vodenoj struji. U modelu se prirodna mešavina nanosa deli na pogodan broj frakcija, pa se posebno modelira ponašanje svake frakcije. Ovakav pristup ostavlja mogućnost da se svaka frakcija, zavisno veličine čestica i lokalnih hidrauličkih uslova, kreće bilo kao vučeni nanos, kao suspendovani nanos ili da miruje.

Kompletan sistem jednačina za nanos, zasnovan na prethodnim principima, na odgovarajući način opisuje ponašanje mešavine različitih frakcija i omogućava da se modeliraju prirodne pojave kao što su samopopločavanje rečnog korita ili selektivno deponovanje (tzv. hidrauličko sortiranje) čestica različitih veličina na različitim lokacijama u akumulaciji. U slučaju degradacije (erozije) rečnog korita, model omogućava da se simulira razmena materijala između aktivnog sloja i nanosa u slojevima ispod površine rečnog dna. U slučaju agradacije (zasipanja), moguće je modelirati formiranje slojeva različitih karakteristika.

Kao rezultat modeliranja dobijaju se, pored uobičajenih veličina kojima se opisuje tečenje vode u akumulaciji, i ukupna (kumulativna) deformacija rečnog korita, koncentracije suspendovanog nanosa za svaku od izabranih frakcija, kao i procenti svih frakcija u aktivnom sloju tj. na rečnom dnu i u slojevima ispod povrsine dna. Iz ovakvih rezultata se lako generišu ostale veličine kao što su ukupna koncentracija suspendovanog nanosa, pronos suspendovanog nanosa (ukupan ili po frakcijama), pronos vučenog nanosa (ukupan ili po frakcijama), itd.

Kako je problem taloženja nanosa u akumulaciji u suštini trodimenzionalan, najtačniji opis analiziranog procesa bi se mogao dobiti primenom 3D matematičkog modela kretanja vode i nanosa. Tehnike matematičkog modeliranja turbulentnog kretanja, koje omogućavaju rešavanje dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih strujnih polja, primenjuju se uz određena ograničenja još od početka osamdesetih godina. U principu je moguće povezati proračune turbulentnog strujanja sa proračunom bilansa nanosa i time povećati mogućnosti matematičkog modeliranja zasipanja akumulacija. Međutim, bez obzira na izuzetno brz razvoj kompjuterske hidraulike u poslednjim decenijama, 3D modeli se i dalje vrlo retko koriste, već se problem uprošćava svođenjem na dve ili najčešće samo jednu dominantnu dimenziju (dužinu). Do danas je razvijeno bezbroj jednodimenzionalnih modela, koji se razlikuju po stepenu uprošćavanja matematičkih jednačina, kompleksnosti numeričke šeme i ograničenjima u vezi mogućnosti njihove primene.

Jednodimenzionalni modeli kretanja vode i nanosa u aluvijalnim vodotocima se mogu podeliti u više kategorija, zavisno od toga na koji način se modelira kretanje vode i nanosa u prostoru i vremenu. Podela se može izvršiti prema tome da li se u modelu: uzima u obzir promenljivost proticaja i količina nanosa u vremenu; istovremeno ili odvojeno rešavaju jednačine kojima se opisuje kretanje vode i nanosa; uzima u obzir promenljivost transporta nanosa u vremenu i prostoru, zavisno od uslova tečenja; simulira transport svake pojedine frakcije nanosa ili koristi karakteristično zrno nanosa kao reprezent mešavine.

U većini praktičnih slučajeva jednodimenzionalni modeli (pod uslovom da su razvijeni, kalibrisani i verifikovani na odgovarajući način) daju zadovoljavajuće odgovore, tako da se analize zasipanja akumulacija uglavnom oslanjaju na ovu vrstu modela.

Fizički modeli sa pokretnim dnom se, takođe, široko primenjuju za analizu procesa u akumulacijama. Međutim, oni se koriste za prognozu nastanka i razvoja procesa koji su lokalizovani u ograničenom prostoru (zasipanje objekata u akumulaciji itd.) i imaju 3D karakter, što se ne može (za sada) ispitivati matematičkim modelom. S druge strane, fizički

modeli nisu pogodni za ispitivanje ponašanja cele akumulacije tokom dužeg vremenskog perioda, tako da se za to koriste skoro isključivo matematički modeli.

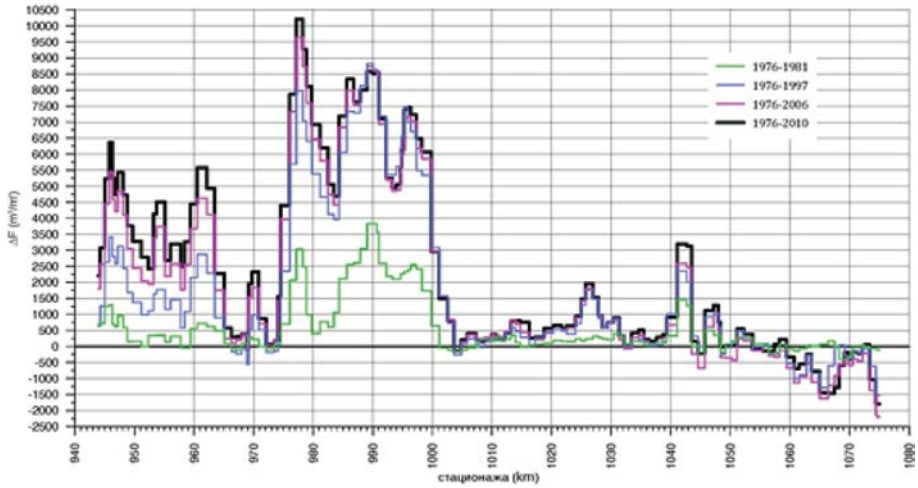
I matematičke i fizičke modele za prognozu deformacije korita pod uticajem objekata, pre svega brana, mogu koristiti samo obučeni specijalisti, a oni zahtevaju veliki obim različitih ulaznih podataka.

20.4.3 Praćenje procesa zasipanja akumulacije

Praćenje procesa zasipanja akumulacije zasniva se na uzastopnim geodetskim snimanjima stalnih poprečnih profila, odnosno profila koji su postavljeni duž vodotoka pre njenog punjenja.

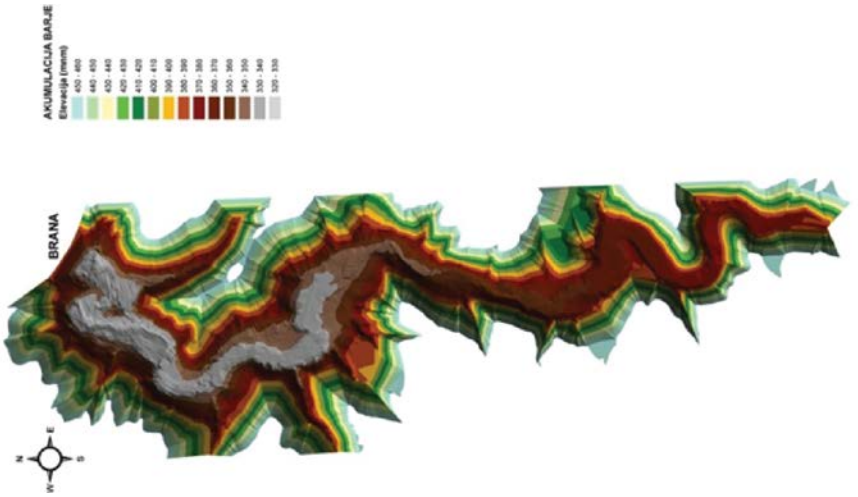
Primer su snimanja akumulacije HE Đerdap 1, započeta 1976. godine. Rezultat uzastopnih snimanja određenog profila je prikazan na slici 5.16.

Na slici 20.9 su ilustrovane morfološke promene na jednom sektoru ove akumulacije, u vidu podužnog prikaza promena na poprečnim profilima (koji ukazuje na lokacije sa najintenzivnijim procesom zasipanja).



Slika 20.9: Podužni prikaz morfoloških promena u koritu Dunava od brane HE Đerdap 1 do ušća Nere, u periodu 1976-2010. godina [10]

Dno manjih akumulacije se može ehosonderom snimiti celo (slika 20.10), a zatim se zaključak o procesu zasipanja dobija upoređenjem sa prethodnim snimanjem iste vrste.



Slika 20.10: Rezultat snimanja dna akumulacije Barje, 2010. (Izvor: IJČ)

20.5 Koncept održivog razvoja i upravljanja akumulacijama

Generalno prihvaćeni koncept **održivog razvoja i upravljanja** vodnim resursima podrazumeva projekte koji su društveno i ekološki prihvatljivi, ekonomski opravdani i tehnički izvodljivi.

Primenjen na sve akumulacije, pa i akumulacije sa hidroenergetskom namenom, ovaj koncept podrazumeva maksimalno moguće produženje veka njihovog korišćenja. Maksimalno produženje veka korišćenja akumulacije se može postići samo koordiniranom primenom raspoloživih tehnika upravljanja nanosom u slivu i samoj akumulaciji.

Raspoložive mere za kontrolu procesa zasipanja akumulacije je neophodno primenjivati najpre u fazama planiranja i projektovanja, a posebno tokom korišćenja vodoprivrednog objekta. Pri tome treba poštovati opšte priznato načelo da je mnogo bolja prevencija zasipanja nego kasnije uklanjanje već istaloženih nanosnih naslaga.

Proces taloženja nanosa u svakoj akumulaciji ima svoje specifičnosti, tako da izbor adekvatne strategije kontrole ovog procesa mora izvršiti multidisciplinarni tim, već u fazi projektovanja. Izbor treba izvršiti na bazi višekriterijumske analize, kao kompromis između različitih korisnika vode, uz pažljivu ocenu ekonomskih, ekoloških i socijalnih parametara uticaja procesa zasipanja.

Ranije su se akumulacije posmatrale kao klasični inženjerski objekti određenog trajanja, koji se mogu zameniti novima kada se u potpunosti zaspu nanosom. Zbog toga se, u određenom broju slučajeva, prilikom njihovog projektovanja i korišćenja nije obraćala pažnja na mogućnost dugoročne zaštite akumulacije od nanosa.

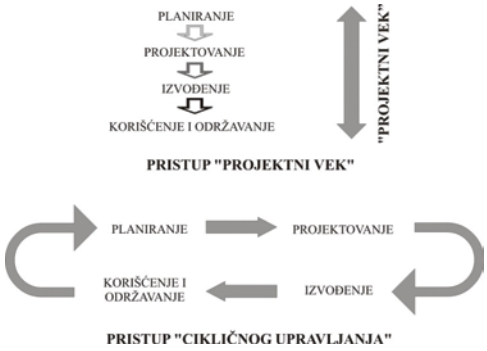
Međutim, pokazalo se da se postojeće akumulacije ne mogu jednostavno zameniti novima, jer one već zauzimaju najpovoljnije lokacije. Broj novih pregradnih mesta sa zadovoljavajućim topografskim i geološkim karakteristikama je ograničen, kao i broj lokaliteta na kojima je tehnički i ekonomski moguće iskorišćenje vodnih snaga za proizvodnju energije. Drugo je pitanje da li postoje ekonomske mogućnosti da se akumulacije zasute nanosom jedna

po jedna zamenjuju novim vodoprivrednim sistemima. Zato se teži održivom korišćenju resursa i akumulacija "cikličnim upravljanjem". Razlike između ova dva pristupa su prikazane na slici 20.12.

Pristup "projektni vek" je u osnovi linearan, počinje sa planiranjem, zatim sledi projektovanje, izvođenje, korišćenje i održavanje dok se akumulacija u potpunosti ne ispuni nanosom. Tada je ona dostigla kraj svog "života".

Sa druge strane, "ciklično upravljanje" se odvija periodično. Kao i prethodni pristup, počinje sa planiranjem, projektovanjem, izvođenjem, korišćenjem i održavanjem. Međutim, ove aktivnosti se izvršavaju na način koji osigurava stalno korišćenje akumulacije. To podrazumeva da se, tokom planiranja i projektovanja, vrše istraživanja pronosa nanosa i definišu metode kontrole nanosa koji ulazi u akumulaciju. Zatim se pristupa izvođenju, a korišćenje i održavanje se nastavlja optimiziranjem količine nanosa koji dospeva u akumulaciju i stalnim održanjem korisnog prostora akumulacije. Ovaj proces se ciklično ponavlja.

Slika 20.11: Primer akumulacije zasute nanosom (Izvor: washington.edu)



Slika 20.12: Pristupi upravljanja akumulacijama [5]

20.6 Mere kontrole zasipanja akumulacija

Opšta težnja za dugoročnim korišćenjem i održivim razvojem akumulacija u svim delovima sveta doprinela je da su se u novije vreme znatna pažnja posvećuje ispitivanju i razvoju metoda za kontrolu zasipanja akumulacija.

Osnovni cilj koji se postavlja prilikom projektovanja i korišćenja akumulacija je da se definišu takve metode kontrole nanosa kojima se umanjuju negativni uticaji sedimentacije i omogućava produženje perioda korišćenja akumulacije.

Generalno, postoji više mogućnosti za kontrolu zasipanja akumulacija:

- U prvu grupu mera spadaju **mere kojima se smanjuje ulaz nanosa u akumulaciju**. Ova kategorija mera se, pre svega, sastoji u smanjenju produkcije nanosa na uzvodnim delovima sliva, konzervacijom zemljišta i kontrolom erozionih i bujičnih procesa. Pored toga, u ovu grupu spada i izvođenje objekata pomoću kojih se nanos skreće van akumulacije (obilazni kanali ili tuneli).
- Druga kategorija mera se zasniva na konceptu da je jednostavnije održati nanos u suspenziji tokom njegovog prolaska kroz rezervoar, nego ga pokrenuti kada se istaloži (što je posebno teško ukoliko dođe do konsolidacije nanosa). U kategoriju **mera kojima se sprečava istaložavanje nanosa u akumulaciji** spadaju ispuštanje velikih voda, koje su opterećene velikim količinama nanosa i ispuštanje mutnih struja.

- **Mere za uklanjanje naslaga istaloženog nanosa sa dna akumulacije** se dele u dve podgrupe. U prvoj su mere se zasnivaju na stvaranju hidrauličkih uslova pogodnih za pokretanje i transport nanosa (ispiranje), dok u drugu spadaju različite varijante iskopa materijala mehaničkim ili hidrauličkim putem.
- U četvrtoj grupi su **mere kojima se postiže kompenzacija zapremine** koja je izgubljena zasipanjem akumulacionog prostora. Ovo su radikalne mere, kao što je nadvišenje brane ili napuštanje zasutog jezera, uz formiranje nove akumulacije ili dovođenje vode do korisnika na drugi način.

Mogućnosti za primenu bilo koje od pomenutih mera su obično limitirane, zbog brojnih tehničkih, ekonomskih i ekoloških ograničenja, kao što su: postojanje pogodno postavljenih temeljnih ispusta, dovoljne količine vode za ispiranje, karakteristike nanosa i sliva akumulacije, namena i režim rada akumulacije, posledice koje mogu nastati usled ispiranja ili deponovanja izbagerovanog nanosa, posledice primene mera koje se kose sa režimom rada akumulacije, uticaj primenjenih mera na životnu sredinu i institucionalna i politička ograničenja.

Treba imati u vidu da ne postoji metoda upravljanja nanosom koja bi sama bila dovoljna za očuvanje korisne zapremine akumulacije. Naprotiv, samo povezivanjem mera u integralnu i koordiniranu strategiju može se: (1) smanjiti brzina zasipanja akumulacionog prostora i (2) postići relativna ravnoteža između ulaznih i izlaznih količina nanosa i time produžiti vek akumulacije.

20.6.1 Mere za smanjenje ulaza nanosa u akumulaciju

Zasipanje akumulacija nanosom je neminovan proces, jer svi prirodni vodotoci transportuju nanos. Dinamika zasipanja zavisi od intenziteta transporta nanosa u rečnom toku, na kome je akumulacija formirana. Otuda proizilazi da se smanjenje ulaza nanosa u akumulaciju može postići na dva načina: protiverozionim uređenjem gravitirajućeg sliva ili skretanjem nanosa van akumulacije (“sediment bypass”).

20.6.1.1 Protiverozione mere i radovi

Osnovne komponente kompleksnog prirodnog procesa, koji se odvija u svim rečnim slivovima su eroziona produkcija nanosa, usled spiranja zemljišta u slivu i transport erodiranog materijala kroz hidrografsku mrežu. Iz toga proizilazi da su osnovne mere za smanjenje ulaza nanosa u akumulacije: (a) kontrola erozionih erozionih procesa u rečnom slivu i (b) kontrola transportnih procesa u slivu koji gravitira akumulaciji.

Kontrola erozionih procesa u rečnim slivovima se postiže bioloških radova (pošumljavanje, zatravljivanje, melioracije šuma i pašnjaka) i biotehničkih radova (terasiranje zemljišta, izgradnja konturnih rovova i zidića, protiveroziona agrotehnika: obrada po konturama, duboko oranje, gusto sađenje biljaka itd).

Kombinacijom bioloških i biotehničkih mera može se postići značajno smanjenje erozione produkcije nanosa u slivu. Pored primarnog efekta na mehanizam spiranja tla, protiverozionim merama se postiže i sekundarni efekat povećanja retenzije nanosa u slivu. Kao što je poznato, sav erodirani materijal sa slivnog područja ne dospeva do glavne hidrografske mreže, već se jedan deo zadržava u slivu, usled uticaja konfiguracije terena i vegetacije. Povećanjem retenzije erozionog materijala, usled efekta protiverozionih radova,

smanjuje se ulaz u hidrografsku mrežu sliva. Na taj način se postiže i redukcija pronosa nanosa na vodotoku na kome je izgrađena (ili planirana) akumulacija.

Kontrola transportnih procesa u hidrografskoj mreži sliva podrazumeva dva osnovna cilja: (a) redukciju ulaza vučenog nanosa iz bujičnih pritoka u glavni vodotok, pomoću sistema bujičarskih pregrada i (b) kontrolu fluvijalne erozije, pomoću regulacionih građevina.

Bujičarske pregrade su najznačajniji i najviše primenjivani objekti u oblasti uređenja bujičnih vodotoka. Sistem pregrada ima značajan efekat na transportne procese u bujičnim vodotocima. U deponijskom prostoru uzvodno od pregrada zadržava se vučeni nanos i time smanjuje ulaz nanosa u glavni vodotok. S druge strane, izgradnjom sistema bujičarskih pregrada postiže se kaskadiranje uzdužnog profila vodotoka, čime se smanjuje pad i transportna sposobnost toka za nanos. Dvostrukim efektom sistema bujičarskih pregrada ostvaruje se značajna redukcija ulaza nanosa iz bujičnih tokova u glavni tok, na kome je izgrađena akumulacija.

Međutim, podaci istraživanja pokazuju da bujičarske pregrade imaju vremenski ograničen efekat. Naime, u zaplavu se zadržavaju samo krupne frakcije nanosa, dok se na potezu nizvodno od bujičarske pregrade ubrzo uspostavlja prirodni transportni kapacitet vodotoka. Nanos iz zaplava iza pregrade se mora uklanjati povremeno, što predstavlja problem i trošak.

Prema svetskoj literaturi, jedan od najefikasnijih načina za redukciju ulaza nanosa u akumulaciju su biljne zavese. Biljnu zavesu čini vegetacija gusto posađena u rečnom koritu uzvodno od akumulacije, koja usporava rečni tok i izaziva istaložavanje nanosa u tom prostoru, sprečavajući ga da uđe u neposrednu akumulaciju. Biljne zavese nemaju nikakvog efekta u slučaju strmih padova vodotoka.

Kako ova mera zaštite akumulacija do sada nije korišćena u domaćoj praksi, treba istaći da biljne zavese imaju određene prednosti i negativne efekte. Najznačajnija prednost biljnih zavesa je činjenica da ne zahtevaju veća ulaganja. Međutim, biljke u zavesi troše znatne količine vode za evapotranspiraciju, mogu da se nekontrolisano prošire po okolnom terenu i da budu oštećene/iščupane pri velikim vodama. Zadržavanje nanosa u zoni vegetacije će na uzvodnom potezu vodotoka izazvati određene nepovoljne posledice (rast nivoa podzemnih voda i dopunski uspor pri velikim vodama). Zbog toga biljne zavese ne treba primenjivati kada je područje uzvodno od akumulacije naseljeno.

Pozitivni primeri primene ove mere zaštite se navode u literaturi. Biljna zavesa dimenzija 4 km x 15 km uzvodno od kineske akumulacije Hongshan (zapremine $2{,}5 \cdot 10^9$ m^3) zadržava 90% količina nanosa koje se kreću ka akumulaciji. U SAD su za zaštitu akumulacija Elephant Butte i jezera MacMillan izvedene biljne zavese od tamarisovog drveta. Ovom merom je početna vrednost istaložavanja nanosa u akumulaciji redukovana na jednu trećinu, ali je preteran razvoj vegetacije praktično onemogućio ulaz vode u akumulaciju.

Fluvijalna erozija (erozija obala i dna vodotoka) takođe predstavlja vrlo značajan izvor nanosa koji dospeva u akumulaciju, te za njenu kontrolu treba primeniti tehničke mere - izgradnju regulacionih građevina (obaloutvrda, pragova i ostalih objekata).

Postizanje dugoročnih ciljeva se može postići samo implementacijom sveobuhvatnog programa protiverozionih mera i radova. S obzirom na suštinsku povezanost fenomena erozije i transporta nanosa, kontrola erozionih i transportnih procesa mora biti integralno tretirana i međusobno koordinirana i sinhronizovana. Prema tome, pri razmatranju i planiranju mera za zaštitu budućih akumulacija od zasipanja nanosom, neophodna je primena savremenog koncepta “upravljanja nanosom”.

Dosadašnja svetska iskustva, koja počivaju na analizi erozionih procesa u dužem periodu, pokazuju da postoji veoma kompleksna veza između erozije u slivu i ulaza nanosa u akumulaciju. Konstatuje se da je primena protiverozionih mera najefikasnija i najjeftinija mera zaštite akumulacija koje imaju male slivove (površine manje od 150 km^2), jer omogućava smanjenje ulaza nanosa za 30 do 70%.

Primer: U našoj zemlji se, kao pozitivan primer, može navesti akumulacija "Grošnica" na Grošničkoj reci (kod Kragujevca), koja je izgrađena je 1938. godine. Gravitirajući sliv je površine 30 km^2 , dok je početna zapremina akumulacije iznosila $2 \cdot 10^6$ m^3. U periodu 1938-1950. godine, akumulacija je izgubila oko 20% svoje zapremine, usled zasipanja nanosom. Specifični ulaz nanosa iz sliva je iznosio 900 m^3/km^2 god. Tokom šezdesetih godina, u slivu akumulacije su preduzeti intenzivni protiverozioni radovi, koji su obuhvatili biološke i biotehničke mere. Pored toga, izgrađene su bujičarske pregrade na bujičnim pritokama Grošničke reke, u cilju kontrole transportnih procesa. Sumaran efekat izvršenih radova na kontroli ulaza nanosa u akumulaciju bilo je znatno smanjenje intenziteta zasipanja (150 m^3/km^2 god).

Svetska iskustva pokazuju da primena protiverozionih mera na većim slivovima (površine veće od 2500 km^2) nema tako evidentne efekte. Zbog toga treba istaći da je, u slučaju većih slivova, osnovno da se identifikuju glavni izvori nanosa i njihova veza sa količinama nanosa koje dospevaju u akumulaciju. Na taj način se može smanjiti prostor na kome je potrebno primeniti protiverozione mere i time redukovati troškovi uređenja sliva.

Iako su programi protiverozionog uređenja sliva u cilju kontrole zasipanja akumulacija u ranijem periodu započinjani sa velikim očekivanjima, u novije vreme se u svetu ova mera više ne smatra primarnom iz više razloga: (1) radovi izvedeni u okviru protiverozionog uređenja sliva mogu biti uništeni tektonskim aktivnostima ili pri prolasku ekstremno velikih voda, (2) protiveroziono uređenje sliva je skupo i teško se organizuje, (3) potreban je dug period vremena da bi se protiverozionim uređenjem sliva smanjilo dospeće nanosa u akumulaciju, jer je odgovor sliva spor i kompleksan i (4) protiverozionim radovima se menja priroda zemljišta, kao i režim oticaja, što u nekim slučajevima može biti nepovoljno.

Protiveroziono uređenje sliva je mera zaštite koju je opravdano primeniti u slučaju novih akumulacija. Od posebnog je značaja obezbediti sinhronizaciju aktivnosti na izgradnji objekata i protiverozionom uređenju sliva. Biološke mere zaštite od erozije (pre svega pošumljavanje) zahtevaju dosta vremena da bi se manifestovao njihov efekat, tako da je sa njihovom primenom potrebno započeti znatno pre nego što započne izgradnja objekata.

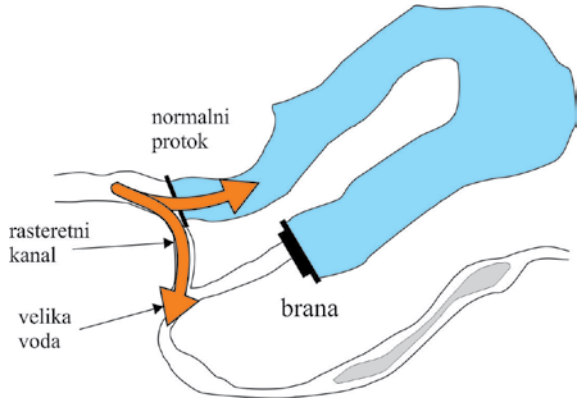
20.6.1.2 Skretanje nanosa

Zaštita malih akumulacija, izgrađenih na vodotocima sa izuzetno velikim količinama nanosa, može se postići i skretanjem nanosa van akumulacije ("sediment bypass"). Metoda podrazumeva da se u akumulaciju upuštaju male vode, koji nisu opterećene velikim količinama nanosa, dok se velike vode skreću van akumulacije. Primenu ove metode omogućuje izvođenje obilaznog kanala ili tunela oko akumulacije, koji se uključuje u evakuaciju velikih voda opterećenih nanosom (slika 20.13). Da bi ovaj metod zaštite akumulacije od nanosa bio efikasan, potrebno je dobro planiranje i upravljanje sistemom.

Evidentno je da izgradnja obilaznih kanala ili tunela zahteva velika investiciona ulaganja. Primenjuje se samo kada je, zbog posebno povoljnih topografskih uslova, izgradnja kraćih objekata ekonomski opravdana. U svetu postoje brojni pozitivni primeri primene ove metode

zaštite akumulacija (više akumulacija u Švajcarskoj, Austriji, Turkmeniji, Kini, Južnoj Africi).

Ova mera zaštite se implicitno primenjuje i kada akumulacija nije izgrađena na samom vodotoku, već se vode prebacuju u njen prostor gravitaciono ili pumpanjem. Naime, zahvaćena voda ima znatno manju koncentraciju nanosa nego voda u samom vodotoku. Pozitivan primer akumulacije koja nije ugrožena zasipanjem, jer se snabdeva vodom iz gravitacionih dovodnih kanala i prepumpavanjem, je Vlasinsko jezero.



Slika 20.13: Skretanje nanosa (Izvor: hydroworld.com)

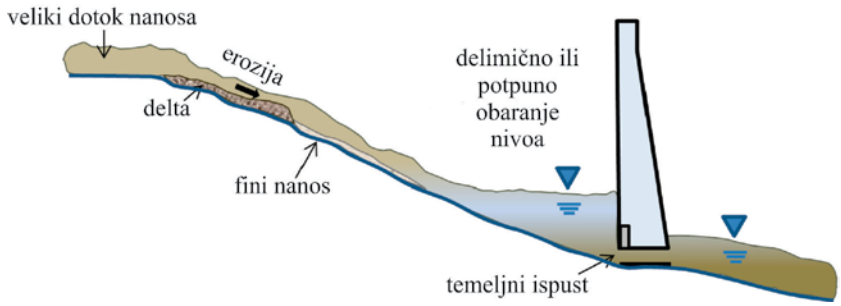
20.6.2 Mere za sprečavanje istaložavanja nanosa u akumulaciji

Ova kategorija obuhvata mere koje se primenjuju u cilju obezbeđenja uslova za nesmetan transport suspendovanog nanosa kroz akumulaciju, pre nego što se stvore uslovi za njegovo istaložavanje. To su: (1) ispuštanje vode opterećene velikom količinom nanosa ("sluicing") i (2) ispuštanje mutnih struja ("venting density currents"). Češće se primenjuju mere iz prve kategorije nego iz druge, jer se nanos kroz prostor akumulacije uglavnom kreće u obliku koloidne ili turbulentne suspenzije, a mutne struje se javljaju samo u posebnim uslovima.

Ispuštanje vode i nanosa je mnogo efikasnije nego ispiranje već istaloženog nanosa. Naime, brzine potrebne za pokretanje nanosa iz nevezanih naslaga su daleko veće nego brzine potrebne da bi se nanos održao u supenziji. Pritom treba istaći da je primena hidrauličkih metoda za pokretanje vezanih naslaga nanosa potpuno neefikasna.

20.6.2.1 Ispuštanje vode opterećene nanosom

Hidraulička metoda opisno nazvana "ispuštanje vode opterećene nanosom" se sastoji u prilagođavanju režima rada akumulacije potrebi da se voda sa visokom koncentracijom nanosa propusti pre nego što se stvore uslovi za istaložavanje nanosa. To se postiže prilagođavanjem režima rada brane hidrološkoj situaciji, tako da se velike vode ispuštaju (jer se tada transportuju najveće količine nanosa - čak do 80% godišnjih količina), a male usporavaju (jer je tada količina nanosa u suspenziji relativno mala).



Slika 20.14: Ispuštanje vode opterećene nanosom [23]

U periodu velikih voda se, otvaranjem temeljnih ispusta, obara nivo vode i održavaju velike brzine u akumulaciji, potrebne da se čestice nanosa zadrže u suspenziji i propuste nizvodno (slika 20.14). Kako su koncentracije suspendovanog nanosa najčešće daleko veće u fazi porasta hidrograma nego u fazi opadanja, u suštini je dovoljno da se propusti vrh talasa, a zatim je moguće početi punjenje akumulacije.

Metoda je razvijena i prvi put primenjena šezdesetih godina u cilju kontrole zasipanja akumulacije Sanmenxia u Kini.

Danas se uspešno primenjuje u mnogim akumulacijama širom sveta (u akumulaciji Old Aswan u Egiptu, Roseires u Sudanu, Bhartgarh i Matatila u Indiji i dr.).

Slika 20.15: Ispuštanje vode opterećene nanosom kroz branu Xiaolangdi na Žutoj reci, Kina (Izvor: absolutechinatours.com)

Međutim, ispuštanje vode opterećene nanosom može biti u koliziji sa potrebama korisnika vode i režimom eksploatacije akumulacije. Zbog toga se primenjuje samo ako postoji više vode nego što je potrebno za planirano korišćenje akumulacije (na pr. proizvodnju električne energije).

Da bi se metoda "ispuštanje vode opterećene nanosom" uspešno primenjivala za kontrolu zasipanja akumulacije potrebno je da: (1) postoje dovoljne količine vode na raspolaganju; (2) na brani postoje temeljni ispusti dovoljnog kapaciteta, na koti bliskoj koti prirodnog dna vodotoka; (3) se akumulacija celom dužinom nalazi u klisuri; (4) postoji mogućnost dobre procene početka i trajanja operacije; (5) dominantan vid kretanja nanosa je suspendovani nanos; (6) postoji dobar sistem prognoze velikih voda.

Potrebu za ovim vidom upravljanja nanosom u akumulaciji treba sagledati već u fazi projektovanja, jer tada mogu da se dimenzionišu adekvatni evakuacioni organi. Za njihovo naknadno izvođenje su potrebna znatno veća ulaganja (iako postoje primeri da je, u nekim akumulacijama, i to bilo neophodno).

Investiciona ulaganja za primenu ove metode zavise od broja, veličine i položaja evakuacionih organa. U principu, najbolji efekti bi se postigli kada bi i najveći poplavni talasi mogli da se propuste kroz akumulaciju bez smanjenja brzine toka. Međutim, takvo rešenje ne bi bilo ni praktično ni ekonomično, jer bi bilo potrebno izvođenje izuzetno velikih ispusta, a bilo bi i onemogućeno puno ekonomsko iskorišćenje akumulacije.

U praksi se najbolji efekti postižu sa ispustima blizu dna (koji su skuplji i teži za održavanje), a nešto lošiji sa evakuacionim organima na višim kotama. Ukupan kapacitet ispusta može odgovarati 10-40% dvogodišnje velike vode, pa čak iznositi $Q_{50\%}$ ili $Q_{20\%}$. Temeljni ispusti obavezno moraju da budu opremljeni zatvaračima, radi kontrole isticanja vode i nanosa.

Ukoliko je brana opremljena adekvatnim evakuacionim organima, u eksploataciji se javljaju samo troškovi njihovog redovnog održavanja. Naime, javlja se problem abrazije ispusta i zatvarača, koja se može donekle smanjiti izborom odgovarajućeg tipa, oblika i dispozicije ispusta, kao i kvalitetnim izvođenjem i korišćenjem anti-abrazionih materijala za oblaganje. Takođe, prisutan je i trošak zbog ispuštanja vode, koja se ne akumulira za dalje korišćenje.

Ova metoda je najefikasnija kod uskih akumulacija, formiranih u klisuri ili ukoliko je odnos između zapremine akumulacije i ukupnog godišnjeg ulaza vode 0,3 do 0,7 (što je slučaj kod velikih, višenamenskih akumulacija). U slučaju širokih akumulacija, moguće je održati samo

ravnotežno stanje dna u kanalu u kome se odvija tečenje, dok će se na bivšim inundacijama istaložavati nanos.

Za primenu ove metode je neophodno da operatori na brani budu dobro obučeni i da poštuju prethodno razrađen operativni plan (vreme operacije, trajanje). Stoga je od primarnog značaja da postoji mogućnost da se sa sigurnošću prognozira hidrogram talasa na profilu brane, kako bi se odmah po prolasku pika pristupilo punjenju akumulacije.

Projektovanje akumulacije u kojoj se primenjuje "ispuštanje vode opterećene nanosom" kao režim rada akumulacije se odvija u više faza. Najpre treba doneti odluku koji je merodavni talas na koji treba dimenzionisati ispusne organe, a zatim utvrditi u kojim uslovima se mogu uspostaviti potrebni uslovi za transport nanosa kroz akumulaciju. Kako se transportni kapacitet za nanos smanjuje u zoni uspora od akumulacije, raspoložive količine nanosa ne zavise više od ulaznih količina već od transportnog kapaciteta. Za ove uslove se može uspostaviti jednačina koja povezuje koncentraciju suspendovanog nanosa i energije toka. Maksimalni nivo u akumulaciji pri kome je moguće izvesti operaciju ispuštanja se dobija na bazi proračuna transportnog kapaciteta za nanos u najkritičnijim profilima akumulacije, uz pretpostavljanje različitih nivoa gornje vode na brani. Poznat merodavni protok i nivo vode u profilu brane su parametri na bazi kojih se zatim projektuju ispusti sa zatvaračima, dovoljnog kapaciteta za uspešnu primenu ove tehnike.

Kada su kapaciteti temeljnih ispusta mali, ne može se održavati nizak nivo u akumulaciji, tako da će se nanos koji se erodira sa uzvodnog sektora akumulacije (delta) samo pomeriti bliže brani. Zbog toga se preporučuju nisko postavljeni i veliki ispusti, koji omogućavaju da se prirodni režim nanosa praktično ne remeti.

Prema nekim autorima, ukupan kapacitet temeljnih ispusta treba da je između 5-godišnje i 10-godišnje velike vode vodotoka. U Rusiji je uspešno ispiranje tri akumulacije sa hidroenergetskom namenom izvedeno pri proticajima koji su bili 2 do 4 puta veći od prosečnih godišnjih. Ova iskustva potvrđuju i autori iz drugih delova sveta.

Idealno bi bilo da se temeljni ispusti nalaze na koti prirodnog rečnog dna, odnosno vrlo blizu njega. Nisko postavljeni ispusti omogućavaju propuštanje najvećeg dela suspendovanog nanosa (s obzirom da su koncentracije najveće blizu dna) i krupnijeg nanosa koji se kreće po dnu. Takođe, nisko postavljeni ispusti omogućavaju da se, pri naglom obaranju nivoa ili pražnjenju akumulacije, inicira proces regresivne erozije već formiranih naslaga. U slučaju hidroenergetskih postrojenja, temeljne ispuste treba postaviti ispod ulaza u turbine, kako bi se sprečilo zasipanje.

Da bi se temeljni ispusti efikasno koristili u hidrauličkim metodama kontrole zasipanja akumulacije, potrebno temeljne ispuste locirati u prirodnom rečnom koritu i na konkavnoj obali rečne krivine.

Začepljenje ispusta nanosom ili otpadom se mora sprečavati svim raspoloživim sredstvima, jer može ozbiljno ugroziti njihovu funkciju. Sa tog aspekta, najkritičnije su početna i završna faza operacije ispuštanja vode. Ispusti se moraju zaštititi od abrazije koja nastaje pri propuštanju vode sa velikim količinama nanosa.

20.6.2.2 Ispuštanje mutnih struja

U posebnim uslovima se u akumulaciji formira podvodna struja više opterećena nanosom od okolne čistije vode (tzv. "mutna struja" ili "teška struja"), koja zbog velike gustine tone na dno i putuje nizvodno. Ukoliko su uslovi pogodni (uska akumulacija, sa strmim padom dna,

visok nivo i male brzine vode, visoka koncentracija finih čestica nanosa itd.) mutna struja će doći do profila brane, pa se može ispustiti kroz temeljne ispuste.

Prema podacima iz svetske literature, pravovremenim i efikasnim ispuštanjem mutnih struja može se umanjiti zasipanje akumulacije za 20-80%. Prednost metode u odnosu na druge hidrauličke metoda je ta što nije potrebno obaranje nivoa vode za njenu realizaciju.

Efikasnost operacije ispuštanja mutne struje zavisi od kapaciteta i visinskog položaja temeljnih ispusta (poželjno je da budu velikih dimenzija i kapaciteta, blizu dna), kao i protoka i nivoa vode u vreme operacije ispuštanja.

Ovo je vrlo teška operacija za izvođenje, jer treba prilagoditi vreme otvaranja i zatvaranja zatvarača na ispustima brzini putovanja mutne struje (u tom cilju se u Kini koristi specijalni uređaj za stalno praćenje koncentracije nanosa u profilu brane).

Nepotpuno poznavanje fenomena pojave i ponašanja mutnih struja je još uvek problem u primeni ove metode. Međutim, u novije vreme su razvijeni brojni matematički modeli kojima se može proceniti ponašanje mutnih struja u akumulaciji.

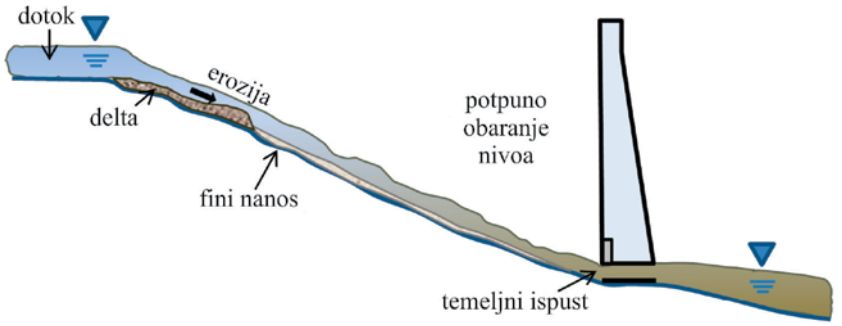
20.6.3 Mere za uklanjanje nanosnih naslaga

U ovu grupu metoda spadaju: ispiranje nanosa ("flushing") i iskop istaloženog materijala mehaničkim ili hidrauličkim putem ("dredging").

20.6.3.1 Ispiranje nanosa

Prilikom ispiranja nanosa se, otvaranjem ispusta na brani, u akumulaciji veštački povećava brzina vode do kritične vrednosti, pri kojoj se ranije istaloženi nanos pokreće i transportuje kroz temeljne ispuste. Efikasnost operacije se povećava obaranjem nivoa vode u akumulaciji sve dok se ne uspostave uslovi tečenja slični onima u neusporenom rečnom toku (slika 20.16), a najbolji rezultati se postižu potpunim prethodnim pražnjenjem akumulacije.

Tokom operacije ispiranja se u naslage nanosa useca novo korito. Periodičnim ponavljanjem operacije ispiranja, u dnu akumulacije će se formirati kanal sa približno istom širinom i padom dna kao što je imalo prirodno rečno korito. U akumulaciji tokom ispiranja dolazi do progresivne erozije naslaga (usmerene nizvodno) i regresivne erozije (u uzvodnom smeru). Kada se nivo akumulacije spusti ispod središnje tačke delte, javiće se regresivna erozija koja će rezultirati sa izjednačenjem padova uzvodne i nizvodne kosine delte. Posle toga nastupa progresivna erozija, s tim što se njen intenzitet smanjuje uporedo sa smanjenjem pada dna. Regresivna erozija je uglavnom dominantna pojava i stoga daleko značajnija za čišćenje akumulacije.



Slika 20.16: Ispiranje nanosa [23]

Ova tehnika je po mnogo čemu slična prethodno opisanoj tehnici "ispuštanja vode opterećene nanosom". Efikasnost operacije ispiranja zavisi od više faktora: geometrije akumulacije (pad, širina, dužina, zapremina), položaja, geometrije i kapaciteta ispusta, amplitude i trajanja obaranja nivoa vode, karakteristika nanosa, količine i kompozicije istaloženog nanosa, karakteristika ulaznog hidrograma i režima same operacije.

Za uspešnost operacije ispiranja nanosa istaloženog u akumulaciji potrebni su određeni uslovi:

- U akumulaciji tokom ispiranja treba u dužem periodu održavati uslove slične prirodnim, što se postiže obaranjem nivoa vode na nisku kotu, uz eventualne manje fluktuacije nivoa kako bi se pokrenuo nanos. Za održavanje konstantnog nivoa tokom dužeg vremena potreban je određen kapacitet ispusta, a najbolje više ispusta velikih dimenzija, na koti bliskoj originalnom rečnom dnu. Takođe, potreban je protok bar 2 puta veći od srednjeg godišnjeg protoka vodotoka, odnosno talas velikih voda veće zapremine (oko 1/10 zapremine ukupnog godišnjeg doticaja);
- Pogodna geometrija akumulacije: mala zapremina u odnosu na godišnji dotok i mala dužina;
- Pravilan hidrološki ciklus vodotoka, sa poznatim periodima u kojima se mogu očekivati velike vode (na pr. snežni režim formiranja velikih voda, sa talasima u prolećnom periodu);
- Povoljna krupnoća nanosa, jer je daleko teže pokrenuti krupan nanos nego fini. Krupan nanos se nalazi istaložen u delti, koja napreduje od uzvodnog kraja akumulacije ka brani, a njen položaj zavisi od starosti akumulacije i intenziteta procesa. Ukoliko bi se posmatrala samo krupnoća nanosa, najverovatnije je da će se ispiranjem uspešno ukloniti naslage finog peska i krupnijih frakcija prašine;
- U slučaju velikih reka podužni pad dna 1-2‰, a kod manjih reka 2-5‰;
- Istaložen nanos nije konsolidovan (metoda je primenljiva samo za uklanjanje rastresitih naslaga nanosa), a bolji efekat se postiže ukoliko se u nekonsolidovane nanosne naslage ubrizgava voda ili vazduh. Neophodna su česta ispiranja akumulacije, kako bi se sprečila konsolidacija nanosa koji se istaloži u međuvremenu. U nekim akumulacijama se se nanos ispira najmanje jednom godišnje, a u drugima jednom u 3-5 godina;
- Akumulacija je relativno uska (prema nekim autorima, maksimalna širina akumulacije u kojoj se može uspešno izvesti ispiranje nanosa je 300 m).

Dosadašnja iskustva sa ispiranjem nanosa iz akumulacija su vrlo različita. Dok je u nekim slučajevima postignut zadovoljavajući uspeh, često se postižu samo ograničeni pa čak i nikakvi efekti. Na osnovu ovih iskustava se mogu izvesti sledeći glavni zaključci o uslovima potrebnim za uspešno ispiranje nanosa iz jedne akumulacije:

- Sveobuhvatno poznavanje parametara hidrološkog režima i režima nanosa je neophodno da bi se planirala uspešna operacija ispiranja nanosa, kako u slučaju projektovane tako i u slučaju postojeće akumulacije (ovde je moguće koristiti i iskustva iz prethodnih pokušaja);
- Što je manja akumulacija veća je verovatnoća da će ispiranje biti uspešno, sa značajnim povećanjem korisne zapremine;
- Ispiranje nanosa je nephodna mera za dugoročno održanje korisne zapremine u slučaju da se usled zasipanja nanosom godišnje gubi 1% do 2% početne korisne zapremine;

- Oblik akumulacije može biti vrlo značajan, sa aspekta izvodljivosti efikasnog ispiranja. U uskim akumulacijama sa strmim bokovima i velikim podužnim padom je najlakše izvesti operaciju ispiranja nanosa. Široke akumulacije u čiji prostor su uključene i bivše rečne inundacije se ne mogu efikasno ispirati, jer ovi delovi akumulacije nisu u potpunosti protočni, a naslage nanosa u njima se brzo konsoliduju;
- Efikasnije je da se pre ispiranja potpuno isprazni akumulacija nego da se samo obore nivoi vode;
- Efikasno ispiranje moguće je samo ako postoje nisko postavljeni ispusti dovoljno velikog kapaciteta, koji omogućava održavanje niskih nivoa vode u akumulaciji tokom perioda godine koji je planiran za sprovođenje operacije ispiranja;
- Određene fluktuacije nivoa i proticaja vode tokom operacije ispiranja akumulacije mogu da doprinesu njenoj uspešnosti, jer izazivaju eroziju kosina sprudova i povećavaju transport nanosa. Usecanje poprečnih i podužnih kanala kroz nanosne naslage može se poboljšati efikasnost ispiranja nanosa iz velikih akumulacija ili iz delova akumulacije koji su udaljeni od glavnog toka;
- Mogući nepovoljni uticaji ispiranja na sektor vodotoka nizvodno od akumulacije mogu biti ograničavajući faktor, pa čak i potpuno onemogućiti primenu ove tehnike;
- Osnovno za uspešnost operacije je korektno odrediti početak, trajanje i frekvenciju ispiranja. Ispiranje treba često izvoditi, da bi se sprečila konsolidacija nanosnih naslaga. Učestalost ove operacije zavisi od intenziteta istaložavanja i utvrđenih karakteristika nanosnih naslaga.

Nepovoljne posledice ispiranja, praćenog značajnim povećanjem pronosa nanosa, su:

- Zasipanje korita, pogoršanje kvaliteta vode i drugih ekoloških uslova na nizvodnom potezu vodotoka. Zbog zakonskih propisa, kojima se propisuje maksimalno dozvoljena koncentracija nanosa u vodi koja se ispušta iz akumulacije, u evropskim zemljama se ova metoda restriktivno primenjuje;
- Velike brzine vode opterećene visokom koncentracijom nanosa izazivaju oštećenja evakuacionih organa;
- Obaranje nivoa vode može izazvati klizanje kosina obala akumulacije ili kosina istaloženih nanosnih masa i smanjenje kapaciteta ili čak začepljenje ispusta. Ovo se sprečava sukcesivnim smenjivanjem faza ispuštanja i usporavanja vode, tako da se ublažava nagib kosina naslaga i njihovo rušenje prolongira u vremenu i prostoru. Moguć je i nepovoljan uticaj naglog obaranja nivoa na stabilnost brane, posebno ako je od nasutog materijala.

Ova tehnika nije pogodna za akumulacije sa hidroenergetskom namenom. Proizvodnja električne energije se, naime, znatno smanjuje usled dugotrajnog obaranja nivoa vode, što je u koliziji sa zahtevima korisnika akumulacije.

Nakon delimičnog ili potpunog uklanjanja istaloženog nanosa, ova metoda se najčešće kombinuje sa ispuštanjem velikih voda i time obezbeđuje stalna kontrola zasipanja akumulacije. Širom sveta postoje primeri uspešnog održanja akumulacionog prostora kombinacijom ovih metoda u dugogodišnjem periodu. U slučaju primene kombinacije ispuštanje/ispiranje, ispiranje je potrebno izvoditi znatno ređe.

I pored navedenih problema, smatra se da je ispiranje nanosa najefikasniji i najjeftiniji način uklanjanja nanosa istaloženog u akumulaciji. Direktni troškovi su vezani samo za održavanje evakuacionih organa. Indirektne troškove (nastale usled obaranja nivoa vode, ispuštanja

velikih količina vode ili potpunog pražnjenja akumulacije) trpe korisnici akumulacije, ali se to kompenzuje ponovnim uspostavljanjem korisne zapremine akumulacije.

Potreban uslov za primenu ove metode je sagledavanje neophodnosti ispiranja (kao i ispuštanja vode opterećene nanosom) već u fazi pripreme projekta, kao i projektovanje i izgradnja odgovarajućih evakuacionih organa. U tom cilju, do danas je u svetu razvijen veliki broj različitih metoda, koje se koriste za modeliranje procesa ispiranja nanosa iz akumulacije i dimenzionisanje evakuacionih organa.

Međutim, dešava se u praksi da korisnici shvate da je potrebno rekonstruisati objekat kako bi se obezbedili uslovi za ispiranje nanosa. Naknadna izgradnja adekvatnih ispusnih objekata postaje interesantna kod akumulacija koje su izgubile 40-60% prvobitne korisne zapremine, jer troškovi ovih radova ne prevazilaze 10-30% troškova izgradnje nove brane sa akumulacijom istog kapaciteta.

Za adekvatno projektovanje objekata koji će se koristiti za ispiranje nanosa iz projektovane ili postojeće akumulacije potrebno je sprovesti vrlo obimna i ozbiljna istraživanja, koja obuhvataju:

- **Determinisanje položaja i tipa ispusta:** Ovi objekti moraju da podnesu velike brzine tečenja vode koja je opterećena visokom koncentracijom nanosa. Ovakav tok ima veliku abrazivnu moć, pa ispusti moraju da imaju jaku čeličnu oblogu da bi se sprečila preterana oštećenja. Zbog toga je potrebno da ispusni objekti budu kratki, bez obzira da li je u pitanju ispust u telu brane ili relativno kratak tunel ili kanal. Objekti za disipaciju energije na nizvodnom kraju objekta su neophodni. Treba voditi računa da se voda opterećena nanosom ispušta nizvodno od ispusta hidroelektrane, da ne bi došlo do lokalnog istaložavanja nanosa u toj zoni, koje bi moglo da smanji proizvodnju energije.
- **Snimanje topografije akumulacije:** Potrebno da bi se utvrdilo da li akumulacija ima pogodan oblik za uspešnu primenu tehnike ispiranja nanosa. Snimanjem se, takođe, obezbeđuju podaci za numeričko modeliranje procesa ispiranja akumulacije.
- **Hidrološka istraživanja:** S obzirom da su za uspešno hidrauličko uklanjanje nanosa iz akumulacije potrebni određeni hidrološko-hidraulički uslovi, veoma je važno poznavanje hidrološkog režima vodotoka. Raspoložive količine vode i vreme pojave talasa velikih voda može se utvrditi samo na osnovu istorijskog niza podataka (min. 30 godina) o protocima vodotoka. Sa hidrološkog aspekta, idealni uslovi za ispiranje postoje na vodotoku sa godišnjim protokom koji je najmanje tri puta veći od prvobitne zapremine akumulacije i jasnim razgraničenjem vodnih i sušnih perioda u godini.
- **Istraživanje nanosa:** Da bi se pouzdano utvrdile količine i karakteristike nanosa koji ulazi u akumulaciju, potrebno je više godina istraživanja. Neophodno je organizovati osmatranja i merenja parametara vode i nanosa na profilu neposredno uzvodno od akumulacije, kako bi se uspostavila korelacija između ulaza vode i ulaza suspendovanog nanosa u akumulaciju. Pritom se javljaju određeni problemi jer je teško uspostaviti pouzdanu i jednoznačnu vezu za determinisanje ulaza suspendovanog nanosa, a praktično nemoguće pouzdano proceniti količine tranzitnog i vučenog nanosa.

U slučaju postojeće akumulacije se, na bazi merenja količine i vrste nanosa istaloženog u prostoru akumulacije, mogu obezbediti pouzdanija saznanja o prirodi procesa.

U tom slučaju neophodno je uzeti uzorke materijala iz dna akumulacije i vodotoka. Pouzdani podaci o granulometrijskom sastavu i specifičnoj težini nanosnih naslaga su neophodni da bi se definisali ulazni podaci za numeričku simulaciju kretanja nanosa u akumulaciji tokom operacije ispiranja.

Matematičko modeliranje je osnov za detaljno projektovanje ispusnih objekata. Modeliranjem se ispituje kako će se nanos u akumulaciji ponašati i daje prognozu količina i osobina nanosa koji će iz akumulacije preći na nizvodni sektor vodotoka. Za modeliranje se najčešće koriste jednodimenzionalni modeli, sa kvazi-dvodimenzionalnom simulacijom kanala koji se razvija tokom operacije ispiranja. Ovakvi modeli su efikasni i omogućavaju prognozu ponašanja akumulacije u toku perioda predviđenog za ispiranje. Kada se primenjuju za modeliranje procesa u postojećim akumulacijama imaju i veću tačnost nego u slučaju planiranih, jer postoji mogućnost iskorišćenja podataka merenja za verifikaciju modela.

Prva saznanja o tome da li će transportni kapacitet za nanos tokom operacije ispiranja biti veći od kritične vrednosti, potrebne za eroziju nekonsolidovanih naslaga, može se dobiti na bazi sledećih jednostavnih pokazatelja:

Kada je u akumulaciji strujanje turbulentno (što je najčešći slučaj)

$$\frac{\sqrt{g \cdot H \cdot J}}{\nu} d_{50} > 13 \qquad (20\text{-}8)$$

nanos će se pokrenuti ukoliko je:

$$\frac{\sqrt{g \cdot H \cdot J}}{w_s} > 0{,}12 \qquad (20\text{-}9)$$

U uslovima laminarnog strujanja

$$\frac{\sqrt{g \cdot H \cdot J}}{\nu} d_{50} < 13 \qquad (20\text{-}10)$$

transport nevezanih čestica će se započeti ako je:

$$\frac{\sqrt{g \cdot H \cdot J}}{W_s} > \frac{1{,}6}{\frac{\sqrt{g \cdot H \cdot J} \cdot d_{50}}{\nu}} \qquad (20\text{-}11)$$

gde je:

g - gravitaciono ubrzanje, H - dubina vode (m), J - nagib linije energije $\left(= \frac{v^2 \cdot n^2}{R^{4/3}}\right)$,

"ν" - koeficijent kinematske viskoznosti fluida (m^2/s), d_{50} - srednja krupnoća nanosa (m), W_s - hidraulička krupnoća nanosa koga treba ukloniti (m/s).

Dok se uslovi pod kojima se može pokrenuti rastresiti nanos mogu relativno lako proceniti, veoma je teško kvantifikovati kritične uslove u slučaju konsolidovanih nanosnih naslaga. Kritična sila za pokretanje konsolidovanog nanosa može se izraziti u funkciji od parametra $(gHJ_t)^{1/2}$ odnosno tzv. brzine trenja.

Za matematičko modeliranje procesa ispiranja akumulacija u kojima su formirane naslage veoma finog nanosa (prašinastog i glinovitog sastava), kao granice istaložavanja i erozije predlažu se vrednosti vučne sile 0,5-1,0 N/m^2 odnosno 5-10 N/m^2. Vrednost kritične vučne sile se povećava sa starošću i konsolidacijom naslaga.

20.6.3.2 Iskop - bagerovanje istaloženog nanosa

Iako je bagerovanje skuplje od drugih tehnika za uklanjanje nanosnih naslaga, uobičajeno se koristi za prevenciju zasipanja lokaliteta značajnih za funkciju akumulacije, kao što su ispusti i vodozahvati. Za ponovno uspostavljanje korisne zapremine se koristi samo retko, u slučaju malih akumulacija, i to samo ukoliko nije moguća primena daleko jeftinijih, hidrauličkih metoda (zbog nedostatka evakuacionih organa na brani ili mogućih negativnih ekoloških posledica na nizvodnom sektoru vodotoka).

U novije vreme se bagerovanje, međutim, sve češće koristi. Naime, formiranje novih akumulacija je sve skuplje i sve manje moguće, zbog ekoloških, socijalnih i ekonomskih ograničenja koja se pritom postavljaju, kao i zbog činjenice da je preostalo malo pogodnih lokaliteta za izgradnju objekata. Istovremeno, u novije vreme su razvijene napredne tehnologije bagerovanja, kojima je smanjena jedinična cena iskopa, tako da se danas bagerovanje može smatrati relativno pogodnim načinom za rehabilitaciju korisnog prostora akumulacija.

Operacija bagerovanja se može vršiti sa obale ili sa vode. Suvozemni mehanički bageri se koriste za eksploataciju krupnijeg materijala (šljunka), koji se zaustavlja uglavnom na uzvodnom kraju akumulacije. Za iskop materijala ispod vode, mogu se koristiti, pored mehaničkih, i različiti tipovi hidrauličkih bagera (slika 20.17). Pritom je iskop suvozemnom mehanizacijom uvek skuplji od bagerovanja sa vode.

Slika 20.17: Čišćenje zasutog prostora u akumulaciji hidrauličkim bagerom (Izvor: prolake.sk)

Generalno, kod bagerovanja se razlikuju tri faze: iskop, transport i deponovanje materijala van akumulacije. Najveći problem kod bagerovanja može biti izbor, sa tehničkog i ekološkog aspekta, pogodne lokacije za deponovanje materijala. Najčešće se materijal deponuje nizvodno od brane (u specijalnim zonama za nasipanje ili u samom vodotoku) ili duž obala akumulacije, a može se koristiti i za poboljšanje kvaliteta poljoprivrednog zemljišta.

U nekim evropskim zemljama, gde ispuštanje vode sa visokom koncentracijom nanosa nije dozvoljeno zbog zakonskih ograničenja, primenjuje sa bagerovanje materijala iz akumulacije i njegov transport do fizičkog ili fizičko-hemijskog postrojenja, gde se izdvajaju različite frakcije nanosa, a voda sa dozvoljenom količinom nanosa ispušta u vodotok ili vraća u akumulaciju.

I pored visokih direktnih troškova bagerovanja (koji su ponekad praćeni i troškovima zauzimanja teritorije za deponiju), bagerovanje ima i određene prednosti. Naime, izaziva zanemarljiv gubitak vode iz akumulacije u odnosu na ispiranje. Pored toga, fine frakcije se mogu iskoristiti u poljoprivredi (za poboljšanje karakteristika zemljišta), a krupne frakcije materijala u građevinarstvu.

Uslovi i ograničenja od kojih zavisi izbor opreme i metode rada, kao i poduktivnost i troškovi bagerovanja, su brojni:

- Geotehničke karakteristike materijala. Naslage glinenih i prašinastih frakcija nanosa u dnu akumulacije obično imaju relativno veliku gustinu: 1300 do 1700 kg/m^3, uz koheziju veću od 10 kPa. Ni običan hidraulički bager-refuler, ni bager opremljen

mlazevima se ne mogu koristiti za iskop konsolidovanog, kohezivnog materijala. Iskustva pokazuju da se u tom slučaju naslage nanosa moraju mehaničkim putem dezintegrisati pre hidrauličkog iskopa.

- Geometrija (položaj i debljina) nanosnih naslaga utiče na troškove bagerovanja, jer od toga zavisi učestalost premeštanja mehanizacije.
- Količina i priroda nečistoća u nanosu (drveće i druge vrste otpadnog materijala), kao i prisustvo materijala koji mogu biti opasni za osoblje i opremu su takođe značajni.
- Pri primeni hidrauličkih bagera dolazi do određenog gubitka vode. Standardna mešavina i ima razmeru 1 nanosa : 4 vode, tako da ispuštanje vode nizvodno od akumulacije prouzrokuje i određen gubitak vode. Ovaj gubitak, koji je od značaja samo u aridnim područjima, može se izbeći na nekoliko načina: upotrebom mešavine vode i nanosa za melioracije zemljišta u priobalju, formiranjem posebnih deponija za izbagerovani nanos, iz kojih se voda vraća u akumulaciju ili primenom najnovijih bagera, kod kojih je odnos nanosa i vode manji.
- U akumulaciji se u vodnim periodima godine formiraju visoki nivoi vode. Stoga je bagerovanje najčešće ograničeno na sušni period godine. Takođe, za bagerovanje su nepogodne i varijacije nivoa u akumulaciji, bilo da su one posledica režima rada ili hidrološkog ulaza. Dubina sa koje se bageruje materijal konvencionalnom opremom je najčešće ograničena na 30 m.
- Ekološki uslovi i ograničenja, kao što je maksimalna dozvoljena mutnoća vode.
- Ograničenja vezana za pristup akumulaciji, transport i deponovanje izbagerovanog materijala.
- Ograničenja u vezi opreme za hidraulički iskop i transport (fleksibilni cevovodi prečnika 0,3 do 0,8 m, potisni cevovodi dužine 2 do 4 km, sa buster-stanicama duž cevovoda koje služe za održanje potrebnih gradijenata energije, brzine u potisnom cevovodu moraju biti 3-5 m/s, kako bi se sprečilo začepljenje itd.).
- Uslovi za deponovanje materijala su različiti. Najatraktivnija varijanta je da se nanos deponuje neposredno nizvodno od brane. Međutim, u toj varijanti se mora voditi računa da visoke koncentracije nanosa ne prouzrokuju ekološki problem. Takođe, nanos uklonjen iz korisnog prostora akumulacije se može deponovati u zoni mrtve zapremine ili u blizini akumulacije, u kasete formirane izgradnjom obodnih nasipa. Pored toga, moguće je da se pomoću sistema hidrociklona i filtera izdvoji voda iz mešavine, kako bi se omogućio dalji suvozemni transport (kamionima) i deponovanje dalje od mesta iskopa.

Uklanjanje celokupnih količina nanosa iz akumulacije nije neophodno. Potrebne količine se mogu definisati na osnovu količina vode koje su potrebne korisnicima, karakteristika sliva, ukupne količine istaloženog nanosa itd.

Mogućnosti komercijalne upotrebe materijala koji se bageruje iz akumulacije su vrlo široke. Zavisno od karakteristika, nanos se može iskoristiti za poboljšanje zemljišta, u poljoprivredi, proizvodnju cigala ili kao agregat za beton. Time se postiže smanjenje troškova čišćenja akumulacije, mada su troškovi transporta limitirajući faktor.

20.6.3.3 Hidro-aspirator ili sifon

Ovo je tehnika za uklanjanje istaloženog nanosnog materijala hidrauličkim putem, pri čemu se koristi energija vode odnosno razlika između nivoa gornje i donje vode. Nanos iz jezera se meša sa vodom i odvodi kroz cevovod koji je povezan sa temeljnim ispustom. Ova tehnika je

sve popularnija, naročito kod akumulacija male i srednje veličine, jer se koristi jednostavna i jeftina oprema, uz mali gubitak vode. Nije pogodna za uklanjanje velikih količina nanosa iz većih akumulacija ili iz plitkih akumulacija (razlika pritisaka nije dovoljna da pokrije gubitke na trenje u cevovodu).

20.6.4 Mere za kompenzaciju izgubljene zapremine

20.6.4.1 Nadvišenje brane

Nadvišenje brane je mera za ponovno, bar delimično, uspostavljanje korisnog prostora akumulacije. Povišenjem krune brane se kompenzira zapremina akumulacije koja je izgubljena usled istaložavanja nanosa. Međutim, iako ovo rešenje može da bude ekonomski povoljnije od drugih, to ne može biti i dugoročno rešenje problema zasipanja akumulacije, jer će se taj proces nastaviti.

U većini slučajeva nadvišenje brane nije moguće, jer je visina brane limitirana geološkim uslovima na pregradnom mestu. Troškovi ove mere su vrlo visoki, jer je, uz nadvišenje, potrebno izvesti i ojačanje brane, rekonstrukciju zahvatnih i ispusnih objekata i platiti troškove koji proističu iz povećanja površine jezera (gubitak poljoprivrednog zemljišta, izmeštanje naselja, puteva i dr.).

20.6.4.2 Dovođenje vode iz susednog sliva

Upravljanje vodnim resursom i upravljanje nanosom u akumulaciji su često u konfliktu, posebno u područjima siromašnim vodom. Ovaj problem se može prevazići prebacivanjem vode iz susednih slivova u akumulaciju. Naravno, uslov za to je da se ova mera može ekonomski opravdati i da susedni sliv raspolaže dovoljnom količinom vode.

20.7 Primena principa upravljanja nanosom u planiranju vodoprivrednih objekata

20.7.1 Izbor lokacije za branu

Prva, vrlo značajna mera vezane za kontrolu zasipanja akumulacije je izbor pogodne lokacije za branu. Naime, pored drugih tehničkih i ekonomskih parametara koji su značajni za izbor lokacije brane, treba poštovati i sledeće generalne preporuke:

- Sliv akumulacije treba da bude što manji, pod uslovom da omogućava ispunjenje zahteva korisnika za vodom;
- Treba izbegavati izgradnju objekata na vodotocima koji transportuju velike količine nanosa;
- U zoni uspora akumulacije ne treba da budu locirana veća naselja i infrastrukturni objekti;
- Topografija akumulacije treba da bude pogodna za primenu strategija upravljanja nanosom i kontrole zasipanja (pogodnije su akumulacije formirane u klisuri nego široke, plitke akumulacije sa dugim branama);
- Treba izvršiti optimizaciju zapremine akumulacije, kako bi se dobio pogodan odnos zapremine i ulaznih količina vode;

- Treba ozbiljno razmisliti o mogućnosti formiranja akumulacije van toka;
- U dimenzionisanju akumulacije uzeti u obzir taloženje nanosa.

20.7.2 Izbor strategije za kontrolu zasipanja akumulacije

Valorizacija planiranog vodoprivrednog projekta vrši se na bazi različitih kriterijuma (tehničkih, institucionalnih, ekonomskih i ekoloških). Analiza uticaja zasipanja akumulacije mora se bazirati na istim parametrima.

Dva empirijska parametra se koriste se za preliminarnu procenu režima rada akumulacije (tabela 20.1), kojim će se obezbediti kontrola zasipanja akumulacije. To su parametar Ψ:

$$\Psi = \frac{W_{ak}}{W_{vode}^{ulaz}} \tag{20-12}$$

i parametar Φ:

$$\Phi = \frac{W_{ak}}{W_{nan}} \tag{20-13}$$

gde je: W_{ak} - zapremina akumulacije, W_{vode}^{ulaz} - zapremina godišnjeg dotoka vode, W_{nan} - zapremina godišnjeg ulaza nanosa u akumulaciju.

Tabela 20.1: Uputstvo za izbor režima rada akumulacije i mera kontrole zasipanja

Φ	Ψ	Pogodan režim rada
> 50	> 0,2	Režim: Akumulisanje vode Ovaj režim omogućava visok nivo iskorišćenja dotoka u akumulaciju. Nivo vode u akumulaciji se može držati stalno na visokim kotama, iako će se zbog toga veći deo nanosa zadržavati u akumulaciji. Ovakav režim rada se primenjuje samo kada je ulaz nanosa mali, a akumulacija ima relativno veliku zapreminu.
30 - 50	0,1 – 0,2	Režim: Naizmenično akumulisanje vode i mere kontrole zasipanja Smenjuju se faze akumulisanja vode i faze u kojima se primenjuju mere kontrole taloženja nanosa (ispuštanje vode opterećene nanosom, ispiranje, ispuštanje mutnih struja).
< 20 -30	< 0,1	Režim: Stalna kontrola zasipanja Stalno se primenjuju mere za kontrolu nanosa - ispuštanje vode opterećene nanosom/ ispiranje akumulacije, tako što se u periodima velikih voda održava nivo vode na niskoj koti, a akumulira čista voda po prolasku velikih voda

Režim rada akumulacije se može menjati, u zavisnosti od gubitka zapremine. Početni režim tipa "akumulisanje vode" se može zameniti "naizmeničnim akumulisanjem i kontrolom zasipanja", kada gubitak zapremine dostigne određeni procenat. Režimi rada se, takođe, mogu prilagođavati hidrološkom ciklusu, tako da se u malovodnim godina voda akumulira, a u vodnim godinama primenjuju hidrauličke metode za kontrolu zasipanja.

Pravilno definisanje režima rada akumulacije je izuzetno ozbiljan zadatak. Na primer, za izbor karakterističnih nivoa akumulacije Tri klisure u Kini, korišćeno je više fizičkih i matematičkih modela, a istraživanje je trajalo 8 godina.

LITERATURA

1. Алексеевскии Н.И. (1998): Формирование и движение речних наносов, Московскии университет, Москва
https://www.twirpx.com/file/473389/

2. Andjelkovic I. (2001): Guidelines on non-structural measures in urban flood management, IHP-V, Technical Documents in Hydrology, No. 50, UNESCO, Paris
http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001240/124004e.pdf

3. Babić Mladenović M., Obušković Z., Knežević Z. (2003): Zasipanje akumulacija u Srbiji – problemi i pravci rešavanja, Vodoprivreda br. 205-206 (2003), str. 387-392
http://www.vodoprivreda.net/zasipanje-akumulacija-u-srbiji-problemi-i-pravci-resavanja-3/

4. Babic Mladenovic M., Jovanovic M., Knezevic Z. (2004): The Integrated Flood Management - The Karas River Case Study, 3rd ECRR International Conference on River Restoration in Europe – River restoration 2004, Principles, processes and practise, Zagreb, 17-21.05. 2004
http://www.ecrr.org/Portals/27/Publications/Proceedings/3rd_ERRC_2004/06_babic_mladenovic_jovanovic%20_knezevic.pdf

5. Babić-Mladenović M. (2006): Uticaj akumulacija na režim nanosa aluvijalnih vodotoka – primer đerdapske akumulacije - Doktorska disertacija, Građevinski fakultet u Beogradu

6. Babic Mladenovic M. (2007): Režim nanosa Dunav/Sediment Regime of the Danube River, Monografija, Zadužbina Andrejević – Posebna izdanja, Beograd

7. Babic-Mladenovic M. (2006): Metod za proračun pronosa nanosa na sektoru reke Dunav uzvodno od Novog Sada, Vodoprivreda 0350-0519, 39 (2007) 225-227 p. 105-118
http://www.vodoprivreda.net/wp-content/uploads/2014/08/metod.pdf

8. Babić Mladenović M., Ninković D. (2009): Hidromorfološke promene i upravljanje vodama, Vodoprivreda 0350-0519, 41 (2009) 240-242 p. 137-144
http://www.vodoprivreda.net/wp-content/uploads/2014/08/hidro.pdf

9. Babić Mladenović M., Petković S., Knežević Z. (2010): New Approach to River Engineering: Case of the Juzna Morava River in Serbia, Conference BALWOIS 2010, Ohrid, Republic of Macedonia
https://www.researchgate.net/publication/265995141_New_Approach_to_River_Engineering_Case_of_the_Juzna_Morava_River_in_Serbia

10. Babic Mladenovic M., Kolarov V., Damjanovic V. (2013): Sediment regime of the Danube River in Serbia, International Journal of Sediment Research, ISSN 1001-6279, Vol. 28, No. 4, pp. 470-485, 2013.
https://www.researchgate.net/publication/260043788_Sediment_regime_of_the_Danube_River_in_Serbia

11. Babić Mladenović M., Bekić D., Grošelj S., Mikoš M., Kupusović T., Oskoruš D., Petković S. (2014): Towards Sediment Management in the Sava River Basin, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management", ISSN 2217-5237, Vol. 4, No. 1, pp. 3-13, 2014. http://www.wrmjournal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=197&Itemid=209

12. Babić Mladenović M., Kolarov V. (2015): May 2014 Floods in Serbia, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management", ISSN 2217-5237, Izdavač: Srpsko društvo za zaštitu voda, Vol. 5, No. 1, pp. 3-8, 2015. http://www.wrmjournal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=256&Itemid=248

13. Babić Mladenović M., Kolarov V. (2016): River Basin Studies as a Basis for Flood Risk Management Planning: the Kolubara River Basin Case Study, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management", ISSN 2217-5237, Izdavač: Srpsko društvo za zaštitu voda, Vol. 6, No. 2, pp. 3-9, 2016. http://www.wrmjournal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=354&Itemid=288

14. Barnes H.H: Roughness Characteristics of Natural Channels, U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1849 https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp_1849/html/pdf.html

15. Beverage J. P. and Williams D. T. (1989): Comparison: US P-61 and Delft sediment samplers, J. Hydr. Eng., ASCE, VOl. 115, No. 12, 1702-1706 https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281989%29115%3A12%281702%29

16. Bogardi J. L. (1974): Sediment transport in alluvial streams, Akademiai Kiado, Budapest http://webapps.unitn.it/Biblioteca/it/Web/EngibankFile/315203.pdf

17. Breusers H.N.C., Nicollet G., Shen H.W. (1977): Local Scour around Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Research, Vol. 15 https://www.researchgate.net/publication/245327966_Local_Scour_Around_Cylindrical_Piers

18. Bruk, S. (1985): Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs, IHP-II Project, Unesco, Paris http://unesdoc.unesco.org/images/0011/001121/112133eo.pdf

19. Chow, V. T. (1959): Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company Inc., New York

20. Cowx. I. G., Welcomme R. L. (1998): Rehabilitation of rivers for fish, FAO http://www.ecrr.org/Portals/27/Rehabilitation_of_Rivers_for_Fish.pdf

21. Estrela T. et al. (2001): Sustainable water use in Europe, Part 3: Extreme hydrological events: floods and droughts, Environmental issue report No 21, European Environment Agency https://www.eea.europa.eu/publications/Environmental_Issues_No_21

22. Gardiner J., Starosolsky O., Yevjevich V. (1994): Defence from floods and floodplain management, NATO ASI series, Kluwer Academic Publishers

23. Healy K. M. et al (2015): State of the practice of sediment management in reservoirs: Minimizing sedimentation and removing deposits, Parks College of Engineering, Aviation and Technology, Saint Louis University, St. Louis https://acwi.gov/sos/pubs/3rdJFIC/Contents/Posters-Healy.pdf

24. UNESCO IHP (1994): Reservoir Sedimentation Processes and Measurement thereof, Proceedings of the St Petersburg Workshop on Reservoir sedimentation, IHP-V, Technical Documents in Hydrology, No 2 http://unesdoc.unesco.org/images/0010/001065/106557eb.pdf

25. Jansen P. Ph et all. (1979): Principles of river engineering - The non-tidal alluvial river, Pitman, London https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:15e01b6c-57b7-4229-8dda-9eefaf979443?collection=research

26. Jovanović M. (2002, 2008): Regulacija reka – Rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet, Beograd

27. Jovanović M., Todorović A., Rodić M. (2009): Kartiranje rizika od poplava, Vodoprivreda 0350-0519, 41 (2009) 237-239 p. 31-45 http://www.vodoprivreda.net/kartiranje-rizika-od-poplava/

28. Kapor R. (2008): Hidraulika, Građevinski fakultet, Beograd

29. Kolarov V., Babic Mladenovic M., Knezevic Z., Misik M. (2008): Development of a MIKE 11 Model of the Danube, Tisa and Sava Rivers in Serbia, 2nd European MIKE by DHI Software Conference „Water Across Europe“, 13-15 October 2008, Dubrovnik, Croatia https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike11/Kolarov_2008.pdf

30. Kron, W. (2005): Flood risk = hazard x values x vulnerability, Water Int. 30, 58–68. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.594.999&rep=rep1&type=pdf

31. Kuspilić N. (2008): Hidrotehničke građevine, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

32. Muškatirović D. (1991): Regulacija reka, Građevinski fakultet, Beograd

33. Muškatirović J. (1991): Scale models in hydraulic engineering, Beograd

34. Nacato T. (1990): Tests of selected sediment-transport formulas, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 116, No. 3, 191-204 https://www.researchgate.net/publication/245295997_Test_of_Selected_Sediment_Transport_Formulas

35. Petković S. (2000): Režim leda na Dunavu i odbrana od ledenih poplava, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd

36. Petković S., Varga S., Babić-Mladenović M., Kovač Z. (2000): Hidrotehnički aspekti problematike podvodnih prelaza cevovoda preko rečnih korita, sa konkretnim primerom „Dunavskog podvodnika" kod Novog Sada, Građevinski kalendar 2000, str. 116-158

37. Prohaska S., Ristić V. (1996): Hidrologija kroz teoriju i praksu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

38. Prša M., Rebrina M., Srednoselec I. (2013): Analiza geometrijskih karakteristika ribljih staza u ovisnosti o hidrauličkim uvjetima tečenja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
https://apps.unizg.hr/rektorova/upload_2013/Prsa_Rebrina_Srednoselec.pdf

39. Raudkivi A. J. (1990): Loose boundary hydraulics, Pergamon Press
https://www.researchgate.net/publication/291757674_Loose_Boundary_Hydraulics

40. Richardson et all (2002): United States Practice for Bridge Scour Analysis
https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/richardson.pdf

41. Rijn, L. D. van (1982): Equivalent roughness of alluvial bed, J. Hydr. Eng, ASCE, Vol. 108, No. 10, 1215-1218
http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/P1-1982a.pdf

42. Rijn, L. C. van (1984): Sediment transport
http://www.leovanrijn-sediment.com

43. Rossinskii, K.I., Debolski, B.K (1980): Rečnie nanosi, Nauka, Moskva

44. Rotenburg, I.S., Volnov, V.S., Polakov, M.P. (1977): Mostovnie perehodi, Moskva

45. Savić Lj. (2009): Uvod u hidrotehničke građevine, Građevinski fakultet, Beograd

46. Stefanović M., Gavrilović Z., Bajčetić R (2014): Lokalna zajednica i problematika bujičnih poplava [priručnik za lokalnu zajednicu i organizacije civilnog društva], Organizacija za evropsku bezbednost i saradnju, Misija u Srbiji
https://www.osce.org/sr/serbia/148311

47. Tate E., Maidment D. (1999): Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS, Center for research in water resources, Bureau of engineering research, University of Texas at Austin
https://www.researchgate.net/publication/40831360_Floodplain_mapping_using_HEC-RAS_and_ArcView_GIS

48. Великанов, М. А. (1946): Динамика русловних потоков, Гидрометеоиздат, Москва
http://e-heritage.ru/ras/view/publication/general.html?id=47790989

49. Warner J.F. et al. (2013): Making space for the river – Governance experiences with multifunctional river flood management in the US and Europe, IWA Publishing, London
https://www.researchgate.net/publication/290457454_Making_Space_for_the_River_Governance_Experiences_with_Multifunctional_River_Flood_Management_in_the_US_and_Europe

50. White K. D. and Kay R. L. (1997): Ice Jam Flooding and Mitigation - Lower Platte River Basin, Nebraska, US Corps of engineers Special report 96-1 http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.905.2206

51. Williams D. T. and Julien, P. Y. (1989): Applicability index for sand transport equations, J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 115, No 11, 1578-1581 https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:11(1578)

52. Yalin, M. S. (1977): Mechanics of sediment transport, Pergamon Press https://www.researchgate.net/publication/291322081_Mechanics_of_Sediment_Transport

53. Yang, C. T. and Wan, S. (1991): Comparisons of selected bed material load formulas, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, No 8, 973-989 https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281991%29117%3A8%28973%29

54. ... (1984): Proceedings of IAHR Ice symposium, Hamburg, Germany https://www.iahr.org/

55. ... (1989): Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, United States Geological Survey Water-supply Paper 2339, Metric Version https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2339

56. ... (1995): Sedimentation investigations of rivers and reservoirs, US Army Corps of engineers http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-4000.pdf

57. … (1996): Reservoir sedimentation, Proceedings of the St Petersburg Workshop (May 1994), UNESCO IHP-V, No. 2 http://isi.irtces.org/isi/Publication/Proceedings/webinfo/2005/12/1487239390738003.htm

58. … (1997): Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basins as related to natural and man-made changes, UNESCO IHP-IV http://unesdoc.unesco.org/images/0010/001091/109159Eo.pdf

59. … (1998) Guidelines for Reducing Flood Losses, UN https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/flood_guidelines.pdf

60. ... (1998): Zaštita od poplava u Srbiji, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi", Beograd

61. … (1999): 1998 Scanning Review of European Practice for Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures, National Cooperative Highway Research Program, USA http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rrd_241.pdf

62. … (2002): Guidelines on Flash Flood Prevention and Mitigation, NEDIES project report, European Commission, Joint Research Centre, Ispra https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/guidelines-flash-flood-prevention-and-mitigation

63. ... (2003): Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC) Guidance documents
https://circabc.europa.eu

64. ... (2003): Best practices on flood prevention, protection and mitigation, EU Commission
https://www.floods.org/PDF/Intl_BestPractices_EU_2004.pdf

65. ... (2006): Reports of FLOODMED - Monitoring, forecasting and best practices for FLOOD Mitigation and prevEntion in the CADSES region, EU funded program INTERREG IIIB
http://www.floodmed.org/

66. ... (2006): Flood hazard map guidelines of the German Working Group of the Federal States on Water Issues (LAWA)
http://www.lawa.de/documents/Flood-Hazard-Map-Guidelines_ea8.pdf

67. ... (2007): SEE River Project – Sustainable Integrated Management of International River Corridors in SEE Countries
www.see-river.net

68. ... (2007): Failure Mechanisms for Flood Defence Structures, FLOODsite, FP7
http://www.floodsite.net/html/publications2.asp

69. ... (2009): Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки, Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
http://meganorm.ru/Index2/1/4293817/4293817706.htm

70. ... (2009): Transboundary flood risk management – Experiences from the UNECE region, UNECE
http://www.unece.org/index.php?id=11654

71. .... (2009): Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance, Third edition, US Department of transportation
https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/09111

72. ... (2010): PLATINA Manual on Good Practices in Sustainable Waterway Planning, FP7
https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/Platina_IWT%20Planning%20Manual.FINAL.Aug10.c.pdf

73. ... (2010): Recommendations for the Establishment of Flood Hazard Maps and Flood Risk Maps, German Working Group on Water Issues of the Federal States and the Federal Government (LAWA)
http://www.lawa.de/documents/LAWA_HWGK15062010_Text_Germany_ENG_f72_4d8.pdf

74. ... (2010) HEC RAS River Analysis System – Hydraulic reference manual, US Army Corps of Engineers
http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf

75. Temporary and demountable flood protection guide, UK Environmental Agency https://www.gov.uk/government/publications/temporary-and-demountable-flood-protection-guide

76. ... (2012): The Rock Manual - The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), Ciria, London http://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/

77. ... (2013): Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC) Guidance document N°29 - Reporting under the Floods Directive, EU Commission https://circabc.europa.eu

78. ... (2013): The International Levee Handbook, Ciria, London https://www.ciria.org/Resources/Free_publications/ILH.aspx

79. … (2013): Flood Risk Management - A Strategic Approach, UNESCO, Paris http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002208/220870e.pdf

80. ... (2015) The handbook for management and restoration of aquatic ecosystems in river and lake basins, International Network of Basin Organizations - INBO (Madrid) Global Water Partnership – GWP Secretariat (Stocholm) https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/a-handbook-for-management-and-restoration-of-aquatic-ecosystems-in-river-and-lake-basins-no.3-2015.pdf

81. ... (2015): Dedging and dredged material management, US Army Corps of Engineers http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-5025.pdf

82. ... (2015): EU overview of methodologies used in preparation of Flood Hazard and Flood Risk Maps – Final report, EU Commission http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/pdf/fhrm_reports/EU%20FHRM%20Overview%20Report.pdf

83. ... (2015): Member States' examples of Flood Hazard and Flood Risk Maps, Document prepared for the 2015 EU Water Conference http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/pdf/MS%20examples.pdf

84. ... (2015): Proceedings of the Workshop on Flood Risk Management Measures & Links to EU WFD, Zagreb, Croatia http://www.savacommission.org/event_detail/8/22/349

85. ... (2015) Establishment of the Sediment Monitoring System for the Sava River Basin, ISRBC http://savacommission.org/project_detail/%2020/1

CIP- Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије

627.4/.5
627.15

БАБИЋ Младеновић, Марина, 1957-
Uređenje vodotoka / Marina Babić Mladenović. - Beograd : Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", 2018 (Beograd : Radunić). - 323 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 300. - Bibliografija: str. 317-323.

ISBN 978-86-82565-51-2

а) Реке - Уређење

COBISS.SR-ID 267371532

BIOGRAFIJA

Dr Marina Babić Mladenović, dipl. inž. građ. rođena je 1957. godine u Beogradu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Hidrotehnički smer završila je 1981. godine. Na istom fakultetu je 1991. godine odbranila magistarsku tezu "Razvoj metode matematičkog modeliranja transporta zagađenja u prirodnim vodotocima sa primerima njene primene u rešavanju nekih praktičnih problema", a 2006. godine doktorsku disertaciju "Uticaj akumulacija na režim nanosa aluvijalnih vodotoka – primer đerdapske akumulacije".

U Institutu za vodoprivredu "Jaroslav Černi" je napredovala od asistenta (1981), preko višeg istraživača (1989) do šefa Odseka za hidrauliku i transportne procese u Zavodu za uređenje vodnih tokova (1994). Od 2002. do 2017. godine je bila direktor ovog Zavoda. Trenutno obavlja dužnost izvršnog direktora Instituta.

Tokom dosadašnjeg rada učestvovala je na izradi ili vodila veliki broj projekata i istraživanja iz oblasti uređenja vodnih tokova. Objavila je oko 130 radova koji se bave hidrologijom, upravljanjem vodoprivrednim sistemima, rečnom hidraulikom, transportom zagađenja, nanosa i leda u prirodnim vodotocima, upravljanjem vodama i upravljanjem rizicima od poplava.

Učestvovala je u većem broju međunarodnih naučnoistraživačkih projekata i vodila nekoliko naučnih projekata u zemlji. U zvanje naučnog saradnika izabrana je 2007. Od 2008. do 2017. godine držala je nastavu na predmetu "Regulacija rijeka" na Arhitektonsko-građevinskom fakultetu u Banja Luci, Republika Srpska.

Kao ekspert-predstavnik Srbije učestvuje u radu međunarodnih foruma, multilateralnih i bilateralnih komisija. U okviru Međunarodne komisije za zaštitu reke Dunav je imenovani član ekspertskih grupa za odbranu od poplava i hidromorfologiju, a u Međunarodnoj komisiji za sliv reke Save član ekspertske grupe za odbranu od poplava.

9 788682 565512 >