

HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE

Dio 2 GRAĐEVINE NA VODOTOCIMA

Poglavlje:

- 2.1 GRAĐEVINE ZA OBRANU OD POPLAVA**
- 2.2 GRAĐEVINE ZA UREĐENJE RIJEČNOG TOKA**
- 2.3 KANALI I GRAĐEVINE NA KANALIMA**

17.04.2008

Sadržaj cjeline

DIO 1 PREGLED GRAĐEVINA I OSNOVE PRORAČUNA

- 1.0 UVOD
- 1.1 PREGLED HIDROTEHNIČKIH GRAĐEVINA
- 1.2 PODLOGE ZA PROJEKTIRANJE HIDROTEHNIČKIH GRAĐEVINA
- 1.3 OSNOVE ZA PRORAČUN HIDROTEHNIČKIH GRAĐEVINA
 - 1.3.1 PRORAČUNI FUNKCIONALNOSTI
 - 1.3.2 PRORAČUNI KONSTRUKCIJE

DIO 2 GRAĐEVINE NA VODOTOCIMA

- 2.1 GRAĐEVINE ZA OBRANU OD POPLAVA
- 2.2 GRAĐEVINE ZA UREĐENJE RIJEČNOG TOKA
- 2.3 KANALI I GRAĐEVINE NA KANALIMA
- 2.4 CESTOVNI PROPUSTI I GRAĐEVINE ZA ODVODNJU CESTA

DIO 3 GRAĐEVINE ZA KORIŠTENJE VODA

- 3.1 CJEVOVODI I UREĐAJI NA NJIMA
- 3.2 HIDROTEHNIČKI TUNELI I UREĐAJI NA NJIMA
- 3.3 BRANE
- 3.4 AKUMULACIJE I UREĐAJI NA NJIMA
- 3.5 HIDROELEKTRANE

DIO 4 GRAĐEVINE VODNOG PROMETA

- 4.1 POMORSKE GRAĐEVINE
 - 4.1.1 Gibanja Mora
 - 4.1.2 Morski valovi (Idealni, Realni, Prognoze)
 - 4.1.3 Morske razine
 - 4.1.4 Lučke građevine
 - 4.2 BRODSKE PREVODNICE
-

2.1 GRAĐEVINE ZA OBRANU OD POPLAVA

Obrana od poplava od strateškog je značaja za svaku državu. Ljudske žrtve i stradanja, kao i veličine izravnih i posrednih šteta koje nastaju uslijed poplava daju posebnu dimenziju ozbiljnosti pristupa pri projektiranju, građenju, održavanju i upravljanju hidrotehničkim sustavima za obranu od poplava.

U vodnogospodarskom smislu obrana od poplava spada u područje zaštite od štetnog djelovanja voda. To područje, osim obrane od poplava, obuhvaća i uređenje vodotoka i drugih voda (građenje, održavanje regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina i vodnih građevina za melioracijsku odvodnju, održavanje vodotoka i sl.), obranu od leda, zaštitu od erozije i bujica, uklanjanje posljedica i melioracijsku odvodnju.

Povijest nas uči da je pojava poplava neminovnost, bilo da se radi o davnim danima ili recentnim događanjima (Europa 2002.). Sama pojava poplava uvijek upozorava na propitivanje stava da li smo dovoljno učinili da bi je spriječili. Kod nas je poplava Zagreba 1964. uvelike promijenila odnos prema problemu zaštite.

Bez obzira kakav hidrotehnički sustav za obranu od poplava imamo, uvijek postoji vjerojatnost njenog pojavljivanja. Ta vjerojatnost ima dvojako porijeklo. Jedno se odnosi na vjerojatnost pojavljivanja hidrološkog događaja koji premašuje projektne uvjete temeljem kojih je projektiran i izgrađen sustav. Drugo porijeklo odnosi se na vjerojatnost otkazivanja pojedinih elemenata sustava. Otkazivanje elemenata sustava može se desiti zbog kvarova elektro strojarske i hidromehaničke opreme, ljudskog faktora ili pak radi rušenja ili nedopustivih deformacija građevina.

Postoje različiti pristupi sprječavanja šteta koje nastaju od poplava. Prvi pristup „apsolutne“ zaštite prema kojem se izgrađenim sustavima osigurava područje od poplava za hidrološke događaje velikih povratnih perioda 100 do 1000 pa i više godina. Za funkcioniranje sustava tada odgovaraju državne ustanove i moraju namiriti svaku štetu nastalu zbog njegovog otkazivanja. Drugi je pristup podijeljene odgovornosti, prema kojem se poplavi pridružuje vjerojatnost njene pojave. Korisnik zemljišta dužan se osigurati protiv šteta nastalih zbog pojave poplava kod osiguravajućeg društva. Premija osiguranja tada ovisi o veličini rizika da će do poplave doći, a na korisniku zemljišta je da procjeni da li mu se isplati takav aranžman. Taj drugi pristup uglavnom se koristi u slučajevima kada se radi o zaštiti poljoprivrednog zemljišta i/ili kada sustav za zaštitu od poplava i njegovo održavanje premašuju vrijednost spriječenih šteta. Odgovor na pitanje da li se „isplati“ graditi sustav dobiva se izradom tehničko ekonomske analize koristi i troškova gdje su koristi spriječene štete.

Hidrotehnički sustavi, sa svojim elementima - hidrotehničkom građevinama, grade se u pristupima pasivne i aktivne zaštite od poplava. Sustav za pasivnu zaštitu predstavlja zaštitu od poplavljanja područja tako što se utječe na sprečavanje posljedica. U tom pristupu, kada hidrološki događaj uzrokuje pojavu velikog vodnog vala, moramo ga propustiti koritom vodotoka na način da ne poplavi okolno područje. Sustavom aktivne zaštite od poplava utječe se na uzrok pojave poplava, a to je veliki vodni val. Raznim se zahvatima utječe na promjenu oblika vodnog vala, odnosno na njegovo „spljoštavanje“. Njegov se oblik mijenja vremenskom i/ili prostornom preraspodjelom vodnih količina.

Poplava nastaje u trenutku kada se voda počne izljevati iz korita vodotoka (protok premašuje kapacitet korita). Iako je to inicijalni događaj, problem poplava nije vezan samo uz maksimalni protok nego i uz volumen vode (vodnog vala) koji ugrožava neko područje.

Aktivnosti obrane od poplava obuhvaćaju:

- izgradnju sustava
- održavanje sustava
- upravljanje sustavom
- praćenje hidroloških pokazatelja
- provođenje plana obrane od poplava

Planom obrane od poplava određuju se:

- Mjere koje se poduzimaju prije ili u slučaju opasnosti od poplava
- Vodostaji na mjerodavnim vodomjerima pri kojem na sektorima vodotoka počinje pripremno stanje, redovna, odnosno izvanredna obrana od poplava
- Odredbe o opremi i materijalu koji se moraju pripremiti
- Mjere koje se moraju poduzeti za obranu od leda na vodotocima

Provođenje obrane o poplava čine:

- Mjere i radnje na zaštitnim vodnim građevinama
- Otklanjanje uzroka koji ometa protok voda koritom vodotoka
- Stavljanje u funkciju objekata za rasterećenje velikih voda (oteretni kanali, retencije, akumulacije, ustave, preljevi, odvodni tuneli,...)
- Izgradnja druge obrambene crte prije ili za vrijeme obrane od poplave ukoliko prijeti neposredna opasnost od podvira, prodora, rušenja ili prelijevanja zaštitnih vodnih građevina

2.1.1. Građevine sustava pasivne zaštite od poplava (nasipi)

Osnovne građevine za pasivnu zaštitu od poplava su hidrotehnički nasipi. To su regulacijske građevine izvan glavnog korita vodotoka kojima je svrha zaštita područja od plavljenja velikim vodama.

Prma funkcionalnim kriterijima za nasipe je potrebno definirati:

- trasu
- profil (visina krune, širina krune, nagibi pokosa, položaj i širinu berme)
- presjek (konstrukcija unutar profila -materijali, slojevi, debljine)

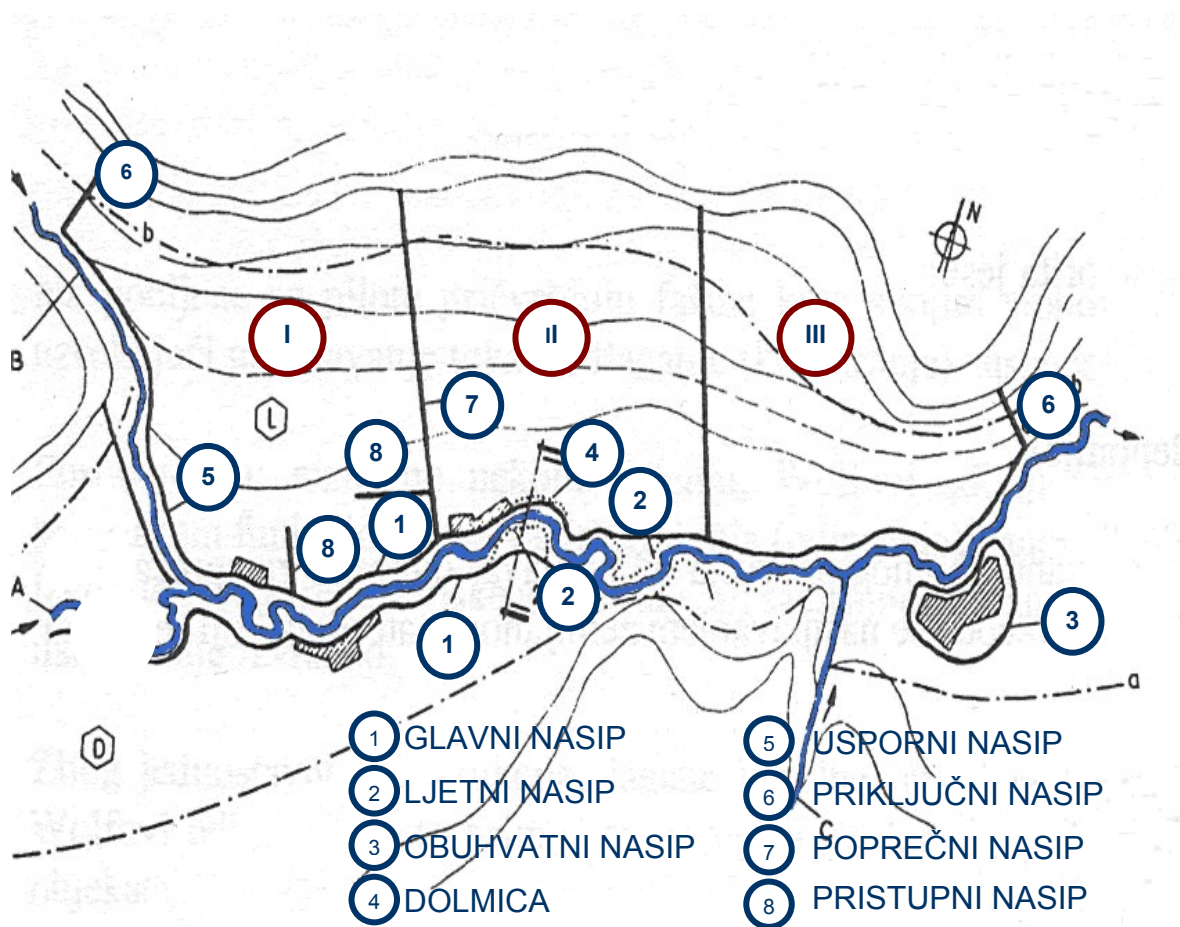
Trasa nasipa

Određivanje trase nasipa je zahtjevna zadaća i u okviru ovog predmeta nećemo ulaziti u detaljnije analize. Složenost se ogleda u činjenici da odabir trase nasipa ovisi o nizu činbenika koje možemo svrstati u: tehničku kategoriju (hidrološko hidraulički, geodetski, geološki, namjena nasipa,...), prostorno plansku kategoriju (zauzeće prostora za razne namjene,...), u ekonomsku kategoriju (vrijednost zemljišta koje se brani, vrijednost

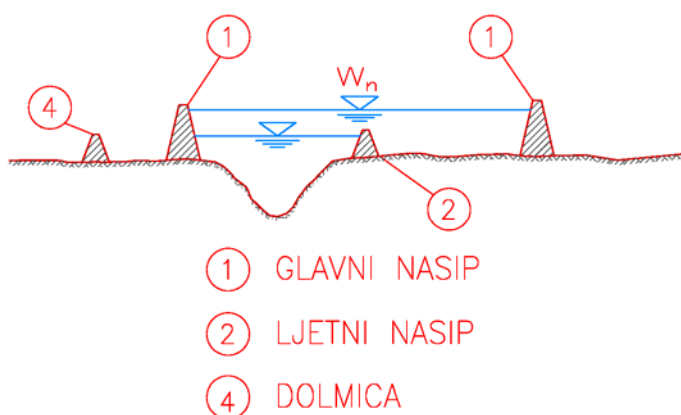
zemljišta koje se žrtvuje, cijena izgradnje i održavanja, spriječene štete, ...), kategoriju zaštita okoliša,...

Tehnički gledano, nasipe djelimo na regulacijske i obrambene melioracijske nasipe. Regulacijskim nasipima se formira korito za veliku vodu, pri čemu se vodi računa da se ostvari pravilno protjecanje vode i pravilan pronos nanosa. Obrambeni melioracijski nasipi imaju zadaću spriječavanja poplavlivanja područja (voda teče nesmetano, ne obazire se na utjecaj pronosa nanosa).

S obzirom na trasu (položaj) nasipa nasipe dijelimo na glavne, ljetne, obuhvatne, dolmice, usporene, priključne, poprečne i pristupe nasipe.

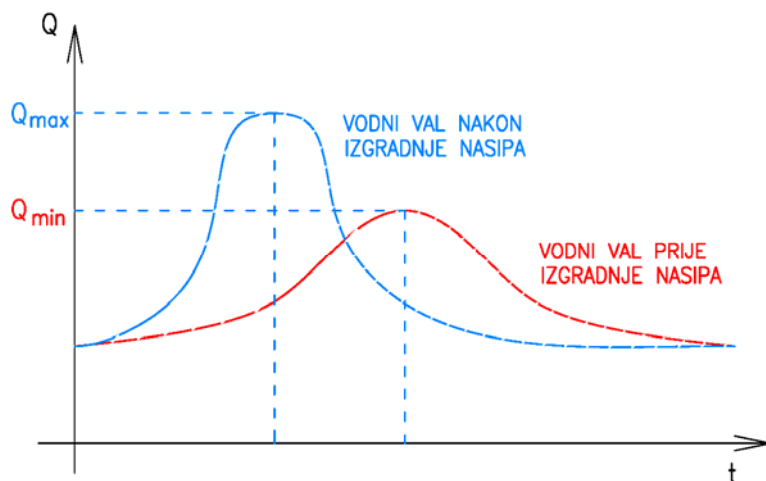


Slika 2.1.1:::1 Podjela nasipa po funkciji



Slika 2.1.1::2 Presjek 1-1 iz Sl.2.1.1::1 Podjela nasipa po funkciji

Prilikom trasiranja nasipa nikako se ne smije zanemariti činjenica da se izgradnjom nasipa smanjuju prirodne inundacije. To znači da će se iz toga razloga poplavna voda kraće vrijeme zadržavati na gornjim djelovima sliva. Posljedica je pojava većeg maksimalnog protoka nizvodno u odnosu na prirodno stanje (bez izgrađenih nasipa).



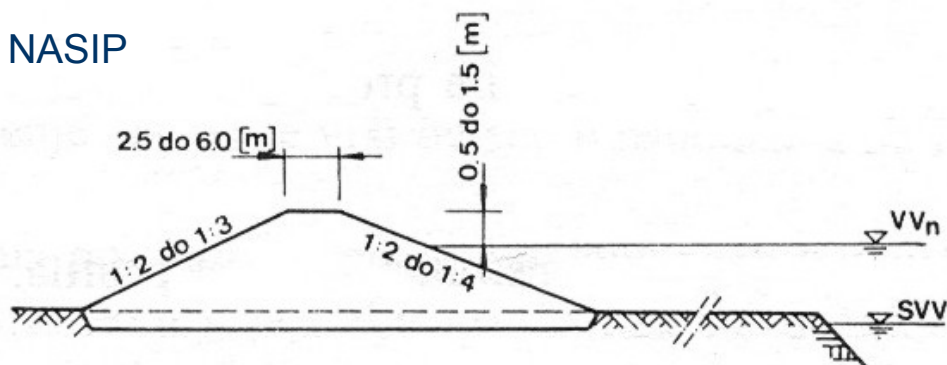
Slika 2.1.1::3 Učinak izgradnje nasipa na promjenu oblika vodnog vala

Profil nasipa

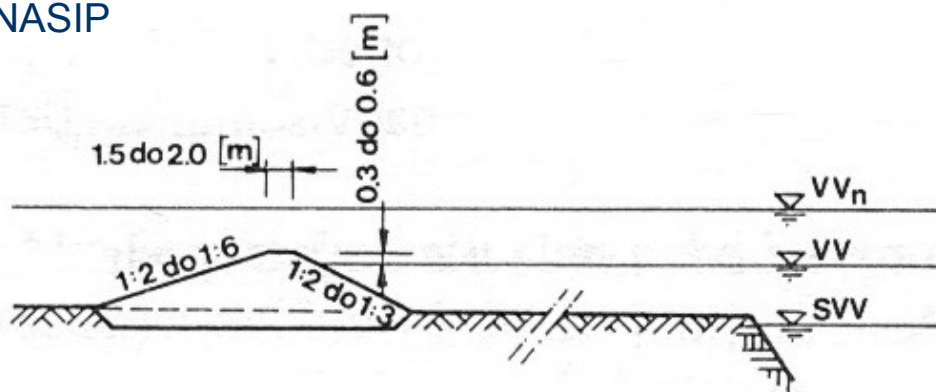
Profilom nasipa određene su njegove vanjske konture, odnosno njegova visina (kota krune), širina krune, nagibi pokosa, položaj i širina bermi (horizontalna proširenja na

pokosima). Profil nasipa ovisi o namjeni nasipa, hidrauličkom proračunu za mjerodavnu veliku vodu, vrsti materijala za izradu nasipa, presjeku nasipa (konstitutivni tip), hidrauličkom proračunu procjeđivanja, geomehaničkom proračunu stabilnosti pokosa nasipa, trajanju visokih vodostaja, pojavi valova i ostalim posebnim zahtjevima. Na slici 2.1.1::3 dani su primjeri profila nasipa za glavni i za ljetni nasip.

GLAVNI NASIP



LJETNI NASIP



Slika 2.1.1::4 Profili glavnog i ljetnog nasipa

Presjek nasipa

Presjekom nasipa određuju se vrste materijala od kojih se izvodi, njihova kvaliteta te debljine slojeva pojedinih materijala. Presjek nasipa treba biti takav da konstrukcijom treba odolijevati hidrostatičkim i hidrodinamičkim djelovanjima vode. Hidrostatsko djelovanje vode na nasip može uzrokovati nastajanje kliznih ploha, slijegavanje nasipa, procjeđivanje vode kroz tijelo nasipa i temeljno tlo (ispiranje sitnih čestica), uzdizanje i pucanje nasipa ako je temeljen na tlu koje mijenja volumen s promjenom vlažnosti. Uslijed hidrodinamičkog djelovanja može pak nastati oštećenje fluvijalnom erozijom (uslijed nepovoljnog trasiranja), oštećenje uslijed valova, oštećenje uslijed udara santi leda i oštećenje uslijed prelijevanja.

U nastavku ćemo se osvrnuti samo na neke od problema vezanih uz tehničke mjere kojima se umanjuje nepovoljni utjecaj vode na nasipe.

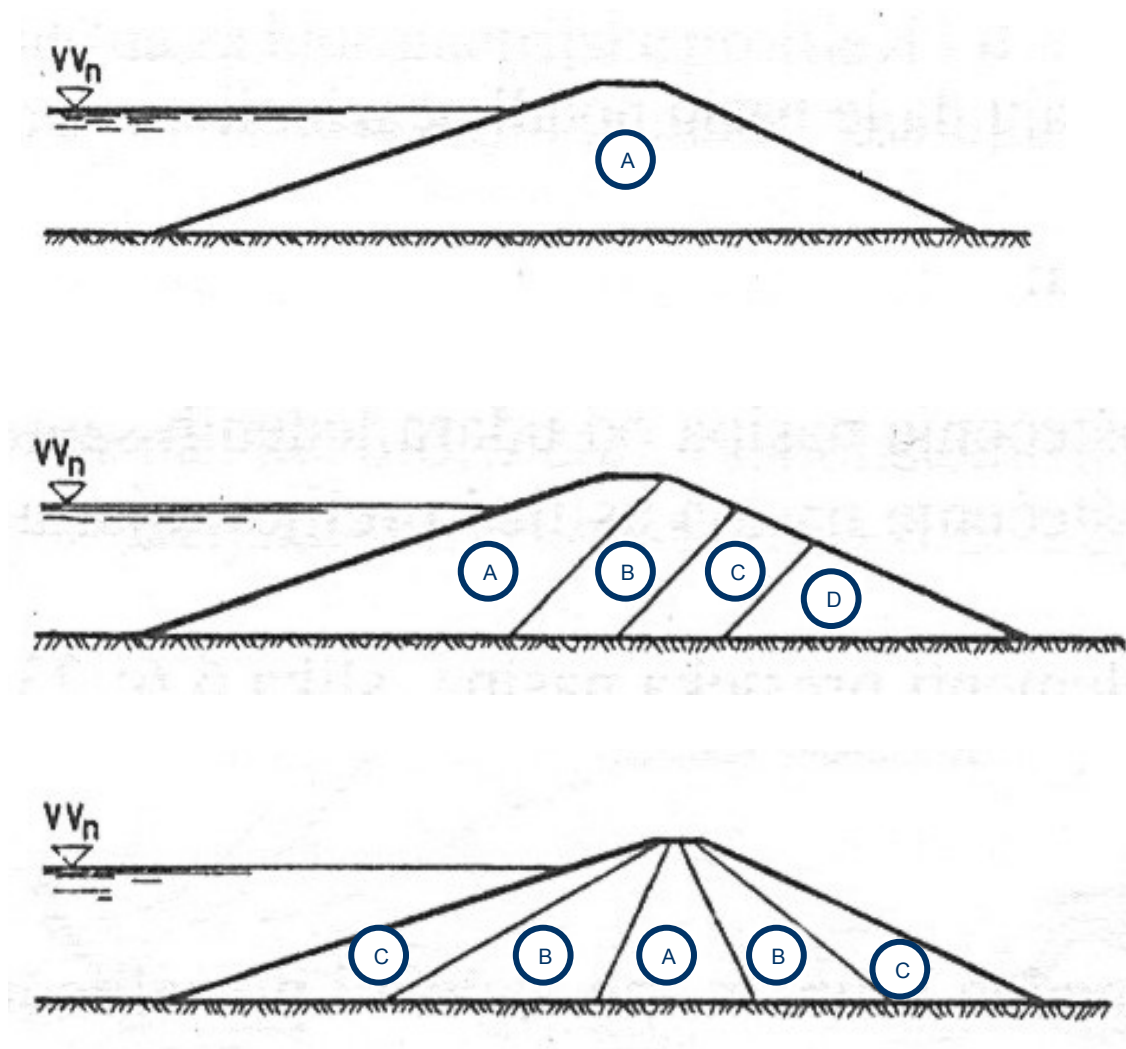
Hidrotehnički nasipi, kao građevine iziskuju relativno velike količine materijala za njihovu izgradnju. Taj problem je moguće staviti u komparaciju sa sličnim problemom kod cesta i željeznica. Kod cesta i željeznica materijal za nasipe trupa pokušava se nadomjestiti s materijalom iz iskopa koji služi istoj svrsi (dio trase u usjeku ili zasjeku, tuneli). Kod

hidrotehničkih nasipa nema takovih mogućnosti, pa se cjelokupni materijal treba pribaviti iz tzv. pozajmišta (mjesto iz kojih se trajno iskopa i odveze materijal). Obično su to mjesta koje se nalaze u prostoru inundacija (povremeno plavljeno područje između korita vodotoka i novog nasipa). Takav materijal obično nije kvalitetan do te mjere da ga bez dodatnih tehničkih i konstruktivnih intervencija možemo upotrijebiti za izvedbu hidrotehničkog nasipa. U idealnim uvjetima, kada u blizini ima dovoljno kvalitetnog materijala moći ćemo izvesti nasip homogenog presjeka, dok ćemo u drugim slučajevima morati raditi složene presjeke (Slika 2.1.1::5). U drastičnijim slučajevima, kada je dostupan materijal izrazito propusan, a nepropusan materijal (uglavnom glina) je potrebno dovesti iz udaljenijih lokacija, bit će potrebno pribjegavati rješenjima s nepropusnom jezgrom ili ekranom (Slika 2.1.1::6; jezgra i ekran naznačeni su šrafurom). Navedeni tipovi presjeka nasipa koriste se za rješenja gdje je pojava velikih voda kraćeg trajanja i kada se nasip neće naći u uvjetima stalnog opterećenja vodom. Ukoliko su uvjeti upravo suprotni, odnosno ukoliko je nužno nasipe projektirati uz projektantsku pretpostavku trajnog opterećenja vodom, tada presjek nasipa postaje složeniji. Na slici 2.1.1::7 prikazani su primjeri presjeka nasipa za dugotrajno djelovanje vode. Na tim presjecima mogu se uočiti tri različita dijela: tijelo nasipa, nepropusna jezgra (ekran) (na slici šrafirano) i drenažni sustav (na slici točkasto). Tijelo nasipa, kao uporni dio konstrukcije ima zadaću odoliti hidrostatskom opterećenju. Nepropusna jezgra (ekran) služi sprječavanju procjeđivanja vode kroz tijelo nasipa. Drenažni sustav služi odvodnji eventualne procjedne vode kako bi uporni dio konstrukcije ostao suh.

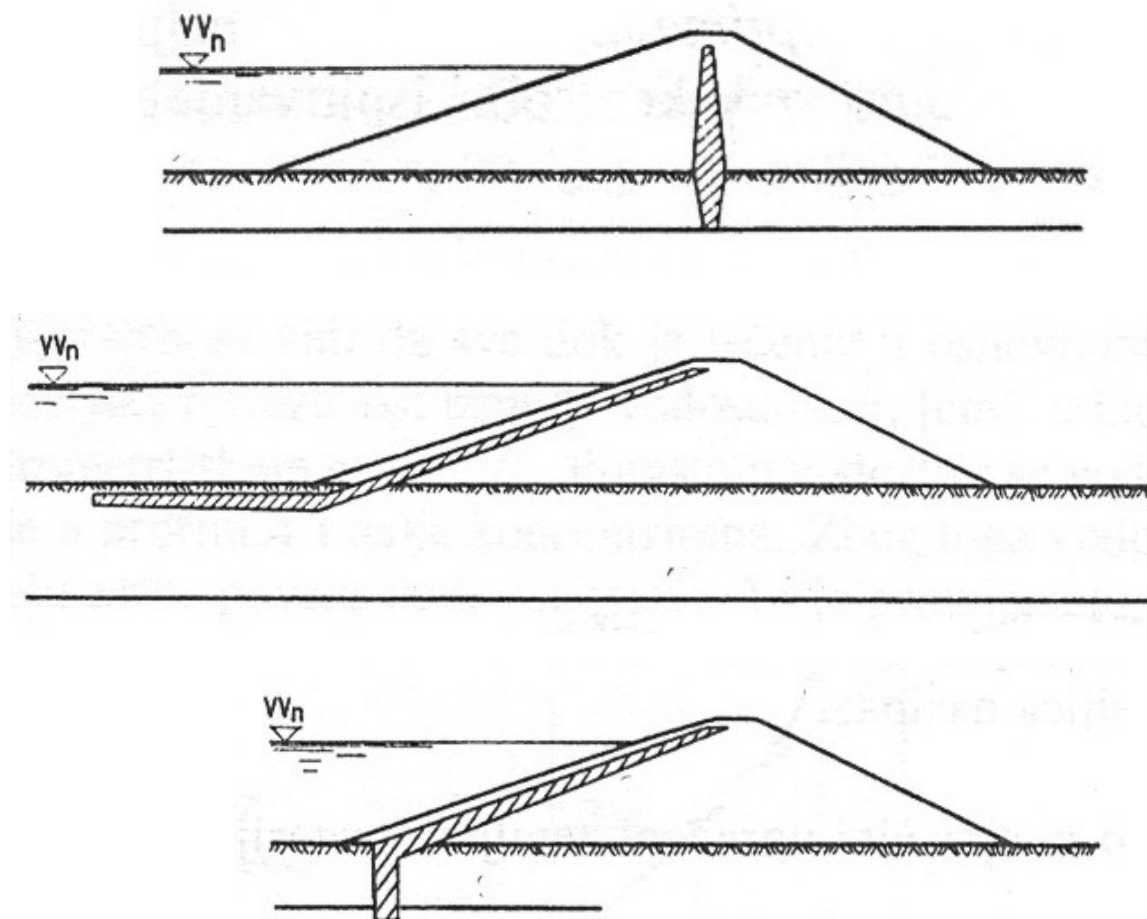
Iz gornjih razmatranja može se konstatirati da voda nepovoljno djeluje na nasip te da ju je poželjno konstruktivnim detaljima što je više moguće eliminirati. Naime ukoliko se tijelo nasipa natopi vodom postoji niz potencijalnih problema koje ta voda uzrokuje. Kao prvo, materijal od kojeg je izrađen nasip može biti takav da mijenja volumen povećanjem vlažnosti (to obično i je tako jer koristimo glinovite materijale za izgradnju da bismo povećali vodonepropusnost) pa može doći do njegove deformacije, pojave pukotina nakon sušenja, dodatnih slijeganja itd. Nadalje, nakon povlačenja velike vode, zaostala voda u trupu nasipa uzrokuje povećanje pornih tlakova i vrlo često dolazi do pojave kliznih ploha na uzvodnim pokosima. Isto tako, za trajanja velikih voda, može doći do procjeđivanja kroz tijelo nasipa i do pojave vrelna plohe na nizvodnom pokosu. To je nedopustivo stanje zbog opasnosti da voda ne počinje ispirati pokos (pojava hidrauličkog loma tla) i time ugroziti stabilnost nasipa. Ukoliko proračunima dokažemo da postoji takova opasnost, tada je taj problem moguće konstruktivno riješiti drenažnim konstrukcijama (Slika 2.1.1::8). Njima lokalno povećamo propusnost te «navlačimo» procjednu vodu na dren i izbjegavamo pojavu vrelnih ploha na pokosu. Bitno je napomenuti da na prelazu iz tijela nasipa u dren treba konstruktivno predvidjeti filter (na slici označeno žutom bojom). Uloga mu je da spriječi ispiranje materijala tijela nasipa što može uzrokovati začepljenje filtra i/ili oštećenje nasipa.

Jedna od zadataka pri projektiranju nasipa za zaštitu od poplava je proračun procjednih količina kroz tijelo nasipa. Naime, ukoliko bi beskonačno dugo trajala velika voda, uspostavilo bi se stacionarno stanje pri kojem bi se voda procjeđivala kroz nasip i temeljno tlo. Konačno stanje bilo bi ravnotežno stanje pri kojem bi se izjednačili potencijali s uzvodne i nizvodne strane nasipa. Jasno je da bi se tada potopilo područje koje se štiti od poplava. Stoga je nužno, na nizvodnoj strani stalno održavati dopuštenu razinu vode (obično je to razina podzemne vode). To se postiže izgradnjom kanala za procjednu vodu kojim se ona odvodi i vraća nazad u vodotok (crpkama). Da bi se znali dimenzionirati ti kanali i crpke, potrebno je znati količinu vode koja se procjeđuje. Proračun realnog problema, gdje se radi o nestacionarnom procjeđivanju kroz anizotropan materijal sa slojevima različite propusnosti, je vrlo složen i ovdje se neće tumačiti. No postoje

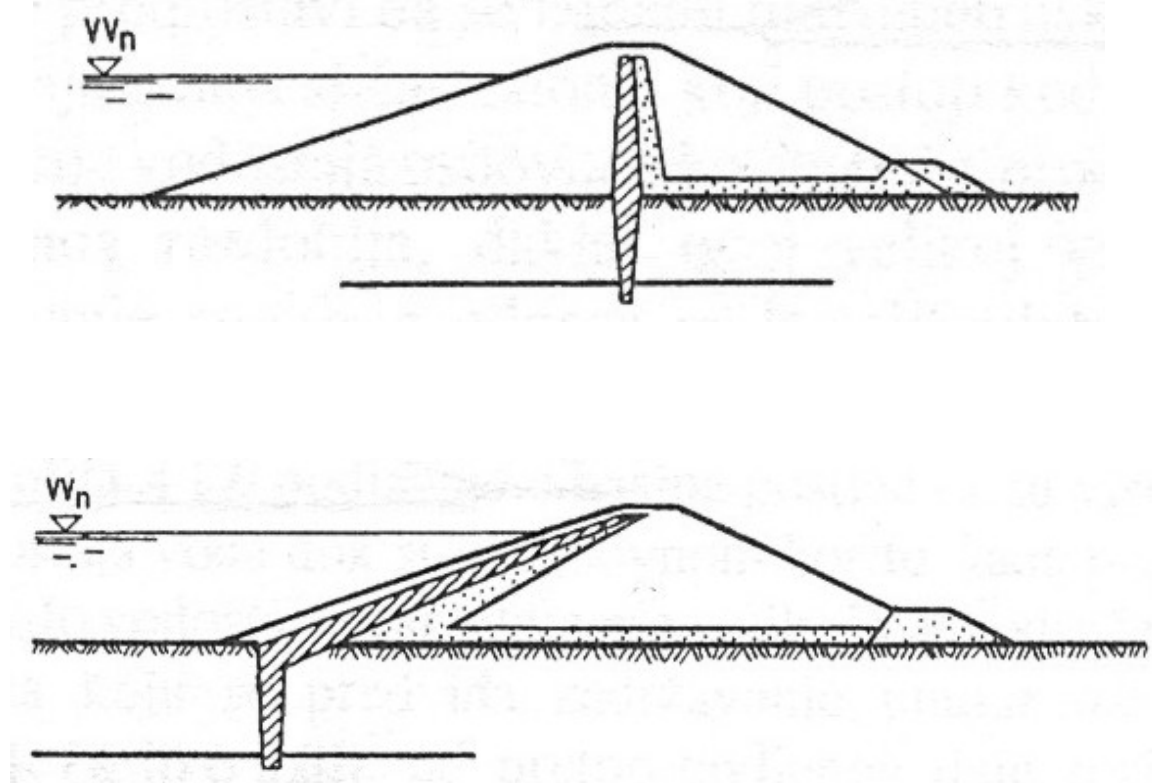
pojednostavljeni postupci koji se mogu koristiti za preliminarne proračune. Na slici 2.1.1::9 dan je jedan takav pojednostavljen postupak Dupuita za proračun specifičnog protoka procjedne vode $q(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ za homogen i izotropan materijal propusnosti k (cm/s) te za stacionarno stanje.



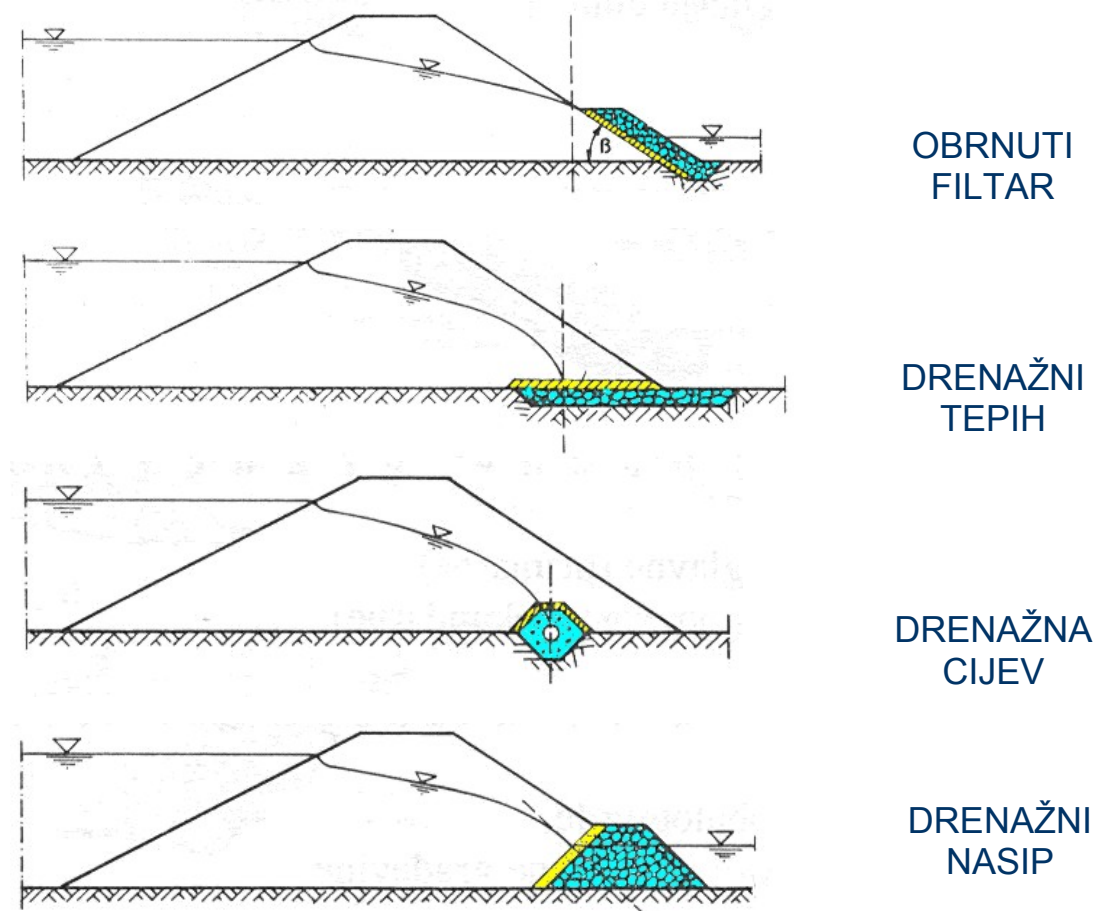
Slika 2.1.1::5 Tipovi presjeka nasipa (A – D materijal, od najnepropusnijeg A do najpropusnijeg D)



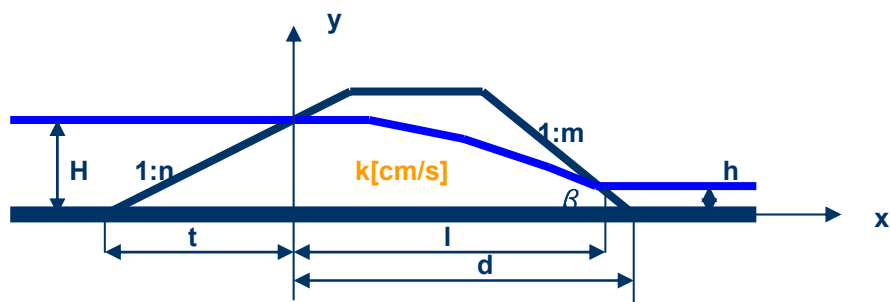
Slika 2.1.1::6 Tipovi presjeka nasipa sa nepropusnim jezgrama i ekranima



Slika 2.1.1::7 Tipovi presjeka nasipa za dugotrajno djelovanje vode



Slika 2.1.1::8 Principi dreniranja nasipa



DUPUIT

$$q = k \left(\frac{H^2 - h^2}{2l} \right) [l/s/m']$$

$$y = \sqrt{H^2 + \frac{h^2 - H^2}{l} x}$$

Slika 2.1.1::9 Primjer metode proračuna procjednih količina za homogeni i izotropan materijal nasipa

2.1.2. Građevine sustava aktivne zaštite od poplava

Aktivnom zaštitom od poplava, kao što je već bilo rečeno, utječe se na ublažavanje uzroka poplava. Jedan od glavnih uzroka poplava je pojava velikog volumena vode u kratkom vremenskom razdoblju, kada postojeći vodotoci nemogu provesti tu vodu. Cjelokupnu dinamiku stalnih promjena kvantitativnih i kvalitativnih osobina voda i dinamiku odnosa voda s okolinom koja je okružuje nazivamo vodnim režimom. To znači, ukoliko želimo utjecati na promjenu uzroka pojave poplava, moramo utjecati na promjenu vodnog režima. Tu promjenu nazivamo reguliranje vodnoga režima.

Sam pojam vodnoga režima ima veliku širinu, pa se tako i postavlja njegova definicija. Vodni režim, općenito prikazuje slijed stanja vode. Opisuje se promjenama različitih osobina vode, pa se razlikuju hidrološki režim, hidraulički režim, toplinski režim, režim kakvoće (ili kvalitete) vode, režim kvantitete (ili količine) vode itd. Jasno, ovakova široka definicija daje nam preobiman zadatak, a i svi elementi vodnoga režima neće nam biti zanimljivi za problem zaštite od poplava.

Hidrotehničare zanimaju one njegove komponente koje čine ključnu kategoriju za sve vodnogospodarske grane i sve vidove vodnogospodarskog planiranja.

Iako je tijesan odnos između kvantitativne i kvalitativne komponente vodnoga režima (promjena količine uvijek utječe na promjenu kvalitete vode) u okviru zaštite od poplava

osvrnut ćemo se samo na kvantitativni aspekt, odnosno na promjenu količina vode u prostoru i vremenu i to jasno u vodotocima.

Vodni režim može biti neupravljan (neregulirani) i upravljan (regulirani). Neupravljan vodni režim je prirodni vodni režim kojime se ne može upravljati, vrlo se teško upravlja ili se ne želi upravljati. U sebi sadrži sve stohastičke komponente prirodnih promjena. Vrlo je važno iznaći, temeljem obrade mjerenih podataka, zakonitosti tih promjena. Za razliku od njega upravljan vodni režim je moguć ukoliko u sustavu postoje izgrađene građevine. One omogućuju da se mijenjaju prirodne promjene količina vode u prostoru i vremenu.

Upravljujivost vodnoga režima može biti sa brzim učinkom na njegovu promjenu. Te se promjene mjere vremenskim jedinicama satima i danima do mjeseca kod brzoupravljanih vodnih režima, odnosno godinama i desecima godina kada se radi o sporouravljanim vodnim režimima.

Dodatno, kod upravljivih vodnih režima to "upravljanje" odnosno njegova promjena može biti svjesna i nesvjesna. To spominjem ovdje iz razlog što su upravo nesvjesni antropogeni utjecaji na promjeni vodnoga režima generalno negativni i to kod sporouravljanih v.r. Konkretno, antropogeni utjecaji na slivu, kao što je sječa šuma, intenziviranje poljoprivredne proizvodnje, izgradnja naselja i sl. imaju za posljedicu promjenu vodnoga režima u negativnom smislu. Odražavaju se na bržim promjenama protoka u vremenu na vodotoku s povećavanjem maksimalnih veličina i smanjenjem minimalnih veličina.

Pa pod pojmom regulacija vodnoga režima podrazumijevamo sve hidrotehničke mjere i građevine kojima se utječe na promenu vremenske i prostorne razdiobe vode.

Reguliranje vodnog režima postiže se izvedbom raznih vodnogospodarskih zahvata na vodotoku i njegovom slivu, kao na pr. izvedbom akumulacija, retencija, oteretnih kanala, uređenjem sliva (biljni pokrov, uređenje bujica itd).

Povijesno gledano reguliranje vodnoga režima bilo je podređeno jednonamjenskim rješenjima. Prvo u svrhu zaštite od poplavnih voda, a kasnije u svrhu jednonamjenskih rješenja za korištenje voda (za energetske svrhe, navodnjavanja i sl.). Razvojem društva javlja se i veća potreba za vodom koja prerasta prirodne kapacitete. Posljedica je potreba za upravljanje vodama, odnosno potreba za reguliranjem vodnoga režima u okviru rješenja koja će dati veće koristi.

Saznanje da je veća korist od skupnog rješenja nego suma koristi od pojedinih rješenja dovela je do razvoja sustavnih vodnogospodarskih rješenja i potrebe upravljanja vodom.

Svrha reguliranja vodnoga režima je ostvarivanje mogućnosti svrsishodnijeg gospodarenja prirodnim vodnim resursima, zaštiti od štetnog djelovanja voda kao i zaštiti voda od onečišćenja. Ona se postiže:

1. usaglašavanjem prosječnog protoka u vodotoku s dinamikom potreba korisnika,
2. ublažavanjem velike vode i
3. povećanjem (oplemenjivanjem) malih voda

Ovisno o stupnju izgrađenosti vodnoga sustava možemo govoriti o četiri razine reguliranja vodnoga režima sa svrhom:

1. Zaštite od velikih voda
2. Osiguranja biološkog minimuma
3. Osiguranja vodnogospodarskog minimuma
4. Optimalizacije vodnog sustava

ad 1. Moramo spriječiti eventualne štete na slivnom području

ad 2. Moramo omogućiti svim biološkim korisnicima vode barem onoliko vode za njihov normalan život odnosno moramo omogućiti opstanak biocenoze

ad 3. Svim korisnicima na vodnom sustavu mora se osigurati dovoljna količina vode tražene kvalitete, odnosno nesmije se dozvoliti da jedn korisnik zahvati više vode na uštrb drugoga, odnosno da mu onemogući upotrebu vode pogoršanjem njezine kvalitete

ad 4. Vrednovanjem pojedinog elementa u sustavu pronalazi se ono rješenje koje će dati najveću sveukupnu korist.

Karakteristike vodnoga režima

Da bi se moglo regulirati vodni režim potrebno je upoznati njegove karakteristike. Jasno je da je promjena vodnih količina u prostoru i vremenu stohastička veličina podložna svim slučajnostima vezanim uz hidrološke i ostale uvjete. Naš je zadatak da temeljem mjerenih podataka upoznamo osnovne karakteristike temeljem kojih možemo predvidjeti sa dovoljnom sigurnošću što će se desiti u bližoj i daljoj budućnosti. O tome je bilo govora u predavanju o hidrološkim podlogama za regulaciju vodotoka.

Kao što smo već rekli u okviru ovoga predavanja bavit ćemo se samo sa jednom dimenzijom vodnoga režima, odnosno sa njegovom kvantitativnim pokazateljem, odnosno promjenom količina voda u prostoru i vremenu.

Mjere i građevine za reguliranje vodnoga režima

Na promjenu vodnoga režima, u sklopu vodnogospodarskih zahvata, djelujemo na slijedeće načine:

1. Uređenjem sliva
2. Uređenjem korita vodotoka
3. Izgradnjom retencija
4. Izgradnjom akumulacija
5. Izgradnjom oteretnih kanala

U nastavku ćemo reći o svakoj od navedenih zahvat najvažnije principijelne karakteristike.

Uređenje sliva

Jedan od najvećih utjecaja na promjenu vodnoga režima ima upravo uređenje sliva. Kad govorimo o uređenju sliva mislimo na pošumljavanje, uređenje korita bujica, izgradnju konturnih građevina i sl. Takovim se zahvatima svjesno sporo regulira vodni režim, što znači da se pozitivni učinci mogu očekivati tek nakon dužeg vremenskog perioda, nakon više godina ili desetljeća. Ovdje moramo spomenuti da su upravo antropogene aktivnosti na slivu u smislu krčenja šuma, intenziviranje poljoprivredne proizvodnje, odvodnja naselja, i sl. imale za posljedicu promjene u vodnom režimu u smislu njegove veće neujednačenosti i veće opasnosti od pojave poplava.

Uređenje sliva je bazna aktivnost kojom se utječe na dulje zadržavanje vode izvan vodotoka, pa time i na ujednačenost vodnoga režima. Međutim ono ne rješava probleme vezane uz dinamiku današnjih potreba za vodom.

Uređenje korita vodotoka

Pod pojmom uređenja korita ovdje se misli na tradicionalne regulacije vodotoka u smislu izgradnje regulacijskih građevina. To su građevine kojima se regulira korito za malu vodu, korito za srednju vodu i korito za veliku vodu. O samim građevinama bit će više govora kasnije.

Principijalno, građevine na regulaciji korita imaju negativan utjecaj na promjenu vodnoga režima. Uređenjem korita povećava se njegova propusna moć, odnosno retencijske sposobnosti uređenog korita su manje. To rezultira povećanje maksimalnih protoka, smanjenje trajanja vodnih valova i smanjenje minimalnih protoka nizvodno od zahvata. Drugim riječima uređenjem korita djelujemo na neujednačavanje vodnoga režima.

Ta promjena vodnog režima je samo posljedica regulacije korita i vrlo često se negativno odražava na poplave nizvodno od zahvata.

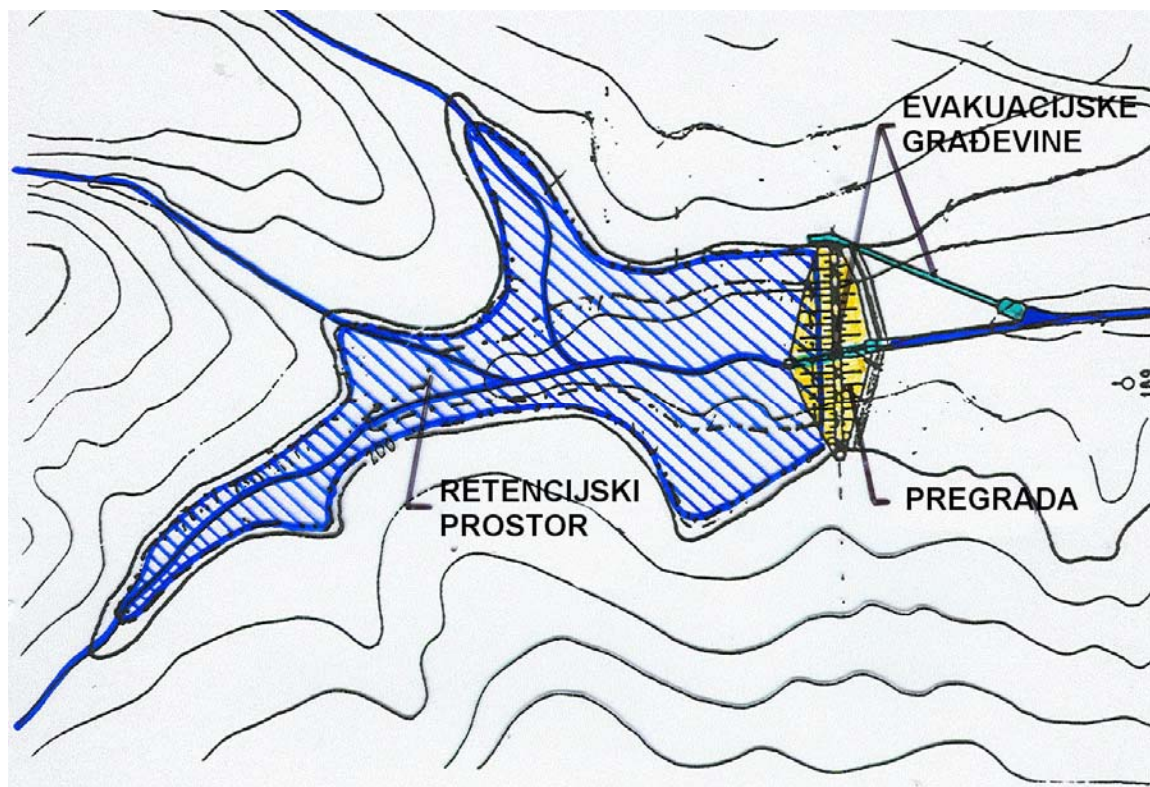
Regulacije vodnih tokova su "teški" vodnogospodarski zahvati jer se njima zadire u dinamiku prirodnih zbivanja, odnosno utječu na vegetaciju i klimu doline vodnog toka.

Reguliranje prirodnih vodotoka su obuhvatan i odgovoran zadatak ne samo u odnosu na sadašnjost već i na budućnost jer se uspjeh ili neuspjeh jedne regulacije pokazuje tek nakon više desetljeća i odražava na gospodarstvo i budućih generacija.

Retencije

Retencija je uređeno područje u slivu vodotoka predviđeno za vremenski kraće zadržavanje vode u svrhu zaštite od poplava. Retencijama se regulira vodni režim vodotoka. Učinak retencije se očituje smanjivanjem maksimalnog protoka koji prolazi vodotokom na nizvodnom području i produljivanjem trajanja velikih voda, odnosno isti volumen vode se kroz vodotok propušta dulje vrijeme.

Retencije se mogu izvoditi na način da se ulaz vode ne kontrolira, a da se kontrolira samo izlaz vode iz retencijskog prostora. To se postiže pregrađivanjem vodotoka, a retencijom se upravlja tako da se uz pomoć zatvarača regulira najveći protok koji se ispušta nizvodno od pregrade (ispušta iz retencije). Ovakv tip tzv. čelnih retencija najčešće se izvodi u gornjim djelovima sliva. Prikaz jedne takove retencije dan je na slijedećoj slici 2.1.2::1

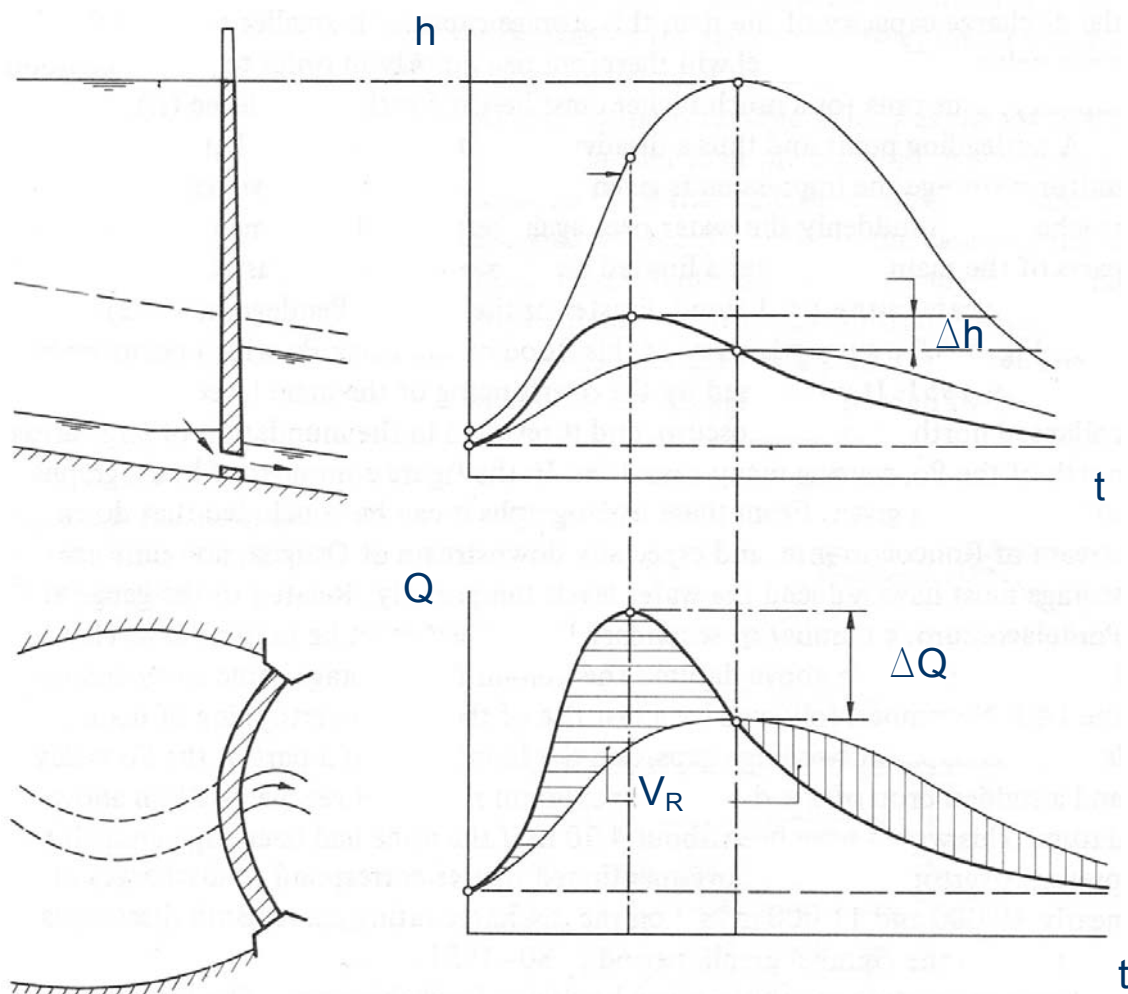


Slika 2.1.2::1 Shematski prikaz čelne retencije

Na slici je dana situacija retencije gdje se mogu razlučiti osnovni funkcijski elementi:

1. Tijelo pregrade
2. Retencijski prostor
3. Evakuacijske građevine (temeljni ispust sa zapornicom za kontroliranje protoka i preljev s brzotokom i slapištem).

Učinak jedne ovakve retencije zorno je prikazan na hidrogramu vodnog vala na slici 2.1.2::2. Prirodni vodni val karakteriziran je svojim trajanjem, volumenom i maksimalnim protokom. Retencijom se isti vodni val transformira na način da se promjeni duljina trajanja i veličina maksimalnog protoka u smislu njegovog smanjivanja za veličinu ΔQ . Drugim riječima ovakvom retencijom nizvodno područje štitimo od velike vode na način da smanjujemo veličinu maksimalnog protoka. U retencijskom prostoru se privremeno zadrži volumen vode V_R koji se ispušta u korito vodotoka nizvodno kada je ono sposobno provesti tu vodu. Dakle kontrolirano ispuštamo vodu iz retencije pazeći da kapacitet korita nizvodno ne bude premašen. Prilikom prolaska vodnog vala kroz retenciju možemo razlučiti dvije faze. Prva faza, koju nazivamo fazom punjenja, javlja se kada je dotok vode u retencijski prostor veći nego li je protok vode koji propuštamo u nizvodno područje. Trenutak kulminacije se javlja kada se izjednače dotok i odtok, nakon čega nastupa faza pražnjenja retencije.



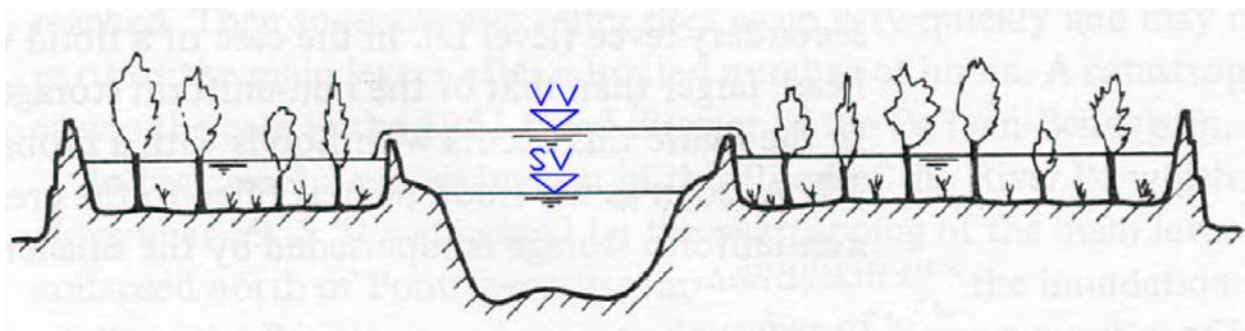
Slika 2.1.2::2 Prikaz rada retencije

Isto tako retencije se mogu izvoditi na način da se i pune i prazne kontrolirano. Tada se lociraju paralelno s vodotokom. Obično ih nazivamo bočnim retencijama. Primjerenije su donjim djelovima gornjeg toka i srednjim tokovima vodotoka (mjesto gdje su riječne doline relativno široke). Punjenje se takovih retencija obavlja ili preljevanjem preko bočnog preljeva na nasipu, rušenjem privremenih nasipa ili otvaranjem zapornica na ustavama u nasipu. Nakon što prođe opasnost od poplava, nizvodnog područja retencije, putem zapornica na ustavi voda se vraća u vodotok. Ustave ovog tipa retencija mogu biti upusno-ispusne, samo upusne ili samo ispusne, ovisno o tome da li se kroz njih voda i upuša i ispušta iz retencija ili se samo upušta i samo ispušta iz retencija.

Veličina retencije, odnosno retencijskog prostora ovisi o hidrološkim prilikama, veličini raspoloživog prostora i veličini maksimalnog protoka koji može prihvatiti vodotok nizvodno od retencije.



Slika 2.1.2::3 Pregrada na retenciji



Slika 2.1.2::4 Shematski prikaz bočnih retencija

Akumulacije

Najdjelotvornije reguliranje vodnoga režima postiže se izgradnjom akumulacija. U hidrotehničkom smislu to su građevine koje služe duljem zadržavanju vode u za to predviđenom prostoru. Svrha im je vremenska preraspodjela vode sliva koji joj gravitira. Ono što ih razlikuje od retencija je vrijeme zadržavanja vode koje je daleko duže u akumulacijama. Možemo reći da je u akumulacijama uvijek određena količina vode. Akumulacije sa svojim sustavom za ispuštanje vode omogućuju više razine reguliranja vodnoga režima, odnosno osim zaštite od velikih voda moguće je i obogaćivanje malih voda, te osiguravanje biološkog i vodnogospodarskog minimuma. Čak štoviše moguće je govoriti i o optimalizaciji elementa vodnog sustava. Učinak akumulacije na promjenu vodnoga režima za zaštitu od poplava jednak je kao i kod retencija. Preduvjet za to je osiguravanje dovoljno velikog dijela akumulacijskog prostora za potrebe prihvaćanja velikog vodnog vala.

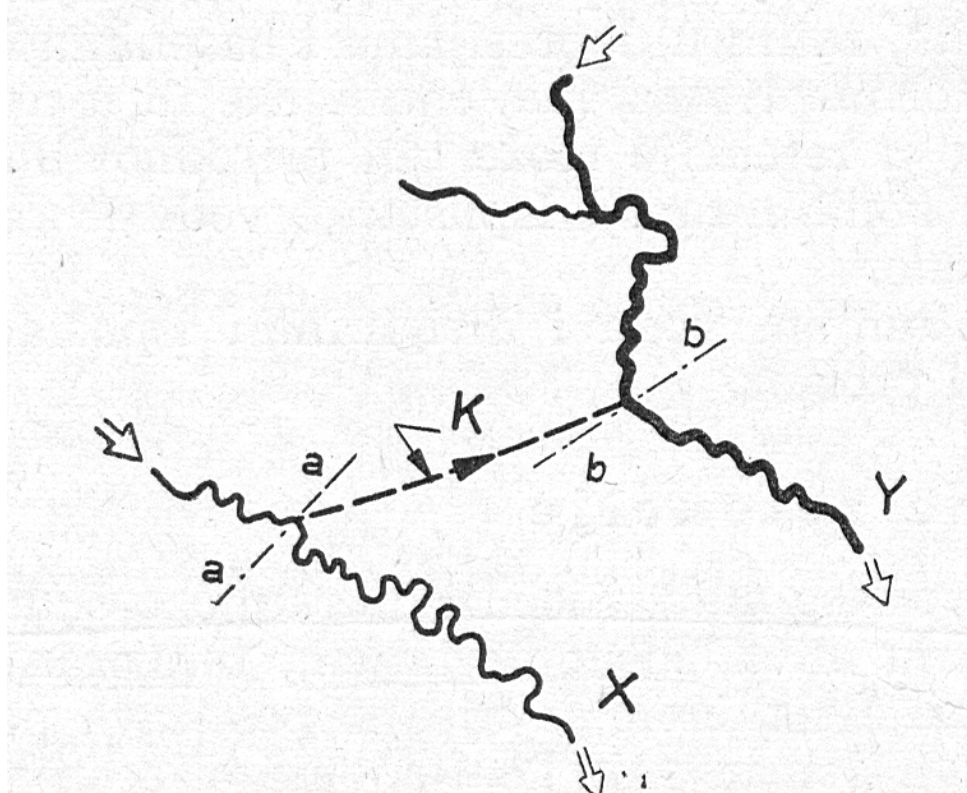
Brana (pregrada) akumulacije, za razliku od isto takovog objekta na čelnim retencijama nalazi se u drugačijim okolišnim uvjetima. Prvenstveno se misli na stalno opterećenje vodom. Kod pregrada na čelnim retencijama trajanje takovog opterećenja vodom je reda veličina par sati do par dana (iznimno dulje). Stoga će brane za akumulacije biti puno zahtjevnije građevine, a o tome će u nastavku biti više govora.

Ovisno o namjeni akumulacija (danas se akumulacije uglavnom izvode kao višenamjenski hidrotehnički objekti) vremenski period unutar kojeg se "izravnava" vodni režim bit će različit.

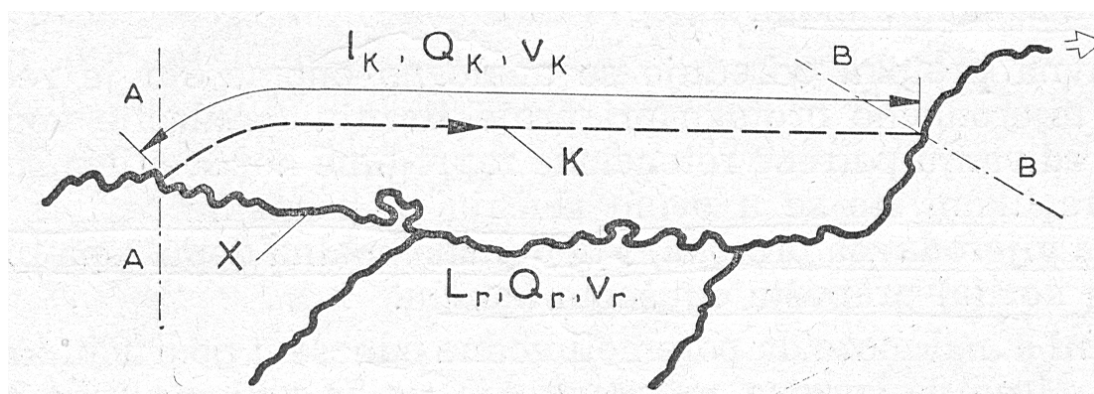
Veličina akumulacije, za razliku od retencija, ovisit će osim o hidrološkim značajkama sliva, kapaciteta korita nizvodno od akumulacije i raspoloživog prostora i o potrebama korisnika.

Oteretni kanali

Oteretni ili odušni kanali služe zaštiti područja od velikih voda. Oteretni kanali se izvode na potezima korita koji iz raznih razloga ne mogu propustiti velike vode. Razlikujemo poprečne (slika 2.1.2::5) i paralelne oteretne kanale (slika 2.1.2::6).



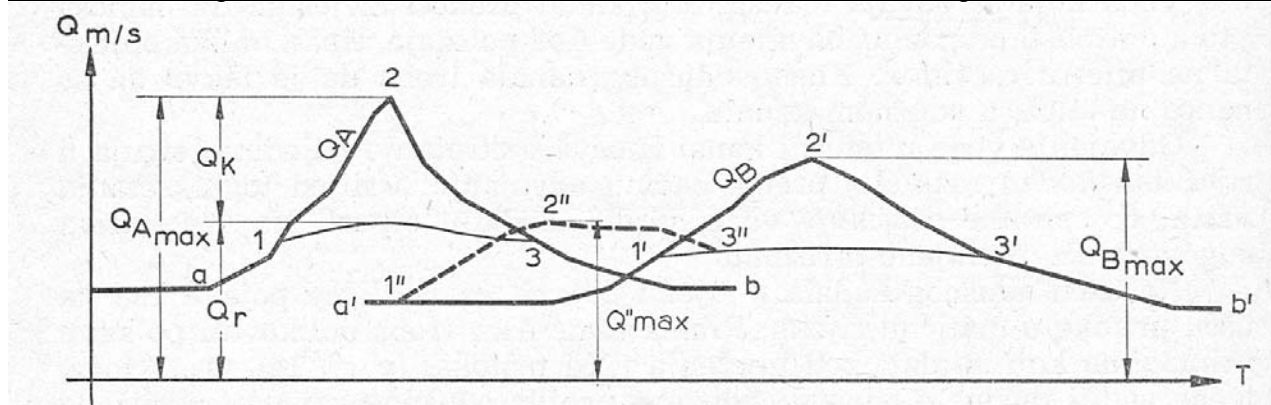
Slika 2.1.2::5 Shematski prikaz poprečnog oteretnog kanala



Slika 2.1.2::6 Shematski prikaz paralelnog oteretnog kanala

Učinak oteretnih kanala na nizvodno područje ogleda se u smanjivanju veličine maksimalnog protoka od prirodnog uz isto trajanje. To znači da kroz nizvodni potez korita propuštamo manju količinu vode nego u prirodnom stanju. Jasno je da doljnji potez vodotoka iza ušća oteretnog kanala mora biti sposoban prihvatiti sumaran vodni val koji će sada biti transformiran, a moguće i s većim maksimalnim protokom nego u prirodnom stanju. Prikaz funkcioniranja paralelnog oteretnog kanala dan je na slici 2.1.2::7.

Ovisno o tome da li će oteretni i spojni kanali biti na račvama opremljeni preljevima ili ustavama, bit će moguće više ili manje upravljati vodnim režimom.

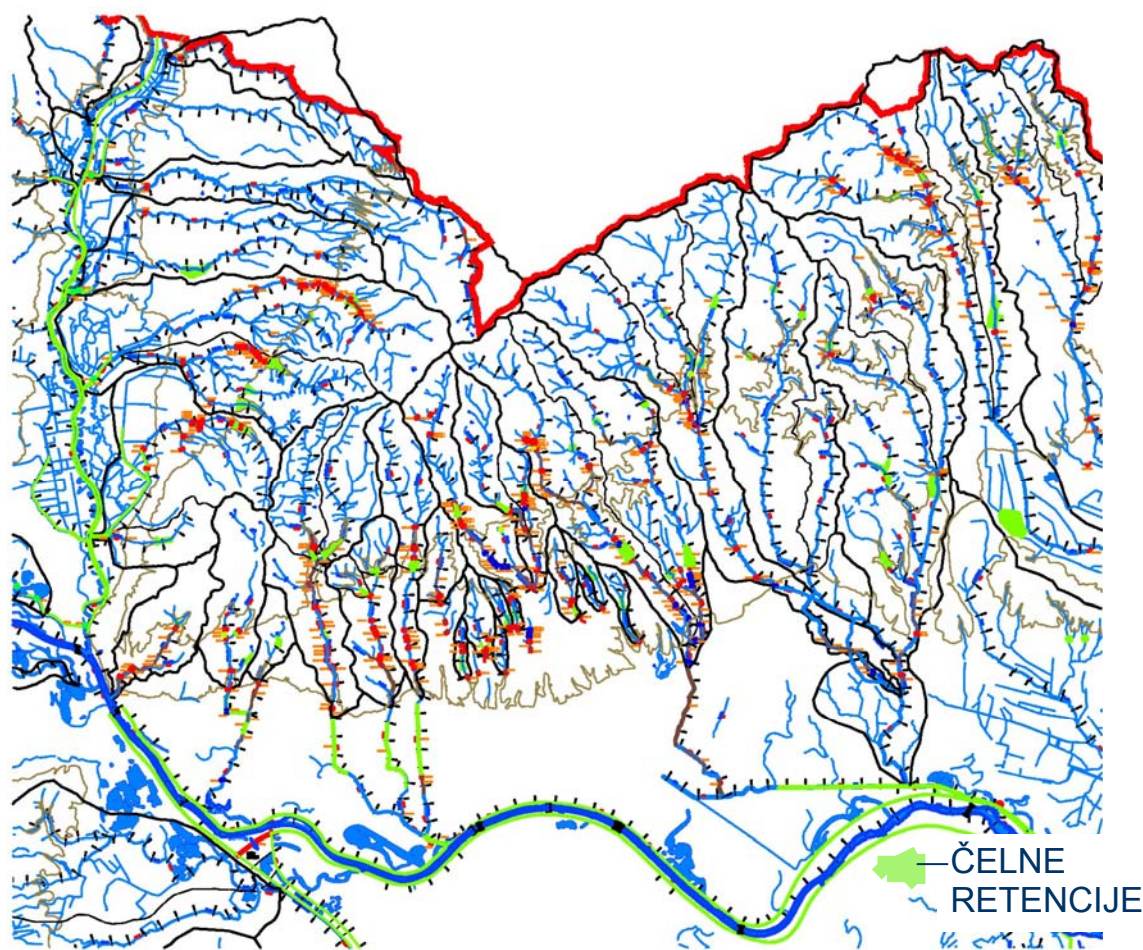


Slika 2.1.2::7 Prikaz funkcioniranja paralelnog oteretnog kanala

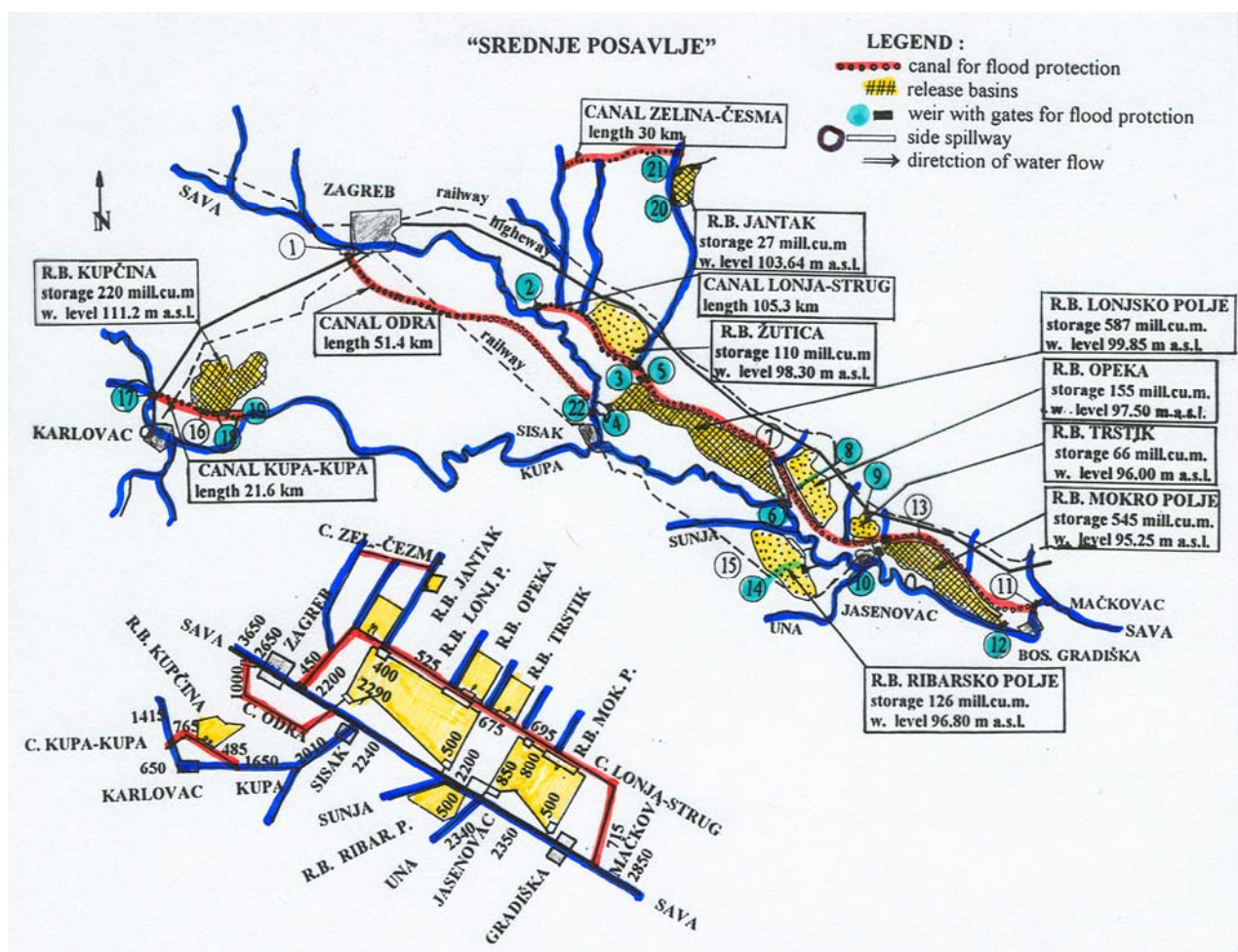
Primjeri

I konačno, radi ilustracije reguliranja vodnoga režima u smislu zaštite od negativnog utjecaja velikih voda prikazat ćemo primjere. Kao prvo, na slici 2.1.2::8 prikazan je sustav retencija na sljemenskim potocima kojima se Zagreb štiti od brdskih voda

Na slici 2.1.2::9 dan je prikaz sustava zaštite Srednjeg posavlja od velikih voda. Sustav je u izgradnji, a sastoji se od niza retencija, akumulacija i dva oteretna kanala.



Slika 2.1.2::8 Sustav retencija na sljemenskim potocima kojima se Zagreb štiti od brdskih voda



Slika 2.1.2.:9 Sustav zaštite Srednjeg posavlja od velikih voda

2.2 GRAĐEVINE ZA UREĐENJE VODNOG TOKA

Uređenje vodnih tokova često se naziva regulacijama. Regulacije prirodnih vodotoka su skup gradnji i mjera kojima se mijenjaju prirodne osobine na vodotoku i njegovom slivnom području radi:

- što racionalnijeg korištenja voda,
- što efikasnije zaštite od štetnog djelovanja voda iz vodotoka i
- što efikasnije zaštite vodotoka od zagađenja.

Ovisno o namjeni regulacija, bit će potrebno u većoj ili manjoj mjeri utjecati na promjenu prirodnih osobina vodotoka i otuda proizlaze inženjerske zadaće. No u tome treba biti jako oprezan i nikako se ne smije zanemariti da su vodotoci dio prirode koja se ravna po svojim zakonitostima. Uspješnost rješavanja spomenutih inženjerskih zadataka vezana je uz stupanj razumijevanja prirode vodotoka. Nasilno rješavanje uvjetuje žestok odgovor, rezultira neracionalnim i skupim rješenjima.



Slika 2.2.:1 Primjeri neadekvatnog uređenja vodotoka

Prirodnim vodotocima teče voda pomješana sa nanosom (suspendiranim i vučenim), vodotoci sami formiraju i erodiraju vlastito korito, a nastaju u sklopu fenomena hidrološkog ciklusa.

Iz gore navedenog može se zaključiti da je za ispravan pristup rješavanju problema uređenja vodnoga toka potrebno vladati znanjima o:

- zakonitostima tečenja vode (i nanosa) u otvorenim vodotocima
- zakonitostima procesa formiranja korita, erozijskih procesa i procesa pronosa nanosa i
- hidrološkim zakonitostima.

Prirodni vodotoci su «živi organizmi» jer u vremenu mijenjaju količinu vode (i nanosa) koje pronose i u vremenu mijenjaju svoje korito. Posjeduju silnu energiju koja je stalna, s vremenom varijacijama, i prema kojoj se treba odnositi s velikim uvažavanjem i razumijevanjem.

U okviru ovoga kursa nije moguće protumačiti svu problematiku vezanu uz gore navedeno. Ovdje će se dati samo neke osnove kako bi se dobio uvid o inženjerskim problemima koji se javljaju prilikom rješavanja uređenja korita prirodnih vodotoka. Odnosno težnja će se dati na građevine koje se koriste prilikom uređenja korita.

2.2.1 Podjela građevina za uređenje vodnog toka

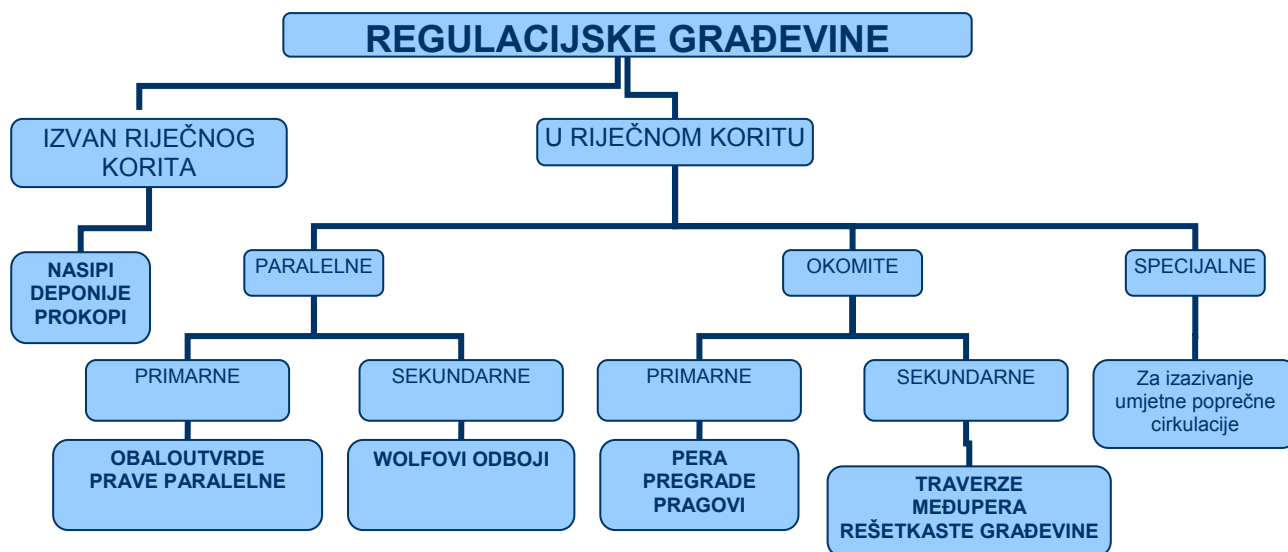
Građevine za uređenje vodnog toka su skupe. Razlog je veliki obim radova i specifičnost uvjeta izvođenja. Stoga se traže jeftina tehnička rješenja i to u dva smjera. Prvo, koriste se prirodni materijali kojih ima u blizini zahvata, a kao drugo koriste se sposobnosti vodotoka da sam gradi svoje korito. To znači da ćemo manjim zahvatima usmjeriti tok

vode tako da erodira dio korita koji želimo produbiti (ili proširiti), odnosno usporit ćemo tok na onim mjestima gdje želimo da se korito zasipa vlastitim nanosom vodotoka.

Regulacijske su građevine s konstrukcijskog aspekta jednostavne, međutim odabir tipa, razmještaj u prostoru i njihovo oblikovanje spadaju u grupu složenih inženjerskih izazova. Regulacijske građevine treba razumjeti ne kao osamljene objekte, već kao dio vodotoka koji će u sustavu, s obzirom na nove uvjete poprimiti drugačija obilježja. Na drugačiji će način teći voda, nanos će se kretati drugačije, korito vodotoka poprimit će drugačiji oblik. Sve to treba imati na umu, te je primjerenim proračunima posebno predvidjeti te promjene, kako bi krajnji učinak bio upravo onakav kakav želimo postići.

Specifičnost uvjeta izvođenja vezana je uz činjenicu da će se dio građevina trebati izvoditi u vodi koja se kreće. Jedino ćemo kod malih vodotoka moći privremeno skrenuti njegov tok i izvoditi radove u suhome. Kod rijeka to neće biti moguće, već će biti potrebno koristiti izgrađevine (polufabrikate) koji se kao elementi ugrađuju na projektiranu poziciju u vodi.

Relativno je veliki broj tipova regulacijskih građevina proizašao iz različitih potreba za uređenje vodotoka s jedne strane, i različitih uvjeta u kojima se izgrade građevine s druge strane. Na donjoj slici 2.2.1::1 prikazana je podjela regulacijskih građevina.



Slika 2.2.1::1 Podjela regulacijskih građevina

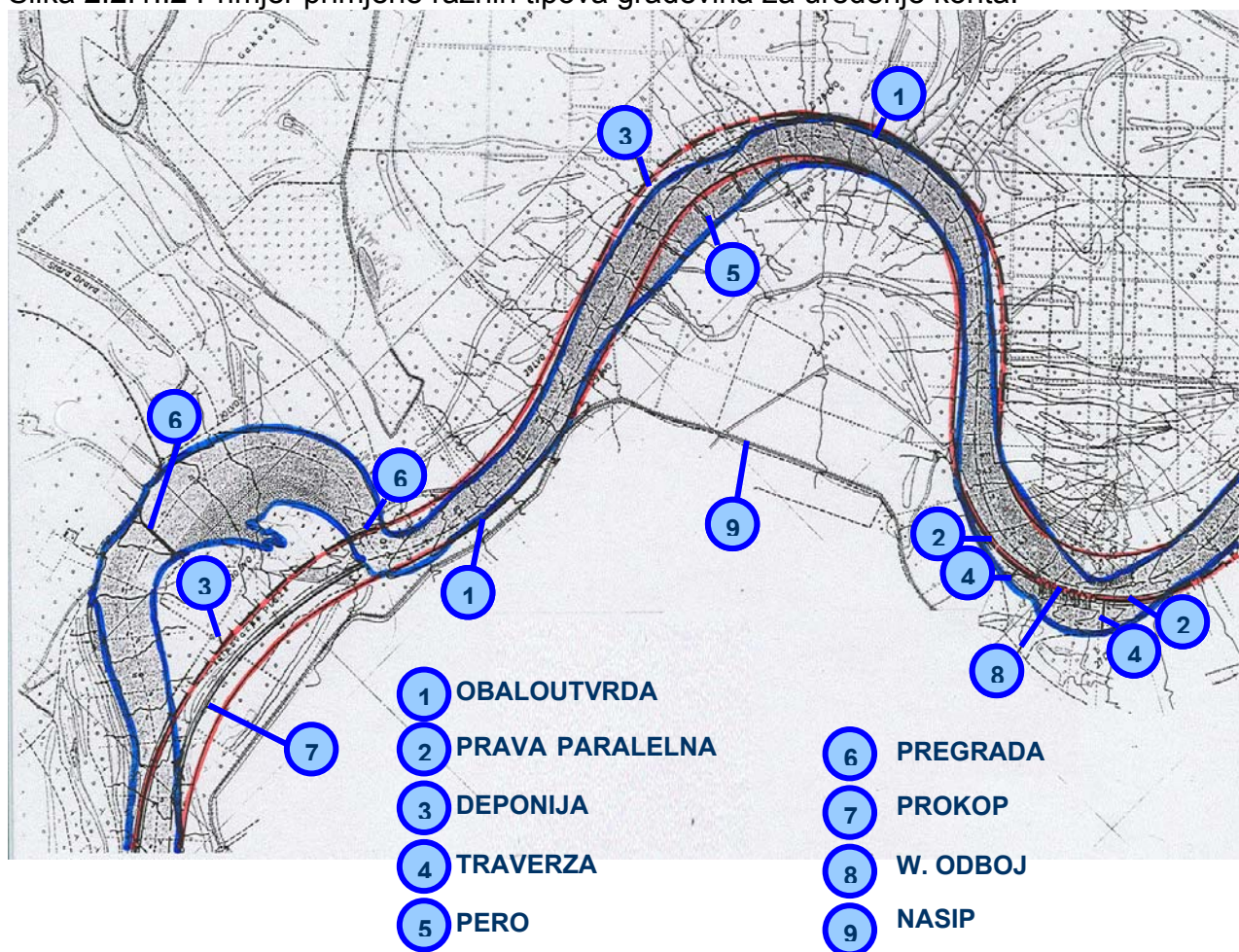
Regulacijske građevine treba koristiti kako bi se utjecalo na uzroke neželjenih stanja u koritu, a ne na saniranje posljedica toga stanja. Odabir tipa regulacijskih građevina koje će se koristiti za neki zahvat prvenstveno ovisi o namjeni regulacija. Osnovne namjene regulacija su:

- Povećanje erozije korita i njegovo produbljavanje
- Omogućavanje pronosa nanosa bez smetnji (pravilan pronos nanosa)
- Smanjenje erozije i izazivanje taloženja na određenim mjestima
- Povećanje protočnosti korita
- Kombinacija prethodnih namjena

Povećanje erozije korita i njegovo produbljivanje postiže se suženjem protočnog presjeka i povećanjem uzdužnog pada. Pravilan pronos nanosa postiže se ispravnim trasiranjem regulacijskih linija (osi vodotoka i obalnih linija), te održavanjem traženih brzina toka. Erozijsku čemo smanjiti proširenjem protočnog presjeka, smanjenje uzdužnog pada i povećanjem otpora tečenju. Ako se radi o spriječavanju lokalne erozije, tada ćemo trebati odmaknuti maticu vodotoka. Povećanje protočnosti se postiže uklanjanjem naglih promjena presjeka korita, povećanjem proticajnog profila i povećanjem uzdužnog pada.

Da bi se provelo uspješno uređenje korita vodotoka bit će potrebno koristiti više tipova regulacijskih građevina. Na slici 2.2.1::2 dana je situacija jedne dionice vodotoka na kojem je primijenjen niz tipova građevina za uređenje korita.

Slika 2.2.1::2 Primjer primjene raznih tipova građevina za uređenje korita.

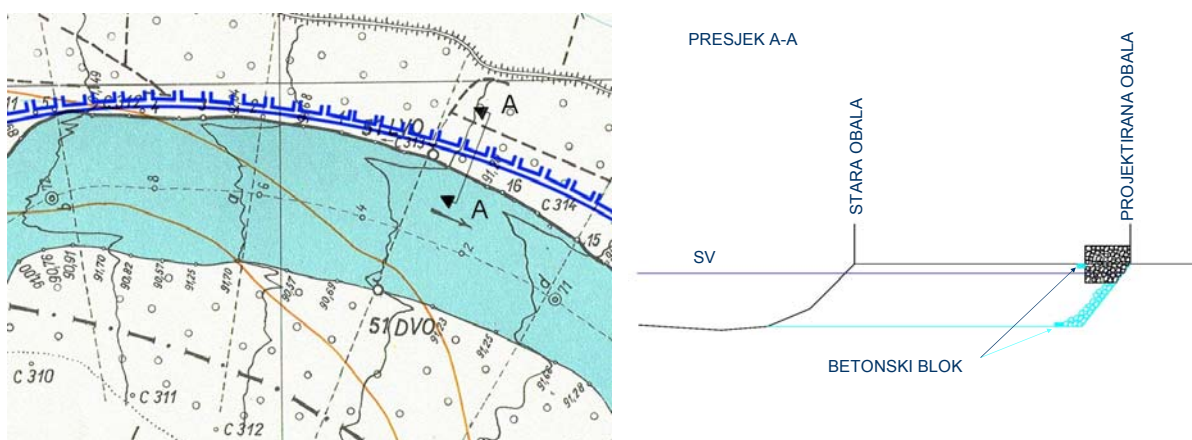


U nastavku ćemo protumačiti funkcionalnost i konstrukciju samo glavnih regulacijskih građevina.

2.2.2 DEPONIJE (kamene naslage)

Deponije su regulacijske građevine izvan glavnog korita čija je namjena sprečavanje daljnje erozije obale (stabilizacija obale na projektiranom položaju). Izvode se na projektiranoj trasi obale izvan korita vodotoka. Vrlo su jednostavne konstrukcije. Radi se o najobičnijem nasipu od kamenaog materijala čiji promjer zrna je takav da može odoljevati hidrodinamičkom opterećenju toka vode. Taj nasip može biti djelomično ukopan u tlo, a može biti izveden na način da se formira suhozid.

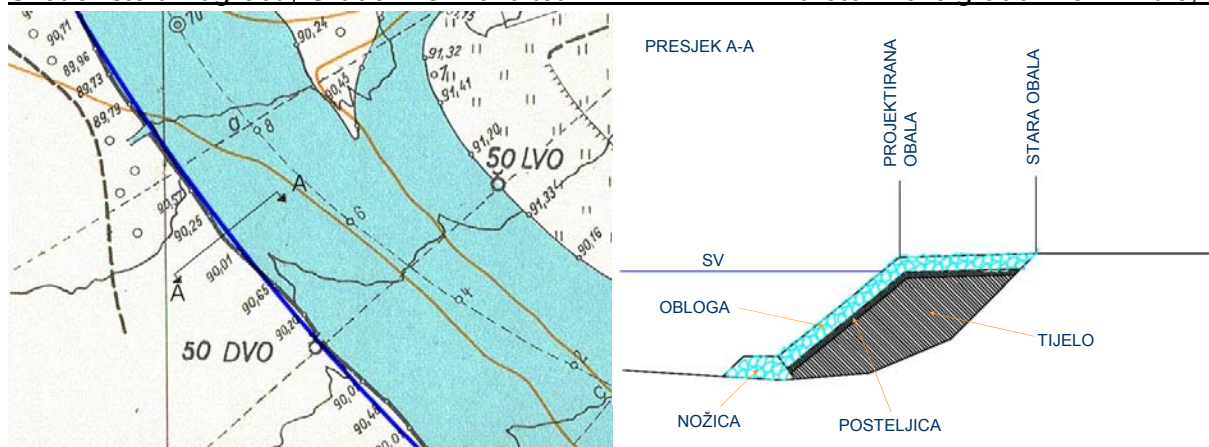
Na mjestu gdje je postoji prirodna ili umjetno izazvana erozija obale, vodotok se širi. Proces je postupan i nije moguće predvidjeti koliko će daleko vodotok erodirati tu obalu, niti koliko će dugo taj proces trajati. Kako bi spriječili prekomjernu eroziju i neželjeni pomak obale izvode se deponije. One se, nakon što ih vodotok podloče, uruše i oblože pokos obale. Kasnije se ta obala uredi u konačan oblik.



Slika 2.2.2::1 Shematski prikaz deponija

2.2.3. OBALOUTVRDE

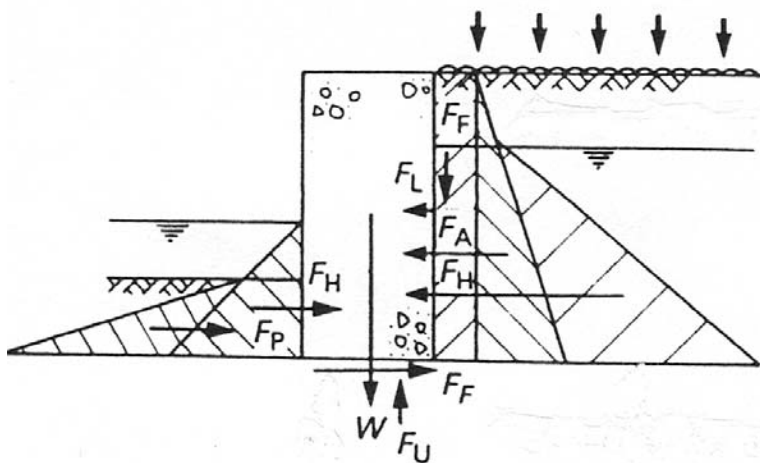
Regulacijske građevine u koritu vodotoka kojima se obale štite od erozije, te se njima usmjerava vodni tok uz obalu. Jedne su od najčešćih regulacijskih građevina. Koristimo ih na mjestima gdje su postojeća obala i projektirana po trasi vrlo blizu, kako ne bismo imali velike zemljane radove na iskopu ili nasipavanju.



Slika 2.2.3::1 Shematski prikaz obaloutvrde

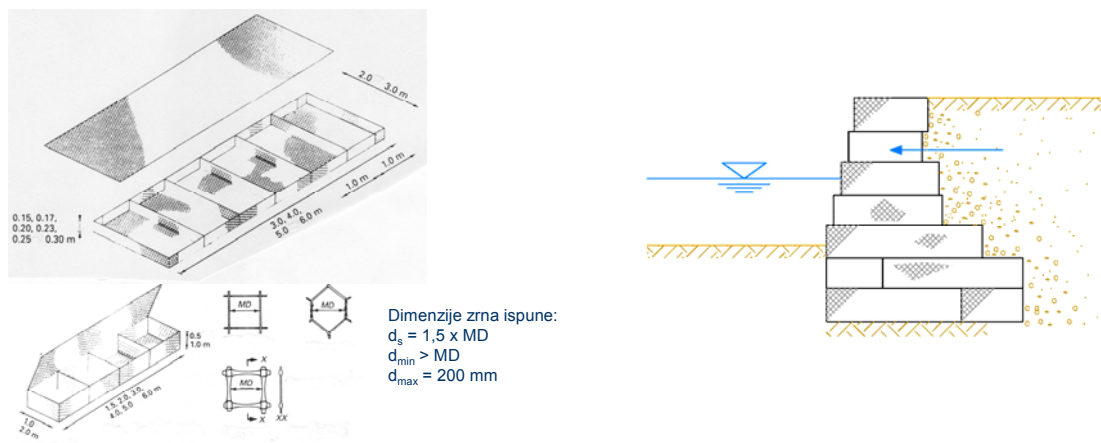
Veliki je broj tipova konstrukcija obaloutvrda koje se koriste u vodogradnjama. Osnovna podjela je na vertikalne i kose konstrukcije. Osnovna razlika, u konstruktivnom smislu je u prijenosu horizontalnih opterećenja. Vertikalne konstrukcije horizontalna opterećenja trebaju prenijeti u tlo, dok kod kosih konstrukcija samo tlo preuzima ta opterećenja (pitanje stabilnosti kosina). Vertikalne konstrukcije dijelimo na dvije osnovne grupe, također vezano uz prienos horizontalnih sila. U prvu grupu spadaju gravitacijske konstrukcije kod kojih se horizontalna opterećenja prenose na tlo posredstvom vlastite težine građevine. Kod tog tipa, u samoj se konstrukciji ne pojavljuju vlačna naprezanja. Druga grupa predstavlja tipove kod kojih se horizontalna opterećenja prenose u tlo posredstvom unutarnjih sila u konstrukciji. Kod njih se javljaju i vlačna naprezanja.

Tipovi obaloutvrda	
VERTIKALNE KONSTRUKCIJE	KOSE KONSTRUKCIJE
- gravitacijske konstrukcije (beton i armirani beton, gabioni, armirana zemlja) - AB L-zidovi, žmurje i dijafragme (čelično žmurje, armiranobetonsko žmurje, armiranobetonske dijafragme)	- zaštita obala prirodnim materijalima (biološke vodogradnje) - konstrukcije od kamena i gabiona - betonske konstrukcije - geotekstil i geomembrane - asfaltne konstrukcije



Slika 2.2.3::2 Shematski presjek vertikalne gravitacijske betonske konstrukcije obaloutvrde s naznakom sila koje djeluju na nju

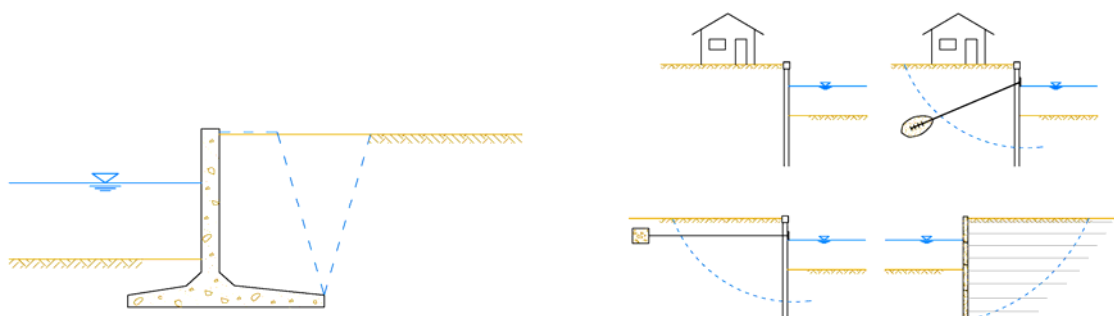
Gravitacijske konstrukcije od gabiona se često koriste u regulacijama vodotoka zbog toga što su prilagodljive i vodopropusne. Ne samo da se prilagođavaju neravninama temeljnog tla, nego podnose i deformacije tijekom eksploatacije. Izvode se od košara i madraca (čelične pletene ili zavarene žice zaštićene od korozije cinčanjem ili slojem PVC-a, polimerne mreže) koji se ispune kamenim materijalima (trajni, otporan na trošenje, te utjecaje vode smrzavice i atmosferilija).



Slika 2.2.3::3 Gabionski madraci i košare kao elementi vertikalne gravitacijske konstrukcije obaloutvrde



Slika 2.2.3::4 Vertikalne gravitacijska obaloutvrda od gabionskih košara

AB L-zidovi, žmurje i dijafragme

Slika 2.2.3::5 Shematski presjek vertikalnih konstrukcija obaloutvrde tipa AB L-zida, korištenjem žmurja, dijafragmi i armirane zemlje

Kose konstrukcije**OBLOGA**

Štiti konstrukciju od izravnih erozijskih sila vode (strujanje, valovi)

Vodopropusnost

Fleksibilnost (podatnost – prilagodivost deformacijama)

POSTELJICA

Filtracija

Dreniranje

Zaštita od ispiranja tokom paralelno s pokosom

Izravnavanje temeljnog tla - temelj za ugradnju obloge

Odvajanje konstrukcije od temeljnog tla

Sekundarna zaštita u slučaju gubitka dijela obloge

Disipacija energije unutrašnjeg toka vode

Tipovi obloge**Kamena**

Kamenomet (rip-rap)

Rukom slagana obloga (roliranje)

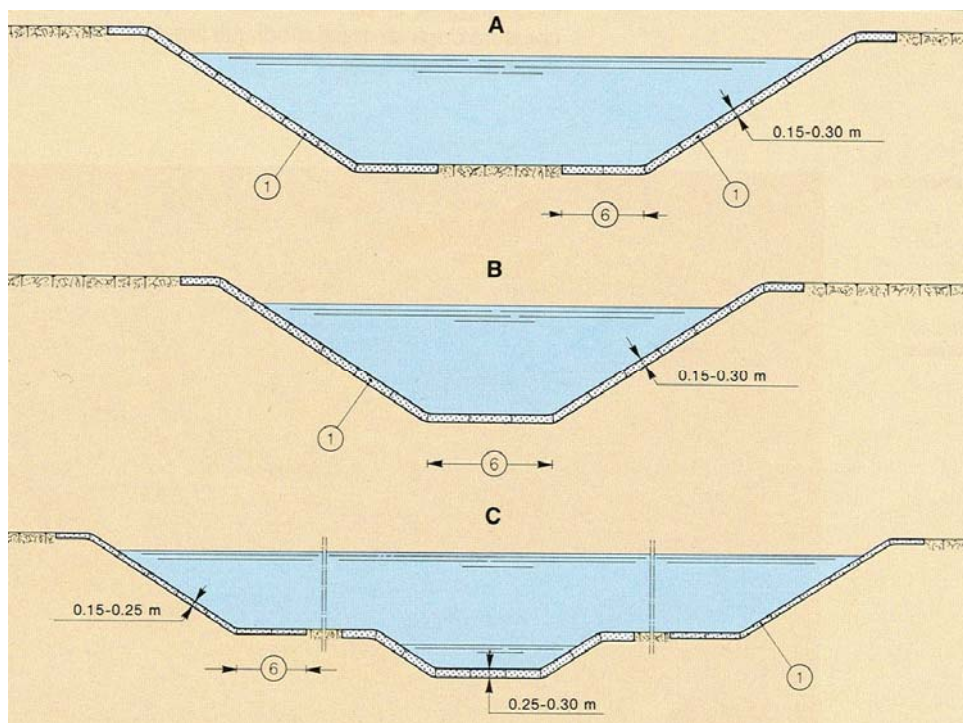
Zidana obloga u mortu

Kameni blokovi povezani asfaltnim mastiksom



Slika 2.2.3::6 Kosa obaloutvrda s oblogom od lomljenog kamena

Gabionski madraci





Slika 2.2.3::7 Kosa obaloutvrda s oblogom od gabionskih madraca

Betonska

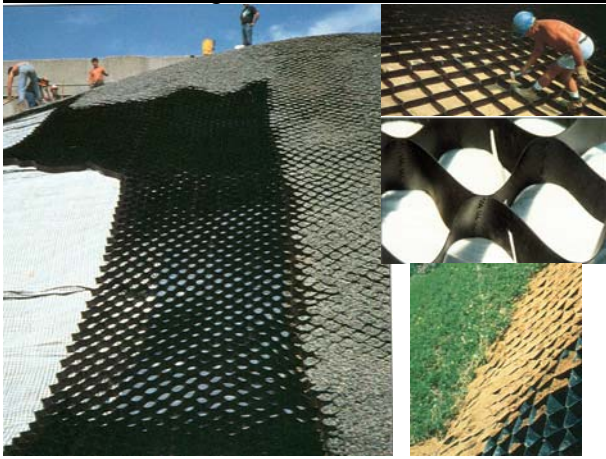
- Montažni betonski blokovi (slobodno položeni)
- Uklješteni betonski blokovi
- Povezani betonski blokovi (užadima)



Slika 2.2.3::8 Kose obaloutvrde s oblogom od betonskih blokova

Geotekstil

- Zatravljeni kompozitni madraci
- Trodimenzijski madraci i mreže
- Dvodimenzijske mreže



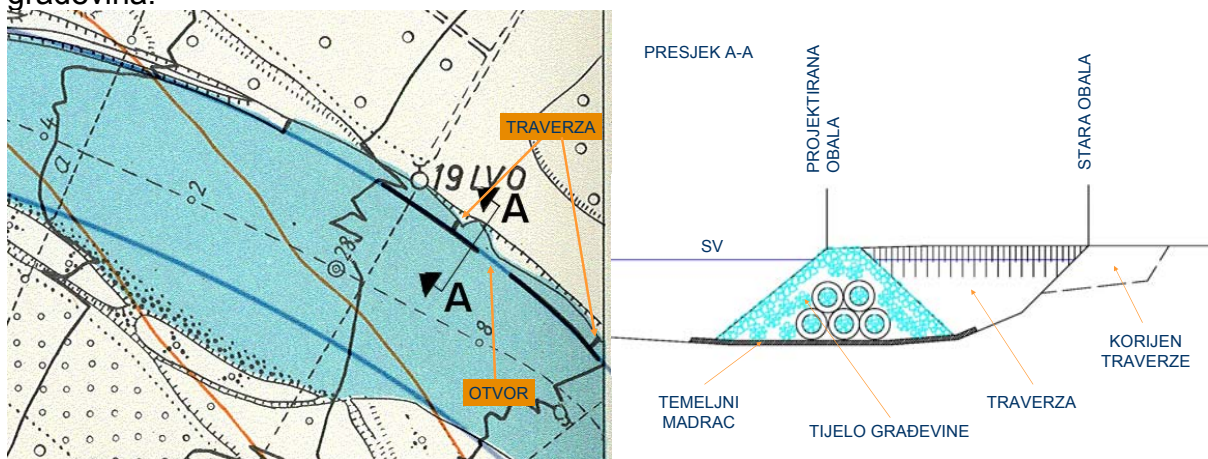
Slika 2.2.3::9 Kose obaloutvrde s oblogom od sintetskih materijala ispunjenih zemljom

Asfalt

Asfaltbeton (zahtjev nepropusnosti)

2.2.4 PRAVE PARALELNE GRAĐEVINE (uzdužne)

Regulacijske građevine u riječnom koritu kojima se (uglavnom na konkavnim stranama) obala premiješta u korito rijeke. Uglavnom se izgrade kao nasipne konstrukcije od lomljenog kamena trasirane na poziciji buduće obale vodotoka. Prostor između paralelne građevine i postojeće obale vremenom se ispunjava nanosom te se u konačnici zatrpa. Taj proces ubrzava izgradnja traverzi – poprečnih građevina između postojeće obale i paralelne građevine, te otvora koji omogućavaju komunikaciju vode i taloženje nanosa i kod manjih vodostaja. Slika 2.2.4::1 daje shematski prikaz paralelnih regulacijskih građevina.



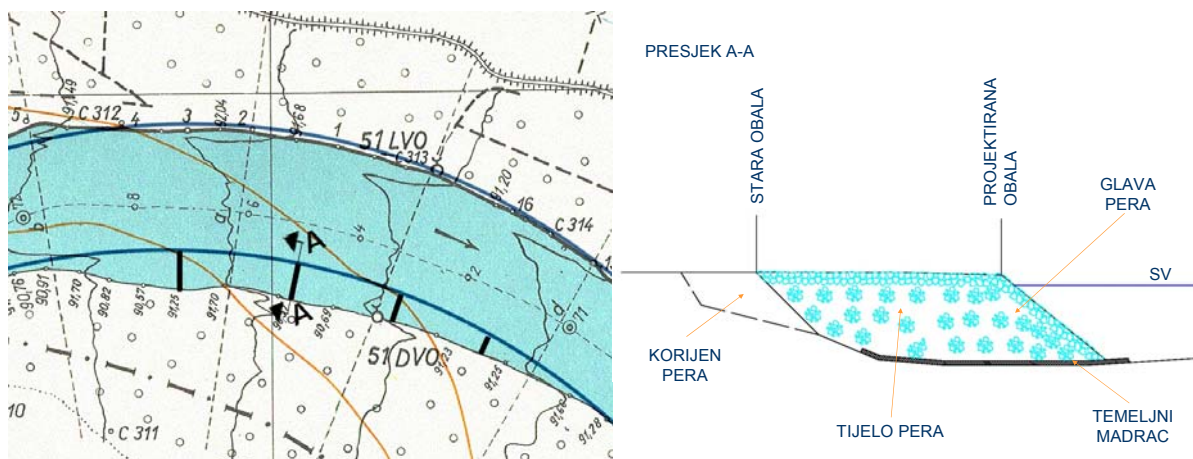
Slika 2.2.4::1 Shematski prikaz paralelnih regulacijskih građevina



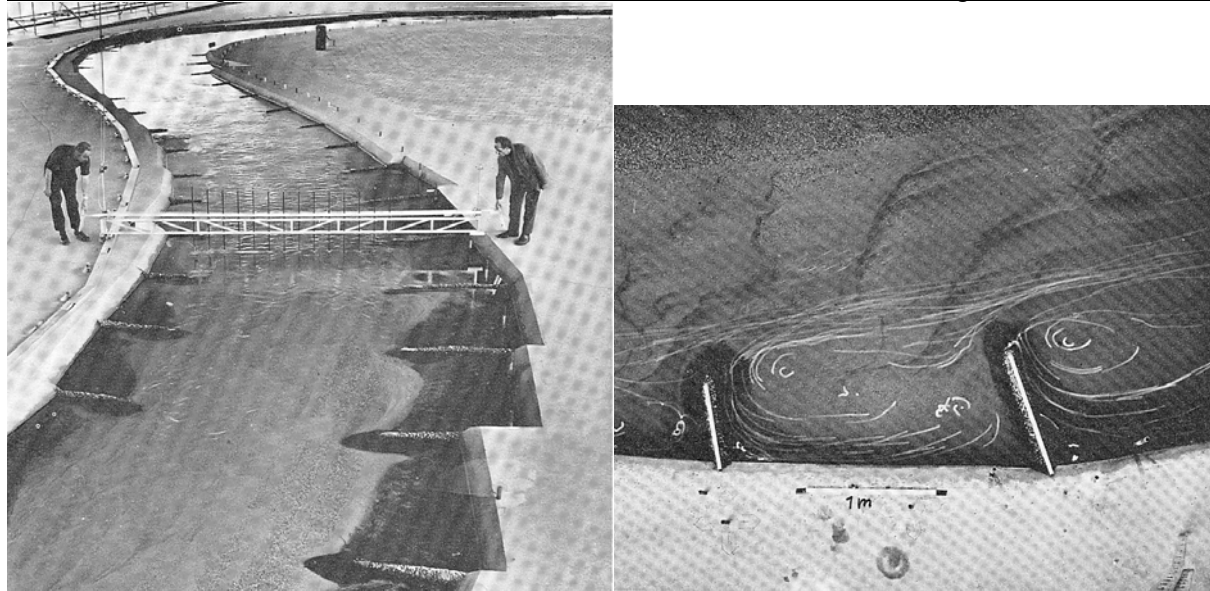
Slika 2.2.4::2 Paralelna regulacijska građevina na rijeci Rajni

2.2.5 REGULACIJSKA PERA

Regulacijska pera su građevine u riječnom koritu kojima se obala premiješta u korito rijeke. Poprečne su građevine, a izvode se na način da se od postojeće obale do trase buduće obale nekom konstrukcijom (najčešće nasipom od lomljenog kamena) djelomično prepreči protočni profil korita. Učinak im je povećanje brzine toka (zbog kontrakcije protočnog profila), a time i povećanje erozijske sposobnosti vodotoka što za posljedicu ima produbljivanje korita. S druge strane prostor između pera postaje umrtvljena zona za proticanje vode te se tako inicira taloženje suspendiranog nanosa. S vremenom prostor se zatrpa i pomiče se obala u korito. Na slici 2.2.5::1 dan je shematski prikaz regulacijskih pera u tlocrtu i poprečnom presjeku. Zbog izrazito velike izazvane turbulencije u zoni glave pera, tome dijelu konstrukcije potrebno je posvetiti posebnu pažnju. Za pera potrebno je odrediti njihovu duljinu, visinu, razmak i otklon u odnosu na smjer toka vode, kako bi se postigao željeni učinak. Na slici 2.2.5::2 dane su fotografije ispitivanja učinka regulacijskih pera na fizikalnom modelu.



Slika 2.2.5::1 Shematski prikaz regulacijskih pera



Slika 2.2.5::2 Ispitivanja učinka regulacijskih pera na fizikalnom modelu



Slika 2.2.5::3 Regulacijska pera na rijeci Savi

Regulacijska pera i paralelne građevine su često konkurentna rješenja za istu namjenu. Svako od njih ima svoje prednosti i mane, što je opisano u nastavku:

PARALELNE GRAĐEVINE

PREDNOSTI

- Ujednačeno tečenje
- Kontinuirano definiranje regulacijske linije
- Nema generiranja lokalnih erozija u koritu
- Ujednačen pronos nanosa

MANE

- Veliki troškovi građenja
- Teško i skupo ispravljanje grešaka
- Poteškoće u izvođenju (temeljenje)
- Nasipavanje staroga korita je usporeno
- Potrebna jaka osiguranja nožice građevine

PERA

PREDNOSTI

- Laka prilagodba i ispravljanje pogrešaka
- Efikasno nasipavanje staroga korita
- Manji troškovi izgradnje

MANE

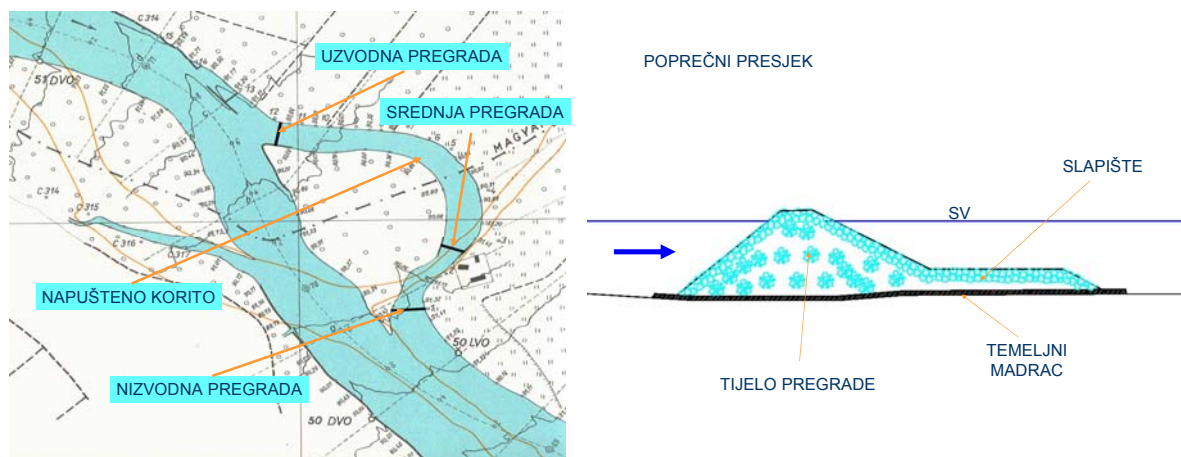
Izazivanje poprečnih strujanja u koritu vodotoka

Česte havarije kod velikih voda (prelijevanje preko pera)

Definiranje regulacijske obale je točkasto (a ne kontinuirano)

2.2.6 PREGRADE

Pregrade su pomoćne regulacijske građevine kojima se pregrađuju suvišni rukavci ili napušteno korito. Preljevne su građevine (za trajanja velikih voda) te je stoga posebnu pozornost potrebno posvetiti uređenju nizvodne nožice (slika 2.2.6::1)

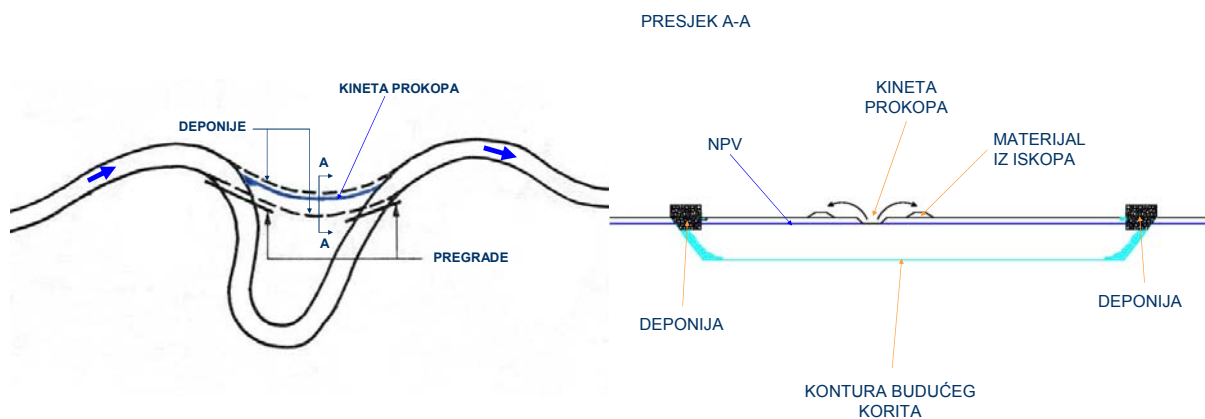


Slika 2.2.6::1 Shematski prikaz regulacijskih pregrada

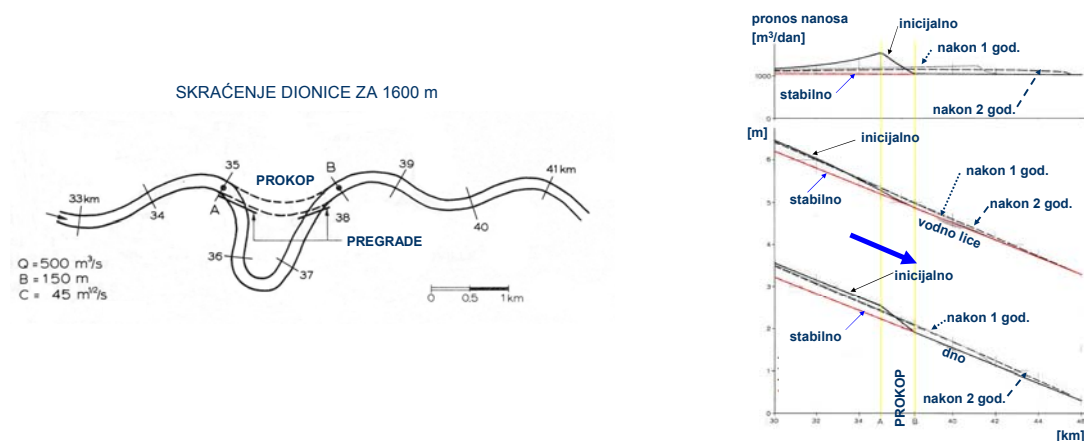
**2.2.7 PROKOPI**

Prokopi su regulacijske građevine (zahvati) presjecanja meandra kojima se skraćuje tok rijeke. Prokopi se koriste na mjestima gdje se prirodni meandar želi skratiti zbog potreba plovnosti, povećanja protočnosti vodotoka ili potreba korištenja meandra za druge svrhe (npr. osnivanje luke ili zimovnika). Na mjestu prokopa kombinira se niz regulacijskih građevina. To su obaloutvrde na koritu vodotoka ispred i iza prokopa, zatim kamene deponije na samom prokopu, kineta prokopa kao inicijalno korito te pregrade. Na slici

2.2.7::1 dan je shematski prikaz prokopa s pripadajućim građevinama. Obaloutvrde sprečavaju neželjene promjene na koritu vodotoka ispred i iza prokopa. Kinet, kao inicijalno korito izvodi se kao kanal do razine podzemne vode i uvijek se trasira bliže konveksnoj (unutrašnjoj) obali zavoja korita. Deponije služe kontroli procesa širenja prokopa i ograničavanju na projektnu širinu. Pregrade se izvode s uzvodne i nizvodne strane prokopa ili samo s uzvodne strane, ovisno o tome da li će se napušteno korito koristiti u neke svrke (luka) ili ne. One se izvode tek nakon što se gotovo u cjelosti formira novo korito, odnosno dok se ne formira do te mjere da njime može nesmetano protjecati voda, nanos i led (kako ne bi izazvale preveliki uspor vode i eventualno poplave uzvodno od prokopa). Pregrade ubrzavaju proces konačnog formiranja prokopa, ali se obično izvode u fazama (ili po visini ili po duljini) kako bi se do potpunog formiranja korita kroz staro korito mogle propuštati vodne količine velikih vodnih valova. Prokopi su relativno agresivni zahvati na vodotoku koji imaju posljedice u promjeni režima tečenja, režima pronosa nanosa te na promjene geometrije korita ne samo na lokaciji prokopa nego i šire. Razlog je lokalno skraćenje zbog kojeg se inicijalno lokalno povećava uzdužni pad (veća energija toka). Na slici 2.2.7::2 dan je prikaz promjena u režimu pronosa nanosa i promjene dna na jednom prokopu kroz vrijeme.



Slika 2.2.7::1 Shematski prikaz prokopa



Slika 2.2.7::2 Primjer promjena u režimu pronosa nanosa i promjene dna na jednom prokopu

2.2.8 PRORAČUNI STABILNOSTI KORITA

Kada govorimo o stabilnosti korita tada se susrećemo sa dva tipa problema. Jedan se odnosi na narušavanje globalne stabilnosti korita, a drugi na narušavanje lokalne stabilnosti korita. Globalna nestabilnost korita nastaje kada se zbog erozijske sposobnosti vodnog toka cjelokupni profil vodotoka počne erodirati. Odnosno dolazi do odnašanja materijala sa dna i/ili pokosa korita. To je problem s kojim se suočavamo na velikoj većini naših vodotoka, poglavito na našim najvećim rijekama (Sava, Drava, Dunav). Lokalna nestabilnost korita najčešće nastaje uslijed izgradnje građevinskih konstrukcija u koritu vodotoka koja remete režim strujanja, uslijed naglih promjena geometrije korita uzduž toka i uslijed pojave valova.

Globalna nestabilnost korita vodotoka

Dva su proračunska pristupa kojima određujemo globalnu (ne)stabilnost. Jedan je pristup dopuštenih posmičnih napreznja, kada kažemo da će do nestabilnosti korita doći kada će posmična napreznja vode na korito (tzv “vučna sila vode”) premašiti dopuštena napreznja za materijal u kojem je izgrađeno korito. Drugi pristup granične brzine toka kaže da će do nestabilnosti korita doći kada će brzina toka premašiti dopuštene vrijednosti.

Posmično naprezanje toka vode (S - “vučna sila vode”) je prosječno posmično naprezanje po konturi korita određeno izrazom:

$$\bar{\tau} \approx \rho g R I = S$$

gdje su:

ρ - gustoća mase vode [kg/m^3],

g – ubrzanje sile teže [m/s^2],

R – hidraulički radijus [m],

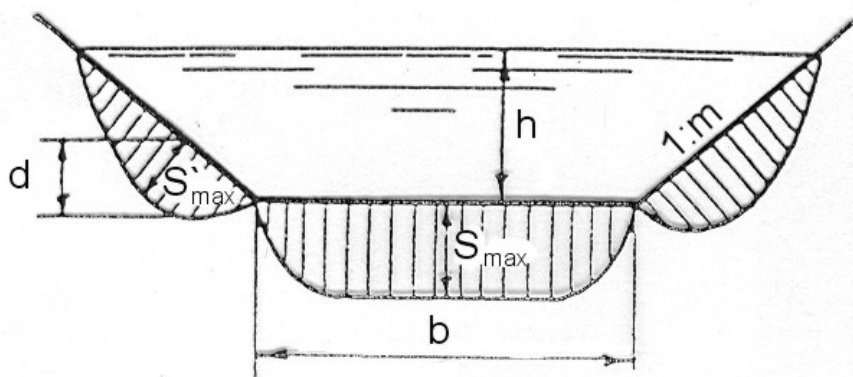
I – uzdužni pad vodnog lica [m/m].

Po konturi korita vodotoka napreznja nisu jednolika (Slika 2.2.8::1). Maksimalno naprezanje na dnu $S_{\max}$ i na pokosu $S'_{\max}$ moguće je odrediti iz slijedećih jednadžbi:

$$S_{\max} = k_m \rho g h I$$

$$S'_{\max} = k'_m \rho g h I$$

Gdje su k_m i k'_m koeficijenti ovisni o nagibu pokosa m i odnosa širine dna korita i dubine vode b/h (za široka korita $b > 5h$ mogu se uzeti vrijednosti $k_m=1$ i $k'_m=0,77$).



Slika 2.2.8::1 Raspodjela posmičnih naprezanja po perimetru korita vodotoka

S druge strane, dopuštena se posmična napreznja za nevezane materijale mogu odrediti prema izrazu Meyer-Peter Müllera:

$$\tau_o = 0,047 (\rho_n - \rho_v) g d_s \left[\text{N/m}^2 \right]$$

gdje su:

ρ_n - gustoća mase materijala tvorbe dna [kg/m^3],

ρ_v - gustoća mase vode [kg/m^3],

g - ubrzanje sile teže [m/s^2],

d_s - srednji promjer zrna materijala tvorbe dna [m].

Kod pristupa granične brzine toka, potrebno je za materijal u kojem je izgrađeno korito odrediti njenu vrijednost. To se može za nevezane materijale odrediti iz izraza prema Pilarczyk:

$$\frac{d_{n50}}{h} = \left(\frac{v_g}{B_1 \sqrt{k' \Psi_{cr} g \Delta m h}} \right)^{2,5}$$

gdje su:

d_{n50} - promjer 50% zrna materijala tvorbe dna [m],

h - dubina vode [m],

B_1 - koeficijent intenziteta turbulencije [m/m]:

	B_1
JAKA TURBULENCIJA	5 – 6
NORMALNA TURBULENCIJA	7 – 8
MALA TURBULENCIJA	8 – 10

Ψ_{cr} - koeficijent kriterija pomaka čestica na dnu [m/m]:

	Ψ_{cr}
NEPOKRETNOST DNO	0,03
POČETAK NESTABILNOSTI	0,04
POMICANJE	0,06

$$k' = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi}}$$

α - kut nagiba pokosa [°]

φ - kut unutrašnjeg trenja materijala tvorbe dna [°]

$$\Delta m = \frac{\rho_n - \rho_v}{\rho_v}$$

Lokalna nestabilnost korita vodotoka

Problem lokalne (ne)stabilnosti korita vodotoka javlja se u slijedećim slučajevima:

- Stupovi mostova
- Nasipi upornjaka mostova
- Regulacijske građevine
- Oštri zavoji
- Vjetrovni valovi
- Valovi generirani prolaskom brodova
- Poriv vijka brodova

U nastavku, na slici 2.2.8::2 dani su neki primjeri problema lokalne nestabilnosti korita vodotoka.

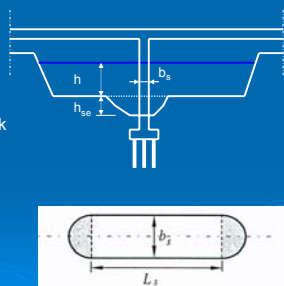
Dubina podlokavanja oko stupa mosta

$$\frac{h_{se}}{h} = C_1 Fr^{0.43} \left(\frac{b_s}{h} \right)^{0.65}$$

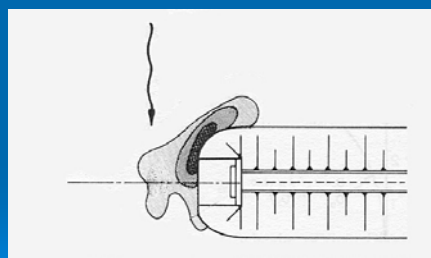
$C_1=2,0$ – kružni poprečni presjek

$C_1=2,2$ – kvadratni i izduženi poprečni presjek

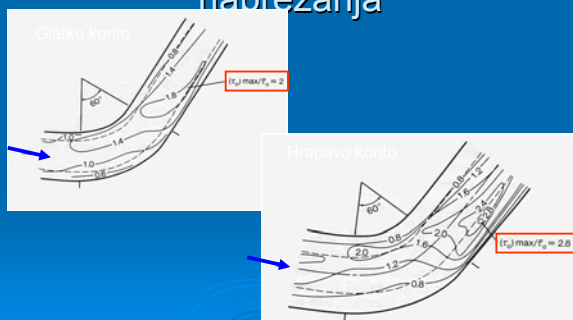
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h}}$$



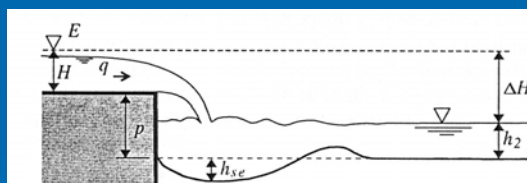
Podlokavanje u zoni poprečnih građevina



Utjecaj oštrog zavoja na promjenu veličine posmičnih nanrezanja



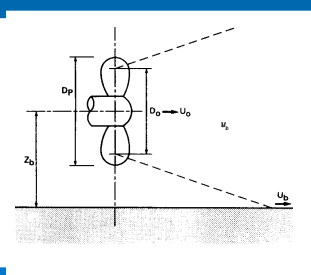
Podlokavanje iza stepenice



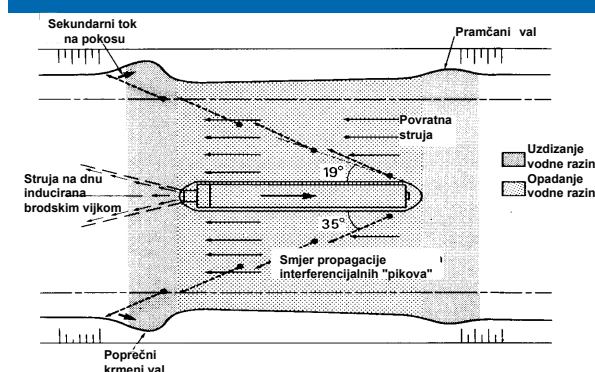
$$h_{se} + h_2 = 4,75 \Delta H^{0,20} q^{0,75} d_{90}^{-0,32}; h, H [m] \quad d [mm] \quad q [m^2/s]$$

(Schoklitsch)

Poriv vijka brodova



$V_s [m/s]$	0	1	2
$U_b [m/s]$	2,5	2,0	1,5



Slika 2.2.8::2 Primjeri problema lokalne nestabilnosti korita vodotoka

2.3. KANALI I GRAĐEVINE NA KANALIMA

Kanali su umjetni vodni tokovi. Njima se voda kreće ili stoji, ovisno o namjeni. Vrste kanala dijelimo prema namjeni. Tako ćemo se najčešće sretati sa sljedećim vrstama kanala:

- oteretni kanali – za obranu od poplava,
- kanali za navodnjavanje – za navodnjavanje (natapanje) poljoprivrednog zemljišta,¹
- odvodni kanali – za odvodnju s poljoprivrednog zemljišta,
- plovni kanali – za plovību,
- derivacijski kanali – za energetiku.

Uz navedeno, kanali mogu služiti za vodoopskrbu, odvodnju otpadnih voda, tranzit riba, transport trupaca, itd.

Dakako, jedan kanal može istodobno imati više namjena, što je naročito značajno s aspekta njegove ekonomske opravdanosti, budući da se troškovi izvedbe i održavanje kanala raspodjeljuju na više korisnika. Tada je riječ o višenamjenskim kanalima.

Pri tome valja istaći jednu vrlo bitnu činjenicu.

Budući da je u principu svaki tip kanala s aspekta namjene karakteriziran određenim zahtjevima (npr. uzdužnim padom, brzinom, poprečnim profilom, protokom) kojima s obzirom na namjenu mora udovoljiti, i koji su u određenoj mjeri, sukladno namjeni kanala, svakako različiti, očito je da će kod višenamjenskih kanala usvojeno rješenje uvijek predstavljati kompromis između tih donekle suprotstavljenih zahtjeva. To će ujedno neminovno rezultirati i time da usvojeno rješenje višenamjenskog kanala neće biti optimalno s aspekta pojedinačne namjene, budući da optimalno rješenje složenog sustava nije zbroj optimuma podsustava.

Izgradnja kanala zahtijeva velika novčana ulaganja, a može potrajati ne samo nekoliko godina i desetljeća, nego i stoljeća (npr. prvi metri plovnog kanala Rajna-Majna-Dunav, dužine 171 [km], započeti su 793. godine).

Sukladno definiciji, projektiranje kanala je u stvari projektiranje novog umjetnog vodotoka za određenu namjenu, karakteriziranog, pod pretpostavkom projektnog protoka, sa sljedećim elementima:

- trasom kanala,
- (poprečnim) profilom kanala,
- uzdužnim padom, odnosno graničnim vrijednostima (minimalno i maksimalno) dopuštenih brzina,
- obloženošću / neobloženošću pokosa i dna (korita) kanala,
- građevinama na kanalu.

Trasa kanala, poprečni profil i uzdužni profil u međusobnoj su uzročno-posljedičnoj vezi. Njima se prostorno oblikuje kanal. Promjenom jednog od ta tri elementa neminovno je potrebno promijeniti i druga dva.

Prije nego što se nastavi s opisom nabrojenih elemenata kanala, kod hidrauličkog proračuna kanala konstantnog protoka pretpostavlja se jednoliko tečenje sa slobodnim vodnim licem. Ovo je tečenje opisano Chezyjevom jednadžbom koja s Manningovim koeficijentom hrapavosti, n [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$], odnosno Stricklerovim koeficijentom brzine, k_s [$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$] = $1/n$, ima oblik:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} = k_s R^{2/3} I^{1/2} \quad (2.3-01)$$

odnosno:

$$Q = vA = \frac{1}{n} AR^{2/3} I^{1/2} = k_s AR^{2/3} I^{1/2} \quad (2.3-02)$$

gdje je v [m s^{-1}] – srednja brzina vode (brzina toka) u kanalu, R [m] – hidraulički radijus, A [m^2] – protjecajna površina, I [1] – uzdužni pad dna kanala, jednak padu vodnog lica u liniji energije.

Hidraulički proračun kanala kroz koji prolazi protok promijenljiv u vremenu (npr. oteretni kanali), složeniji je i neće se ovdje tumačiti.

2.3.1. NAMJENA KANALA

1) **Oteretni kanali** koriste se za zaštitu potencijalno ugroženog područja od poplava u slučajevima kada prirodni vodotok nema dostatan kapacitet preuzimanja velikog vodnog vala. Ovi su kanali često povezani s prostorima za privremeno zadržavanje velikih voda (retencija, akumulacija) odakle se uskladištene vode, nakon određenog vremena, kontrolirano ispuštaju u prirodni vodotok.

2) **Kanali za navodnjavanje** jesu dovodni (glavni ili primarni) kanali koji dovode vodu namijenjenu navodnjavanju poljoprivrednih površina do mreže natapnih (sekundarnih) kanala kojima se voda distribuira po poljoprivrednoj površini.

3) **Odvodni kanali** jesu kanali odvodnje poljoprivrednih površina, gdje se višak vode prihvaća mrežom kanala (nižeg) IV. reda i odvodi mrežom kanala (višeg) III. i II. reda, te upušta u recipijent – kanal I. reda. U tu grupu spadaju i tzv. obodni ili lateralni kanali koji sakupljaju vodu sa sliva izvan poljoprivrednih površina i na taj način ih štite od utjecaja vanjskih voda.

4) **Plovni kanali** jesu umjetni unutrašnji plovni putevi koji nadopunjuju mrežu prirodnih unutrašnjih plovni puteva (rijeka, jezera). Stoga su čest pratilac ovih kanala visinske razlike koje treba savladati brodskim prevodnicama ili dizalima.

5) **Derivacijski kanali** služe za dovod vode do hidroelektrana, odnosno oni se koriste da vodu namijenjenu proizvodnji električne energije dovedu do hidroelektrana.

2.3.2. TRASA KANALA

Izbor optimalne trase kanala osniva se (a) na istražnim radovima koji rezultiraju topografskim, hidrološkim, hidrauličkim, inženjerskogeološkim, hidrogeološkim i geotehničkim podlogama, te (b) varijantnom projektiranju sa stajališta racionalnosti, tj. funkcionalnosti, izvedivosti i troškova.

Zato je prilikom izbora trase kanala neophodno uspoređivanje niza varijanti, s time da se izabere trasa kanala koja iziskuje najmanju vrijednost investicijskih i pogonskih troškova, kako samog kanala tako i hidrotehničkih objekata na kanalu. Pod pretpostavkom da su terenski uvjeti isti, optimalna trasa kanala po kriteriju minimuma troškova građenja i eksploatacije je pravac, budući da svako odstupanje znači povećanje troškova, uz napomenu da kraća trasa ponekad može zahtijevati veće zemljane radove u odnosu na dužu, koja prati izohipse, te se time izbjegava suvišan iskop.

Ovdje treba napomenuti da se kanali uglavnom izvode u iskopu. To znači da će prilikom građenja biti potrebno adekvatno zbrinuti višak iskopanog materijala.

Pravolinijska je trasa, generalno, prihvatljiva kod svih tipova kanala s aspekta namjena. Posebno npr. kod plovniha kanala – jer pravac ujedno predstavlja i najkraći put, kod derivacijskih – jer su najmanji gubici na padu, odnosno gubici na energiji, kod odvodnih – jer omogućuju najbržu odvodnju viška vode.

Međutim, kanal nije moguće izvesti uvijek u pravcu, jer ako (a) se terenski uvjeti često mijenjaju uzduž željene trase kanala i nailazi se na prepreke (prometnice, naselja, prirodne vodotoke) ili (b) uvjeti funkcionalnosti, odnosno korištenja, zahtijevaju odstupanje trase kanala od pravca (npr. kod plovniha kanala – povezivanje prometnih čvorišta).

Kod odstupanja trase kanala od pravca, odnosno njegovo trasiranje u krivini, treba ipak težiti što manjoj zakrivljenosti trase, tj. što većim radijusima krivina i što dužim međupravcima. Ovo je naročito važno kod plovniha kanala, kod kojih minimalni radijusi proizlaze iz klase kanala kao plovnog puta. Kod ostalih se kanala preporučuje da minimalni radijus krivine, $r_{\min}$ [m], bude:

$$r_{\min} = 11 v^2 \sqrt{A} + 12 \quad (2.3-03)$$

ili

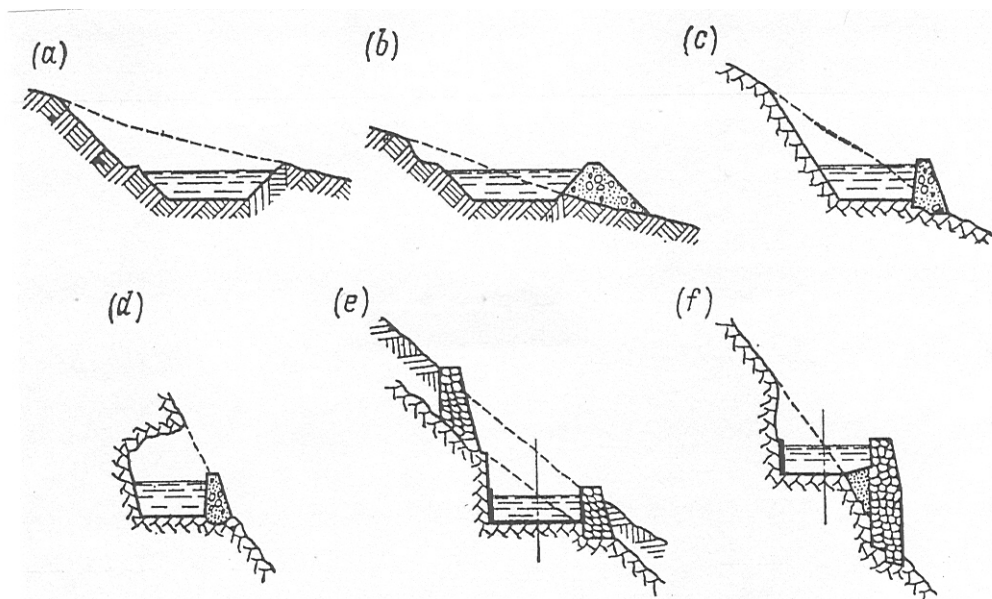
$$r_{\min} > 5 b \quad (2.3-04)$$

gdje je: v [m s^{-1}] – srednja brzina vode u kanalu, A [m^2] – protjecajna površina, b [m] – širina dna kanala.

Izvedba kanala s blagim krivinama je naročito važna kod neobloženih kanala u aluvijalnom materijalu koji su podložni eroziji, mada općenito radijusi krivina ne ovise samo o vrsti tla nego i o brzini vode i kapacitetu kanala kao što pokazuje formula (2.3-03).

Križanje kanala s prometnicama vrši se u pravilu tako da kanal ima prioritet.

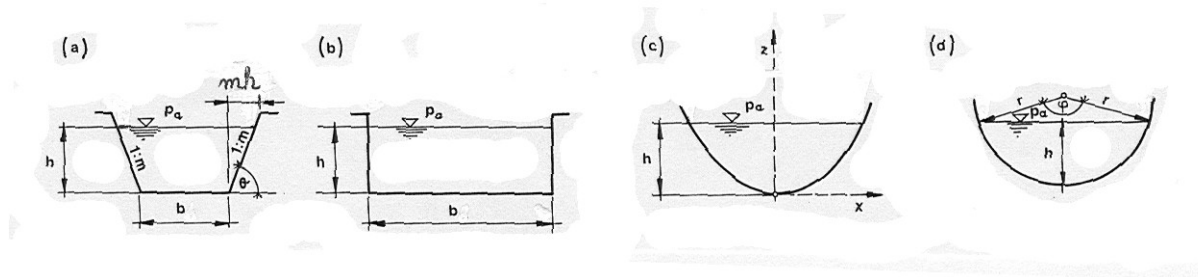
Na kraju napomenimo da kod trasiranja posebno treba biti oprezan kod vođenja kanala padinom, jer položaj nasipa na padini zahtijeva posebne mjere u pogledu stabilnosti (sl. 2.3::01).



Slika 2.3::01.

2.3.3. PROFIL KANALA

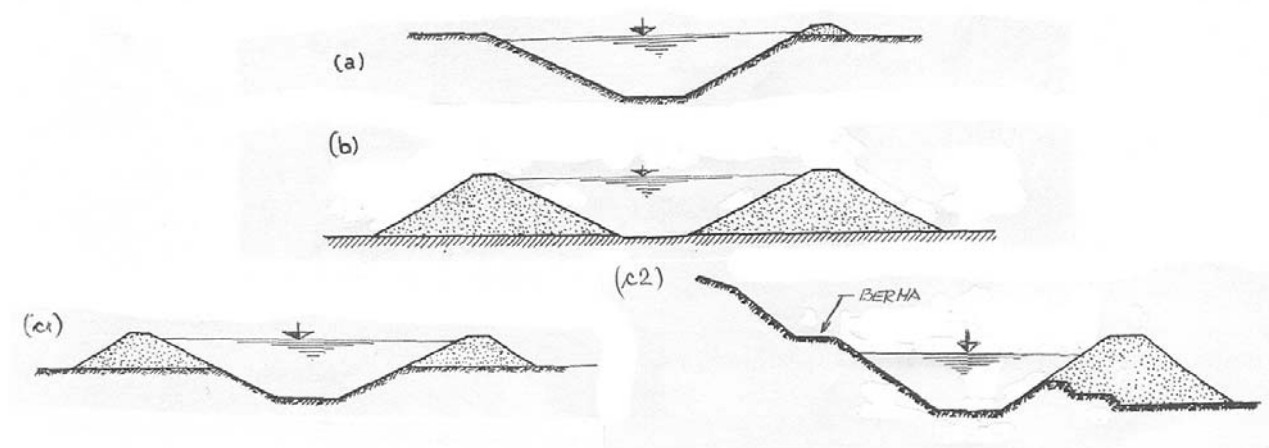
Kod otvorenih kanala, kao najčešćih, kanali se izvode trapeznog i pravokutnog, paraboličnog i polukružnog profila.



Slika 2.3::02.

U praksi zbog raspoložive mehanizacije i poteškoća kod izvedbe drugih profila u pravilu susrećemo kanale trapeznog profila, iako je polukružni hidraulički najpovoljniji jer pri istoj protjecajnoj površini, A , ima najveći hidraulički radijus, R , odnosno najmanji hidraulički pad, $I_E = \Delta H / \Delta L$.

Pri tome kanal može biti u usjeku (ukopan) (sl. 2.3::03a), u nasipu (sl. 2.3::03b) i kombiniran (u usjeku i nasipu) (sl. 2.3::03c), pri čemu širina krune nasipa nije manja od 2 - 3.5 [m], radi mogućnosti komunikacije po nasipu kako bi se omogućilo održavanje kanala.



Slika 2.3::03.

Za kanale trapeznog oblika osnovni geometrijski elementi jesu:

- protjecajna površina, $A = h (b + mh)$ (2.3-05)
- omočeni obod (perimetar), $O = b + 2h \sqrt{1 + m^2}$ (2.3-06)
- hidraulički radijus, $R = A / O$ (2.3-07)
- nagib pokosa (kosine), $m = \text{ctg } \theta$ (2.3-08)

gdje je h [m] – dubina vode, θ [°] – kut nagiba kosine prema horizontali (sl. 2.3::02).

Ako se usvoji da je $A = \text{const}$, minimalni hidraulički gubici pada u kanalu su za $0 \rightarrow \min$, što odgovara odnosu:

$$\frac{b}{h} = 2 \left(\sqrt{1 + m^2} - m \right) \quad (2.3-09)$$

odnosno hidrauličkom radijusu:

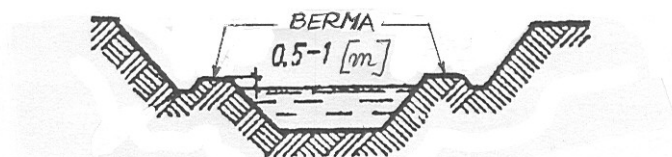
$$R = 0.5 h$$

(2.3-10)

Taj odnos b/h bio bi, dakle, hidraulički najpovoljniji. Međutim, taj je odnos rijetko optimalan i s ekonomskog aspekta, jer zavisi o konkretnim terenskim uvjetima, uvjetima izvođenja (s porastom dubine kanala rastu problemi u izvođenju), klimatskim uvjetima (u uvjetima hladnih zima poželjni su dublji, a užji kanali, jer je smanjena rashladna površina), biološkim faktorima (plići i širi kanali brže obraštaju vodenom vegetacijom nego duboki i uski), vrsti mehanizacije kojom se kanal gradi (npr. kod kanala s protocima od $30\text{--}200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) obično je potrebna širina dna $4.5 - 6 \text{ m}$ kako bi se mogao odvijati kamionski promet u fazi izvedbe kanala.

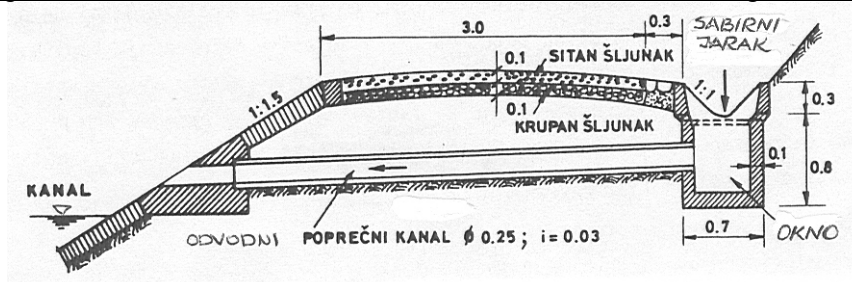
Općenito, izbor najpogodnijeg odnosa b/h provodi se na osnovi tehničko-ekonomske optimalizacije, vodeći računa o svim relevantnim faktorima.

Kod većih dubina, odnosno dubljih usjeka, u praksi nalaze primjenu i trapezni rasčlanjeni profil kanala (sl. 2.3::04).



Slika 2.3::04.

Kao što na slici 2.3::04. vidimo, kod ovih se kanala omočena (podvodna) i suha (nadvodna) kosina odvajaju bermom, koja štiti kanal od voda koje se slijevaju po kosini i olakšava održavanje kanala. Širina berme je najmanje 1 m , sa sabirnim jarkom uzduž pridnenog dijela nadvodne kosine u kojemu se skupljaju površinske vode, odakle se upuštaju u kanal odvodnim poprečnim kanalićima na svakih $100 - 200 \text{ m}$ (sl. 2.3::05). Prikazana berma je s kolnikom širine 3.0 m kako bi se omogućio promet za službe nadzora i održavanja.



Slika 2.3::05.

Kota berme je najčešće 0.5 – 1.0 [m] iznad najviše razine vode u kanalu.

Nagib kosina kod neobloženih ukopanih i kombiniranih kanala se definira prema geotehničkim karakteristikama tla u kojemu se kanali izvode, dok kod kanala u nasipu nagib kosina ovisi o geomehaničkim karakteristikama materijala od kojega se izvode nasipi.

Zato se zbog prilagodbe konkretnim geomehaničkim karakteristikama terena, nagibi pokosa uzduž kanala često mijenjaju.

U svakom slučaju, nagib kosine mora biti manji od prirodnog kuta nagiba tla u vlažnom stanju. Zato su nužna geomehanička istraživanja in situ i u laboratoriju. Orijentacijski, nagibi se općenito kreću od 1:3 u nekoherentnim tlima, 1:1 u koherentnim tlima, do 10:1 u stjenovitim terenima, gdje se također susreću i vertikalne stranice (zbog skupoće iskopa), pa čak i prevjesi.

Vrlo često je označena kosina nasipa blaža od suhe, pri čemu su ponekad označene kosine kanala u pridnenom dijelu dodatno ublažene, vodeći računa o utjecajnim faktorima koji mogu izazvati oštećenje kosina, kao što su npr. valovi od vjetra, a kod derivacijskih kanala i valovi uvjetovani radom hidroelektrana.

Nagib kosina obloženih kanala zavisi o tipu obloge. Načelno, umjetno osiguranje kanala omogućuje povećanje nagiba kosina.

Zatvoreni kanali najveću primjenu nalaze, dakako, kod odvodnje otpadnih voda, a ponekad i kod derivacijskih kanala, u pravilu lokalno na kritičnim dionicama, dakle, manje dužine. Grade se kao betonske i armiranobetonske cijevi kružnog, izduženog (jajolikog, polukružnog i pravokutnog) i stlačenog (potkovičastog i kapastog) profila. Naravno, i kod zatvorenih kanala mora se poštovati uvjet da razina vode bude ispod tjemena kanala kako bi se tečenje odvijalo sa slobodnim vodnim licem.

2.3.4. UZDUŽNI PAD KANALA • MAKSIMALNE I MINIMALNE BRZINE

Najpovoljnije rješenje, s aspekta troškova iskopa, je kada uzdužni pad dna kanala prati teren, odnosno kada je jednak uzdužnom padu terena u smjeru trase. Tada je profil kanala konstantan uzduž trase. Međutim to neće uvijek biti moguće ostvariti zbog ograničenja vezanih ili uz namjenu kanala (npr. derivacijski kanal hidroelektrane) ili uz uvjete tečenja u kanalu (prevelike ili premale brzine tečenja).

Budući da su u hidrauličkom smislu uzdužni pad kanala i brzine funkcijski povezane veličine, kada se govori o padovima dna kanala, istodobno se moraju razmatrati i brzine kojima zadani protok protječe kanalom.

Prevelike brzine, odnosno veliki padovi kanala, prouzrokovat će energiju i zarušavanje neobloženih kanala, a male brzine (ispod neke granice), odnosno mali padovi kanala, taloženje u kanalu čestica koje lebde u vodi, pa se zbog toga kanal zamuljuje.

Stoga je zbog ovog potonjeg potrebno spriječiti unošenje nanosa u kanal, koji on ne može transportirati. Kanal treba locirati i izvesti tako da tok rijeke pronese nanos pored ulazne građevine kanala ili se pretežni dio nanosa treba zadržati na ulazu u kanal (taložnici). To je naročito značajno kod projektiranja kanala za navodnjavanja i derivacijskih kanala.

Plovni i derivacijski kanali grade se s minimalnim padom, što je naročito izraženo kod derivacijskih kanala kako bi se ostvarila što veća koncentracija pada.

Kratke dionice mogu se izvesti čak i horizontalno. Kanali kod kojih pad nije od prvenstvenog značaja grade se tako da iskop bude što manji.

Kod kanala za odvodnju i navodnjavanje također se radi o relativno malim padovima, budući da se općenito teži manjim brzinama s ciljem da se spriječi erozija. Gornja granica dopuštenih brzina, $v_{\max}$ [m s^{-1}], ovisi o materijalu korita kanala, tj. o njegovom otporu eroziji (podlokavanju). Zbog velike raznolikosti tla jasno je da ne postoje striktni propisi za $v_{\max}$, već iskustvene preporučljive vrijednosti u ovisnosti o vrsti tla, granulaciji, hidrauličkom radijusu, te o bistrini ili dubini vode, temeljene na opsežnim istraživanjima kanala u eksploataciji.

U tablici 2.3::I date su maksimalne brzine u neobloženom kanalu u ovisnosti o hidrauličkom radijusu, R . Ako je $R > 3$ [m], brzine treba povećati za $(R/3)^{0.1}$.

Vrsta tla	Hidraulički radijus R (m), od – do	$v_{\max}$ (m) od – do
Prašinasti pijesak	1 - 3	0,7 – 0,8
Zbijeni pijesak	1 - 3	1,0
Laka ilovača s lesom	1 - 3	0,7 – 0,8
Srednja ilovača	1 – 3	1,0
Gusta ilovača	1 – 3	1,1 – 1,2
Mekana glina	1 – 3	0,7
Normalna glina	1 – 3	1,2 – 1,4
Gusta glina	1 – 3	1,5 – 1,8
Muljevito tlo	1 – 3	0,5 – 0,6

Tablica 2.3::I.

U ovisnosti o bistrini vode u neobloženom kanalu maksimalne vrijednosti dopuštenih brzina prikazane su u tablici 2.3::II.

Tlo	Bistra voda	Voda s koloidnom glinom
Sitni pijesak	0,45	0,75
Čvrsta ilovača	0,75	1,00
Glina	1,20	1,50
Krupni šljunak	1,20	1,80
Obluci i drobina	1,50	1,60
Škriljci i glinci	1,80	1,80

Tablica 2.3::II.

Općenito je kod projektiranja, odnosno hidrauličkog proračuna kanala, preporučljivo pridržavati se srednjih vrijednosti brzina u obloženim i neobloženim kanalima u ovisnosti o dubini vode prema tablici 2.3::III.

Tlo ili obloga	Dijametar zrna (mm)	Dubina 0,4 m	Dubina 1,0 m	Dubina 2,0 m	Dubina 3,0 m
Pijesak sitni	0,05-0,25	0,20-0,35	0,30-0,45	0,40-0,55	0,45-0,60
Pijesak srednji	0,25-1,00	0,35-0,50	0,45-0,60	0,55-0,70	0,60-0,75
Pijesak krupni	1,00-2,50	0,50-0,65	0,60-0,75	0,70-0,80	0,75-0,90
Šljunak sitni	2,50-5,00	0,65-0,80	0,75-0,85	0,80-1,00	0,90-1,00
Šljunak srednji	5,00-10,00	0,80-0,90	0,85-1,05	1,00-1,15	1,00-1,30
Šljunak krupni	10,00-15,00	0,90-1,10	0,05-1,20	1,15-1,35	1,30-1,50
Oblutak sitni	15,00-25,00	1,10-1,25	1,20-1,45	1,35-1,65	1,50-1,85
Oblutak srednji	25,00-40,00	1,25-1,50	1,45-1,85	1,65-2,10	1,85-2,30
Oblutak krupni	40,00-75,00	1,50-2,00	1,85-2,40	2,10-2,75	2,30-3,10
Kamen - drobljenac	75-150	2,00-3,00	2,40-3,35	2,75-3,75	3,10-4,10
Kamen - drobljenac	150-250	3,00-3,50	3,35-3,80	3,75-4,30	4,10-4,65
Glina		0,70-2,00	0,85-2,50	0,95-3,00	1,10-3,50
Jednoslojna kamena obloga	150-250	2,50-3,50	3,00-4,00	3,50-4,50	4,00-5,00
Dvoslojna kamena obloga	150-200	3,50	4,50	5,00	5,50
Beton raznih marki		5,0-6,5	6,0-8,0	7,0-8,0	7,5-10,0
Asfalt		3,0	4,0	4,5	5,0

Tablica 2.3::III. Preporučljive srednje brzine u kanalima u ovisnosti o dubini vode [m/s]

2.3.5. OBLOGA KANALA

Kanali se u principu mogu izvesti kao neobloženi ili obloženi.

Razlozi za oblaganje kanala mogu biti višestruki:

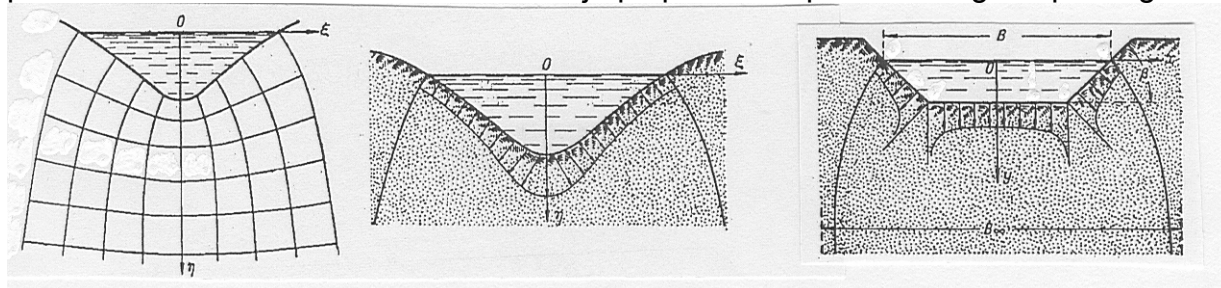
- sprječavanje gubitaka vode iz kanala uslijed procjeđivanja,
- smanjenje hrapavosti, a time i hidrauličkih gubitaka,
- povećanje dopuštene brzine, (veći padovi, kraća trasa, manja protjecajna površina),
- smanjenje troškova održavanja kanala,
- zaštita okoliša od voda koje se procjeđuju u podzemlje i u depresijama uzduž kanala stvaraju bare.

Svi ovi činitelji mogu biti pojedinačni, kombinirani ili skupni.

Osnovni problem kod dimenzioniranja neobloženih kanala javlja se kod utvrđivanja gubitaka vode, zamuljenja, erozije i ravnoteže pronosa nanosa. Ako kanalom teče voda opterećena nanosom ili se kanal kopa u materijalu podložnom eroziji, nije dopušteno da se on u njemu taloži ili da ga voda erodira.

Pri tome treba imati na umu da mnogi kanali u nekoherentnim materijalima postaju otporni na eroziju zahvaljujući kolmataciji i «cementiranju» s vrlo sitnim koloidnim česticama koje pronosi vodni tok. Te se čestice talože na omočenim površinama i povezuju nekoherentne čestice, progresivno povećavaju otpornost na eroziju.

Problem gubitaka vode iz kanala u propusnim tlima je vrlo složen. Na donjoj je slici 2.3::06 prikazani su mreža i vektori brzina filtracije po perimetru paraboličnog i trapeznog kanala.



Slika 2.3::06. Strujna mreža i vektori brzina filtracije po perimetru paraboličnog i trapeznog kanala.

Najčešće obloge kanala jesu:

- glinena
- kamena
- od opeke
- gabionska
- asfaltbetonska
- betonska
- od plastičnih sintetičkih folija.

Izbor tipa obloge ovisi o lokalnim uvjetima i zaštiti koja se želi postići.

Obloga također mora biti otporna na djelovanje uzgona, na dinamičku seizmičku pobudu, na biološku koroziju i probijanje raslinja te na djelovanje leda i valova.

Glinena obloga, debljine 0,2 do 0,3 [m], se primarno koristi u cilju postizanja vodonepropusnosti. Iskustva su pokazala da glinene obloge zbog vodne erozije imaju privremen karakter ako nisu zaštićene (kod ukopanih kanala) zemljanim slojem debljine

0,2-0,5 [m] ili uzgrađene u tijelo nasipa (kod kanala u nasipu), kao kosa ili vertikalna zaptivna glinena jezgra.

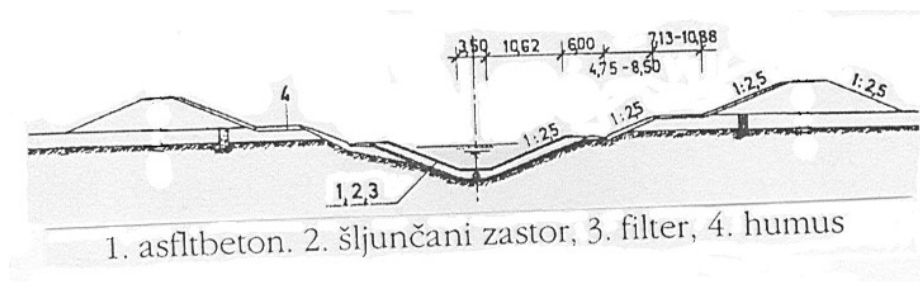
Također istaknimo da kanali u nasipu moraju imati odgovarajuće drenažne sustave za zaštitu nasipa od voda koje se procjeđuju kroz nasip. Drenažni sustavi se smještaju uz vanjski rub nasipa i obično ih prati odvodni jarak.

Kamene obloge se prvenstveno koriste kod potpune ili djelomične zaštite od razaranja kosina djelovanjem valova uslijed vjetrova ili kod plovinih kanala i uslijed prolaska plovila te vodne erozije. Izvode se kao jednoslojne, prosječne debljine 0,15-0,3 [m], ili dvoslojne, prosječne debljine 0,4-0,5 [m], na šljunčanoj podlozi prosječne debljine 0,2-0,3 [m].

Obloga od opeke, zbog filigranskog načina ugradnje, danas jedino primjenu nalaze kod manjih kanala i u zemljama s jeftinijom radnom snagom.

Gabionska obloga je tip tzv. «fleksibilne obloge», kod čije se primjene postavlja pitanje trajnosti čeličnog ili plastičnog žičanog pletiva. Čeličnog zbog korozije, a plastičnog zbog utjecaja insolacije na njegovu trajnost. Za postizanje djelomične vodonepropusnosti na gabione se površinski nanosi sloj asfalt mastiksa, dok je za potpunu vodonepropusnost potrebno zapunjenje asfaltnim mastiksom cijelog gabionskog zastora. Debljina gabionske obloge kreće se od 0,15 [m] za brzinu vode do $1,8 \text{ m s}^{-1}$, te 0,3-0,5 [m] za brzinu vode do $5,5 \text{ m s}^{-1}$.

Asfaltbetonska obloga (mješavina bitumena i mineralnih tvari) se kao elastoplastična obloga obično primjenjuje kod kanala u zemljanim materijalima (sl. 2.3::07), a posebno u nasipu, kod kojih prijeti opasnost od slijeganja.



Slika 2.3::07

Ovaj tip obloge, prosječne debljine 5-10 [cm], karakteriziran je visokim stupnjem vodonepropusnosti i niskim koeficijentom hrapavosti ($n = 0,014 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$). Brzine vode u kanalima s oblogama na bazi bitumena ne prelazi 2 m s^{-1} . Kod ovog tipa obloge prijeti opasnost od probijanja raslinja.

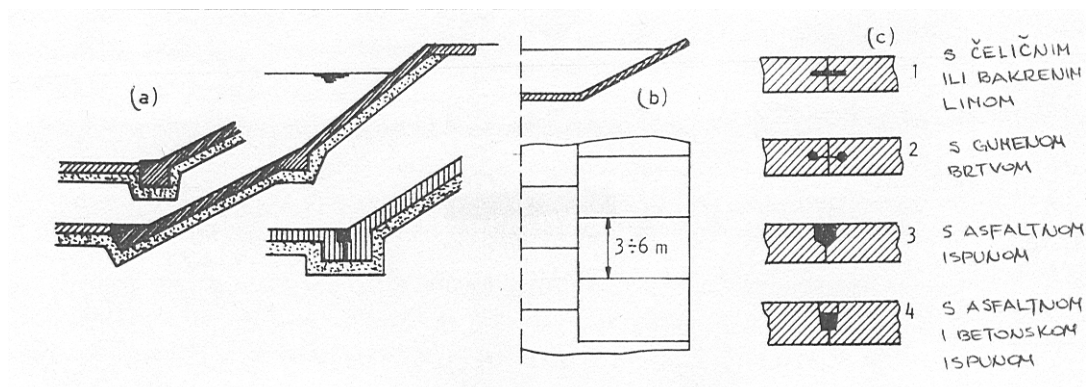
Betonske obloge mogu biti:

- od prefabriciranih betonskih elemenata,
- klasične betonske obloge izvedene na licu mjesta,
- armiranobetonske,
- prednapregnute betonske obloge,
- od mlaznog betona,
- od vakuum betona,
- od uvaljanog betona.

Betonske obloge su najčešće, jer vrlo uspješno zadovoljavaju sve zahtjeve koji se postavljaju pred obloge i omogućuju primjenu potpuno mehanizirane izvedbe.

Prefabricirani betonski elementi se uglavnom izvide kao ploče debljine 5-10 [cm], karakterizirane visokim fizičko-mehaničkim karakteristikama i vodonepropusnošću, razne dužine i širine. Mogu imati ravne rubove, na utor i pero, te rubove predviđene za ugradnju plastičnih brtvi, koji omogućuju dilataciju betonskog zastora.

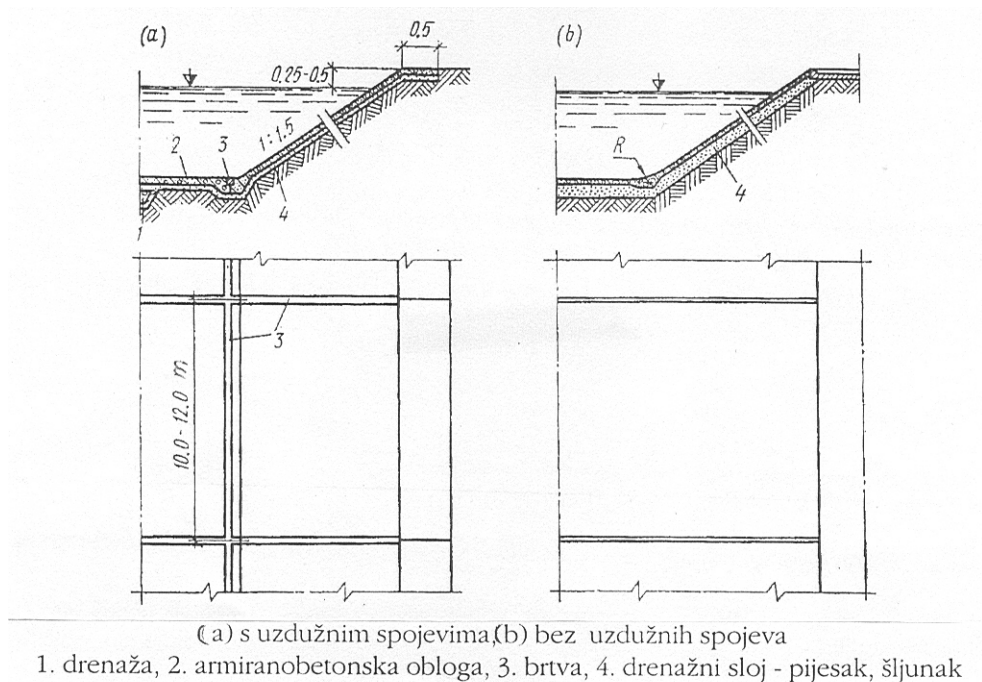
Klasična betonska obloga izvedena na licu mjesta izvodi se u vidu betonskih ploča debljine 10-20 [cm] položenih na sloju šljunka ili pijeska (sl. 2.3::08a). Kod ove obloge svakako treba predvidjeti radne i dilatacijske spojnice kako bi se spriječilo stvaranje pukotina uslijed skupljanja i hidratacije. Dilatacijske spojnice mogu biti podužne i poprečne, a ponekad i u smaknutom rasporedu (sl. 2.3::08b). Njihova vodonepropusnost osigurava se bakrenim, gumenim, plastičnim, asfaltnim ili asfalt-betonskim brtvama (sl. 2.3::08c).



Slika 2.3::08

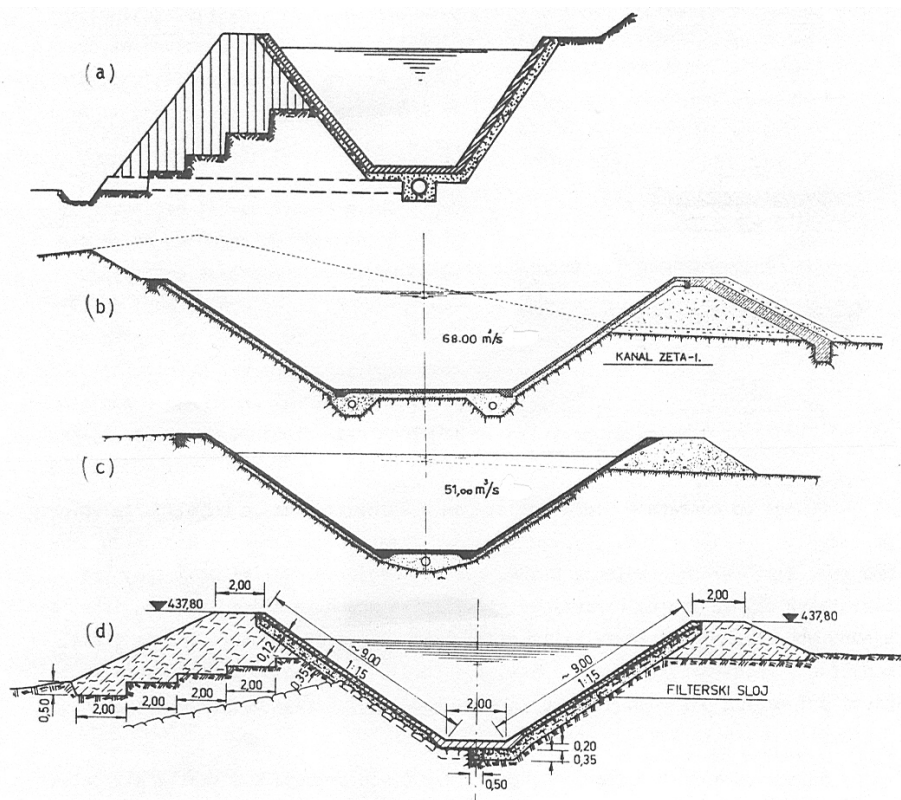
Armiranobetonske obloge su praktično križno armirane betonske ploče, debljine do 15 [cm], s prosječno 2 [%] armature. Ovaj se tip obloge primjenjuje u težim geološko-

geomehaničkim uvjetima, te kada se želi povećati razmak radnih i dilatacijskih spojnica na 10-12 [m] (sl. 2.3::09), spriječiti pojavu pukotina ili izjednačiti lokalne razine u slijeganju.



Slika 2.3::09

Istaknimo kako je kod svih tipova obloga, a kod vodonepropusnih poglavito, obavezna drenaža (sl. 2.3::10). Razlog je prije svega statičke naravi.



Slika 2.3::10

Naime, statički gledano obloga je ploča oslonjena na elastičnoj podlozi. Ona dobro podnosi hidrostatičko opterećenje na podlogu, ali ne može primiti značajnije opterećenje u suprotnom smjeru, izazvano tlakom vode iz priobalja. A upravo to opterećenje može biti vrlo značajno pri visokim razinama podzemnih voda, naročito za slučaj naglog pražnjenja kanala.

Da bi se spriječilo ovo nepovoljno opterećenje, obloga kanala se mora drenirati po čitavoj dužini. Drenažni se sustav najčešće sastoji od sloja šljunka, koji se kao tampon postavlja ispod obloge, i drenažnih cijevi koje se postavljaju uzduž kanala, s mjestimičnim poprečnim ispustima koji odводе dreniranu vodu izvan kanala.

Prednapregnute betonske obloge se izvode kao tanke (svega nekoliko centimetara) i uske (nešto preko 1 [m]) ploče ili trake kod kanala paraboličnog ili polukružnog profila. Armiranje je sa specijalnim čeličnim žicama promjera 3-5 [mm].

Obloge od mlaznog betona izvode se kao nearmirane ili armirane, debljine 5-10 [cm].

Obloge od vakuum betona izvode se od prefabriciranih betonskih ploča izrađenih vakuum postupkom. Ovaj se beton priprema tako da se na slobodnu površinu betona postavlja vakuum oplata s filtrom od prirodnih ili umjetnih vlakana (geotekstil), koji sprječava da se iz betona uklanjaju fine čestice cementa i sitni materijal ispune. Stvaranjem bezzračnog prostora pomoću vakuum sisaljki crpi se jedan dio vode odmah nakon ugrađivanja betona i smanjuje vodocementni faktor. Tim se postupkom poboljšava kompaktnost, smanjuje skupljanje, povećava gustoća betona, čvrstoća i vodonepropusnost.

Obloge od uvaljanog betona izvode se tehnologijom kao betonske gravitacijske brane.

Obloge od plastičnih sintetičkih folija (geomembrane) se prvenstveno koriste za postizanje vodonepropusnosti. Izvode se sa ili bez površinske zaštite. Kod izbora profila kanala treba voditi računa da primjena geomembrana uvjetuje blaže nagibe pokosa (1 : 2,0 do 1 : 3,5) zbog njihove male otpornosti na klizanje. U pravilu, geomembrana mora biti usidrena u podlogu, što se relativno lako postiže, budući da na tržištu postoje membrane s rebrima za usidrenje. Suvremene folije nastavak omogućuju varenjem spojeva, koje sve više zamjenjuje preklapanje (5-10 [cm]) i ljepljenje spojeva.

Ako se zbog zaštite primjenjuje pokrovni sloj, njegov izbor ovisi o stabilnosti na kosini i o brzini vode u kanalu.

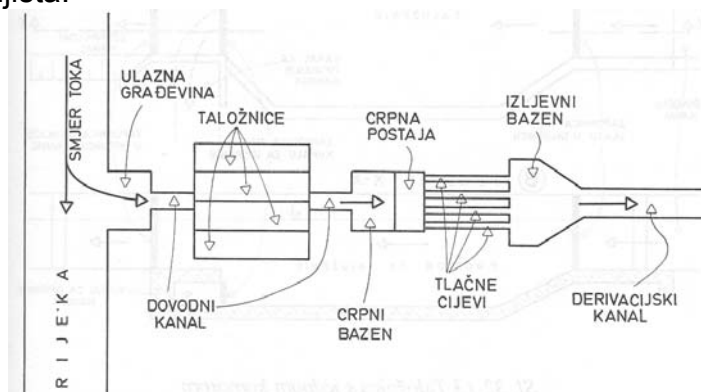
2.3.6. GRAĐEVINE NA KANALIMA

Kanal za sebe ne predstavlja cjelinu bez građevina koje se nalaze na njemu. Ovdje ćemo spominjati samo hidrotehničke građevine, iako se uvijek pojavljuju i drugi tipovi građevina (mostovi, prelazi instalacija, i sl.). Za primjer može se vidjeti koliki je broj hidrotehničkih građevina predviđen za funkcioniranje višenamjenskog kanala Dunav-Sava, što je prikazano na slici 2.3::11.



Slika 2.3::11

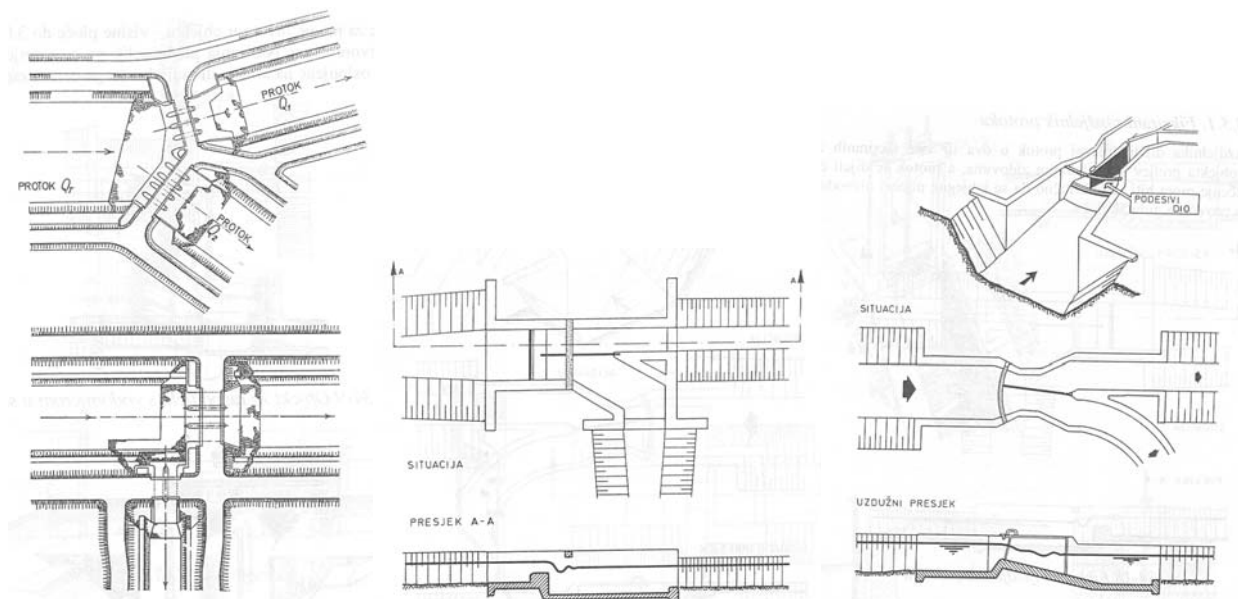
Nadalje na slici 2.3::12 dan je shematski prikaz građevina na početku kanala za navodnjavanje zemljišta.



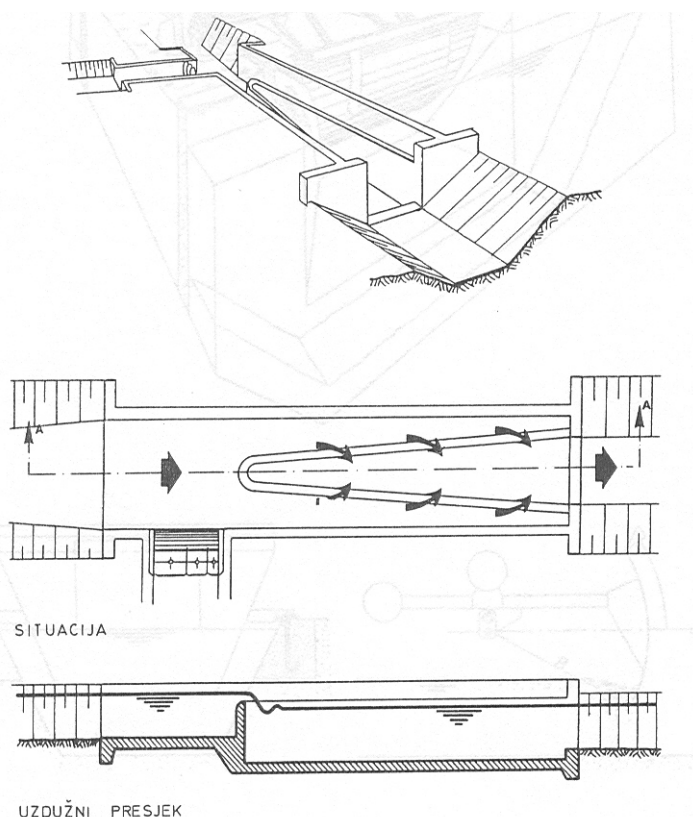
Slika 2.3::12 Shematski prikaz građevina na početku kanala za navodnjavanje

Građevine na kanalima možemo podijeliti na grupu građevina koje služe za upravljanje vodom (protoka i vodostaja) koja se kreće kanalima, odnosno na grupu građevina koje služe održavanju uvjeta tečenja u kanalima. U prvu grupu prvenstveno spadaju građevine

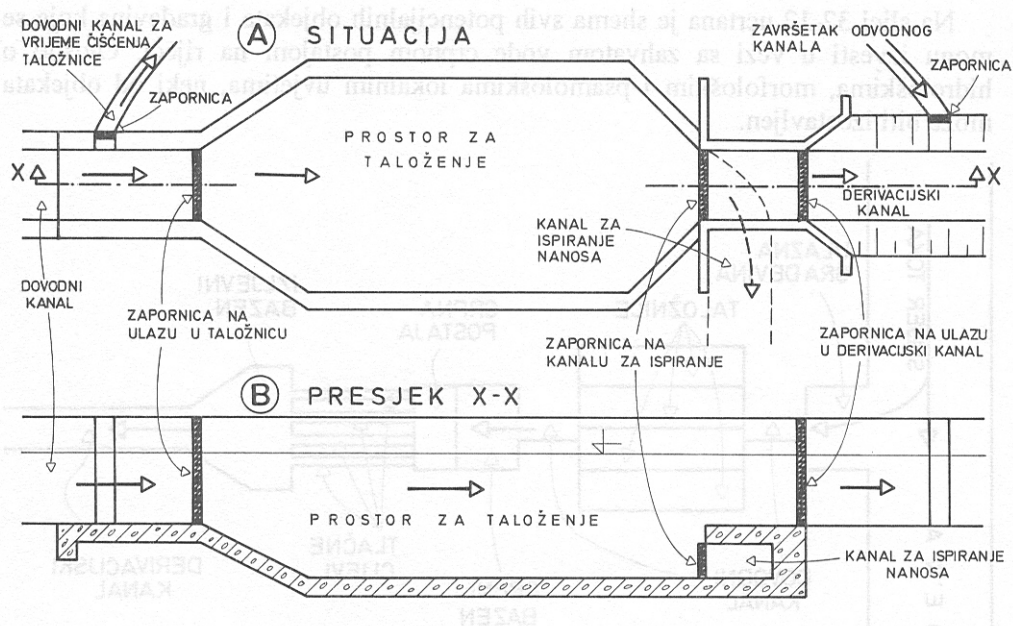
na krajevima kanala. To su račve, ušća, ustave, crpne stanice i sl. Namjena kanala uvjetuje postojanje i ostalih građevina. Tako, ako se radi o kanalima za navodnjavanje, imat ćemo potrebu izvođenja razdjelnika protoka (sl. 2.3::13), preljeva (sl. 2.3::14), taložnica ukoliko se koristi voda iz prirodnih vodotoka (sl. 2.3::15) itd. Kod plovnih kanala imat ćemo potrebu izvođenja brodskih prevodnice, liftove, itd. U drugu pak grupu građevina koje služe održavanju uvjeta tečenja spadaju hidrotehničke stepenice.



Slika 2.3::13 Razni tipovi razdjelnika na kanalu za navodnjavanje

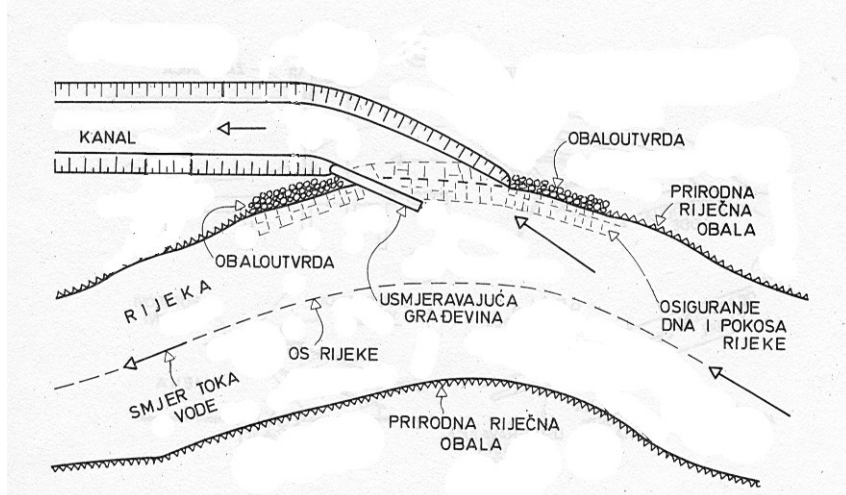


Slika 2.3::14 Primjer preljeva na kanalu za navodnjavanje

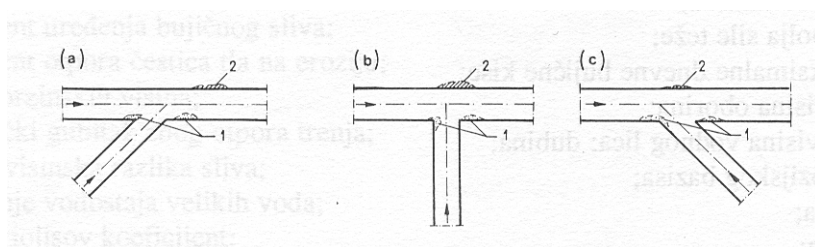


Slika 2.3::15 Primjer taložnice na zahvatu vode iz prirodnog vodotoka

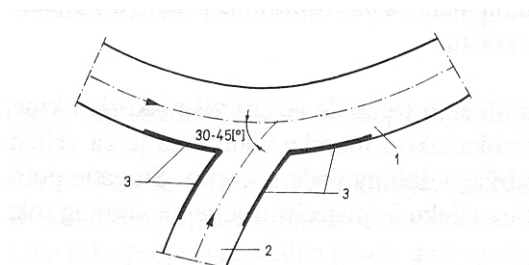
Na račvama se kanal odvaja od nekog drugog vodotoka. To je građevina na početku kanala koja svojim oblikom rapoređuje protok vode koji će se odvajati od vodotoka i prolaziti kanalom i na onaj koji ostaje u vodotoku. Spoj kanala s drugim vodotokom naziva se ušće. Niti račva, niti ušće nisu opremljeni nikakvom hidromehaničkom opremom. Tako će raspodjela protoka biti proporcijalna hidrauličkim gubicima koji se ostvaruju na samim građevinama. Takova rješenja ne omogućavaju više razine manipulacijama vodom. Građevina račvi i ušće moraju biti oblikovane na način da osigura nesmetan protok vode (i nanosa) te da ne izazivaju nepotrebne hidrauličke gubitke. Osjetljiv su detalj, pogotovo ukoliko kanalom teče voda s nanosom koji bi se mogao istaložiti neposredno iza mjesta građevine. To su mjesta gdje dolazi do znatnog remećenja strujne slike, što s jedne strane može izazvati oštećenje korita, a s druge strane može izazvati taloženje nanosa. Na račvi i ušću treba riješiti **problem geometrije** – spajanje dvaju korita različitih dimenzija i različitih kота dna, **hidrološki problem** pojave različitih protoka u vremenu i njihove koincidencije te **hidraulički problem** oblikovanja kako bi se dobila ispravna raspodjela protoka uz što manje remećenja strujne slike te izazivanja erozije i taloženja nanosa. Na slici 2.3::17 prikazani su primjeri položaja ušća kanala u drugi vodotok, dok je na slici 2.3::18 dan primjer pravilno oblikovanog ušća kanala.



Slika 2.3::16 Račva na vodotoku



Slika 2.3::17 Položaji ušća kanala (1- taloženje, 2 - erozija)

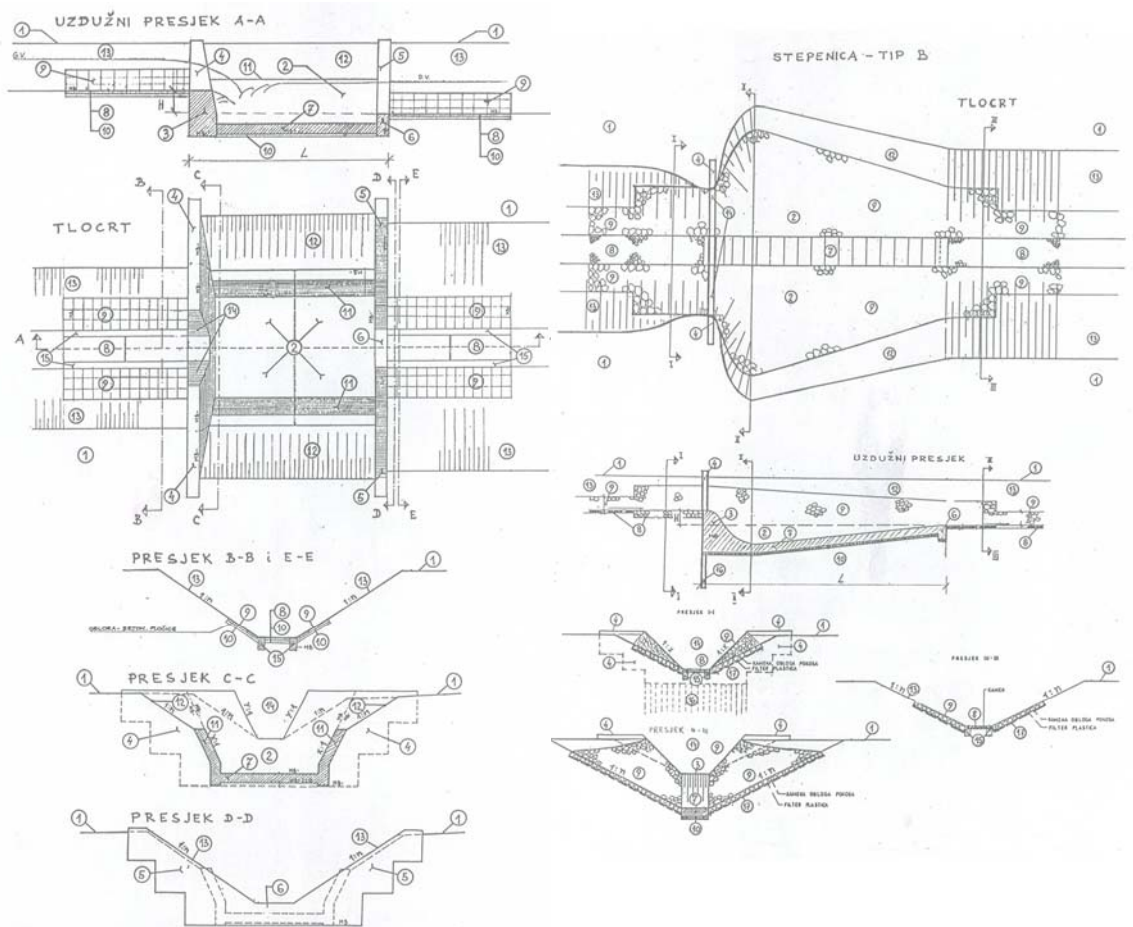


Slika 2.3::18 Primjer pravilno oblikovanog ušća kanala (1- vodotok, 2 – kanal, 3 - obaloutvrde)

I na početku i na kraju kanala moguće je postaviti građevine koje uz pomoć zatvarača omogućavaju kontrolirano propuštanje vode u kanal i iz kanala. Nazivamo ih ustavama. Kako se radi o složenim građevinama koje nisu isključivo vezane samo uz kanale, o njima će opširnije biti govora u nastavku.

Hidrotehničke stepenice (slika 2.3::20) su mjesta gdje kontrolirano izazivamo disipaciju energije toka. Zovemo ih i mjestima koncentracije hidrauličkog pada. Koriste se na kanalima čiji je uzdužni pad manji od uzdužnog pada terena u smjeru trase kanala. Naime, kako je već ranije bilo rečeno, ukoliko su brzine vode u kanalu prevelike po kriteriju stabilnosti korita, tada će biti potrebno obložiti korito. Alternativa oblaganju korita je smanjenje brzine toka smanjivanjem uzdužnog pada. Ukoliko je taj pad manji od pada terena, da niveleta kanala ne bi isklinila na površinu terena, izvode se hidrotehničke stepenice. Tim rješenjem se smanjuju toškovi oblaganja kanala, a uvode novi zbog

izvedbe građevina. Tehničko-ekonomske analize daju odgovor koje alternativno rješenje je jeftinije.



Slika 2.3::20 Hidrotehnička stepenica