

UVOD U HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE

Uvod

Hidrotehnika je tehnička disciplina u okviru građevinarstva izravno povezana s vodom. Obuhvaća sve one djelatnosti kojima se omogućava uporaba vode ili sprečava njeno štetno djelovanje. Hidrotehničke djelatnosti objedinjuju: projektiranje, izgradnju i održavanje hidrotehničkih objekata i sustava koji služe opskrbi naselja i industrije vodom, navodnjavanju, korištenju vodnih snaga, plovidbi ili se njima sprečavaju poplave, odvodnjava tlo, odvođe se otpadne vode uz sprječavanje njihovog štetnog djelovanja.

Obzirom na prethodno navedene okvire hidrotehnike, inženjerima građevinarstva neophodna su znanja vezana za vodu jer se mora proučiti prirodno stanje voda, potrebe za vodom i mogućnosti iskorištenja voda kako bi se predvidjela izgradnja objekata prilagođenih zakonima kretanja vode.

Projektiranje i izgradnja objekata u podzemlju usko je vezana za vodoopskrbu, navodnjavanje i zaštitu od podzemne vode. U ovom poglavlju aspekti izgradnje podzemnih hidrotehničkih objekata bit će predstavljeni zajedno s osnovnim tehnikama i metodama analize procesa koji su sastavni dio projektiranja i izvođenja objekata u podzemlju.

1. Vodoprivreda - Gospodarenje vodama

1.1. Općenito o vodama

Zbog čega se čovjek toliko bavi vodom? Zašto se razvilo toliko različitih zanimanja vezanih za vodu? Odgovor na ova pitanja možemo pronaći upravo u neraskidivoj vezi čovjeka s vodom. Čovječanstvo od vode ima nebrojene koristi, ali isto tako od vode mu često prijete i velike štete. Voda se proučava da bi se njena korist učinila većom, a šteta manjom.

Uporaba voda za:

1. domaćinstvo (piće, kuhanje, održavanje higijene)
2. industriju
3. navodnjavanje
4. proizvodnju električne energije
5. plovni put
6. rekreaciju
7. ribarstvo

Od vode se mora često štiti:

1. Odbrana od poplava (velikih voda)
2. Borba protiv erozije
3. Odvodnjavanje zemljišta
4. Kanalizacija naselja

Vode se moraju štiti kako ne bi postale opasne za život (biljaka, životinja i čovjeka – izravnom upotrebom vode i neizravno preko biljaka i životinja). Zato se javlja potreba za :

1. pročišćavanjem korištenih voda
2. obogaćivanjem malih vodotoka povećanjem protoka u sušnim razdobljima

1.2. Neusklađenost dotoka i potrošnje vode

Koje su osnovni problemi s vodom?

1. često je ima tamo gdje nije potrebna (može ometati), a naročito je nema tamo gdje je neophodna, ili je nema u dostatnim količinama
2. često je ima u razdobljima kada nije potrebna (kada pravi štetu), a kada je potrebna rijetko je ima u zadovoljavajućim količinama
3. često je nezadovoljavajuće kvalitete

Slika 1.1 Neusklađenost dotoka i potrošnje vode

Voda se koristi u domaćinstvima, industriji, poljoprivrednoj proizvodnji, a često je mjesto potrošnje znatno udaljeno od postojećih tokova te je neophodno vodu kontrolirano dovesti do korisnika.

Treba imati na umu:

a) da je dotok (režim dotoka) manje – više neravnomjeran tijekom godine za svaki prirodni vodotok

b) da su potrebe za vodom većine korisnika također neravnomjerne

c) neravnomjernost dotoka i neravnomjernost potreba vremenski se ne podudaraju (nisu usklađene), tako u periodu malih voda obično rastu potrebe za vodom, dok se u periodu velikih voda potrebe za vodom smanjuju (slika 1.1)

Prema ovome će se odrediti zadatak gospodarenja vodama:

a) zadatak snabdijevanja vodom (odnosno zadatak korištenja vode) je:

Osigurati potrebnu količinu vode, zadovoljavajuće kvalitete u potrebnom vremenskom razdoblju i na zahtijevanom mjestu.

b) zadatak zaštite od voda je:

Odstraniti vodu s ugroženog mjesta i zaštititi vodotok i objekte od erozijskog djelovanja vode

c) zadatak zaštite vode je:

Osigurati određenu količinu i kvalitetu vode u samom vodotoku

Prostorna i vremenska preraspodjela dotoka složen je zadatak. Broj potrošača i mogućih osiguranika (izvorišta) može biti velik čak i u okviru malog sliva. Problem postaje složeniji s veličinom sliva i odnosima koji se javljaju unutar sliva (ekonomskim, prioritetom potrošača, zaštitom okoline i sl.)

1.3. Vodoprivreda

Vodoprivreda je djelatnost koja se bavi planiranjem, razvojem, uporabom, i zaštitom vodnih dobara (vodnih resursa). To je široka i složena djelatnost koja obuhvaća više vodoprivrednih grana od kojih svaka predstavlja jednu od djelatnosti vezanih za uporabu (zaštitu) vode:

1) sanitarna hidrotehnika

2) hidrotehničke melioracije

3) hidroenergetika

4) vodeni promet

5) obrana od poplava

Vodoprivreda objedinjuje i usuglašava vodoprivredne grane i njihove pojedinačne ciljeve, tako da ukupna korist od voda bude što veća.

1.4. Vodoprivredno planiranje, vodoprivredne smjernice, vodoprivredna osnova

Planiranjem se na osnovu predviđenih potreba i mogućnosti određuje optimalno raspolaganje dobrima u toku razmatranog vremena. Optimalno raspolaganje vodama daje najveću ukupnu korist od uporabe vode, zaštite od vode, i zaštite vode. Planiranje omogućava sagledavanje onoga što se može učiniti, a što ne može (ili može uz neprihvatljivu cijenu) i da se prema tome odredi put za postizanje željenog cilja – optimalnu uporabu vode.

Zadatak vodoprivrede jednog područja (regije ili države) je zadovoljiti potrebe domaćinstava, industrije i poljoprivrede za vodom, potrebe za električnom energijom (ako su ostali energetske izvori manje ekonomični), potrebe riječnog prometa, zaštititi vodotoke i podzemne vode od zagađivača. Kako bi pristupili rješenju ovog opširnog problema, neophodno je proučiti potrebe i mogućnosti područja i to:

a) društvene i ekonomske uvijete

b) svojstva raspoloživih voda (vodotoka i podzemnih voda)

c) raspoloživa tehnička rješenja

Na osnovi proučenog daju se smjernice (globalna vodoprivredna rješenja) za razmatrano područje. Te smjernice se koriste kao podloga za daljnje proučavanje pri rješavanju svakog vodoprivrednog zadatka u području.

1.5. Hidrotehnika

Hidrotehnika je tehnička djelatnost za rješavanje vodoprivrednih zadataka, koja obuhvaća:

- 1) proučavanje režima vodnih dobara (resursa)
- 2) ispitivanje geološke i hidrogeološke građe na mjestima akumulacija i objekata
- 3) projektiranje, građenje, održavanje i korištenje (upravljanje) hidrotehničkih objekata i opreme.

Hidrotehnika koristi različite znanstvene discipline od kojih su najvažnije:

- 1) hidrologija
- 2) meteorologija
- 3) vodoprivredni sustavi
- 4) geologija, hidrogeologija i inženjerska geologija
- 5) mehanika tla i mehanika stijena
- 6) mehanika fluida i hidraulika
- 7) otpornost materijala
- 8) statika i dinamika konstrukcija i strojeva
- 9) građevinski materijali
- 10) ispitivanje materijala i konstrukcija
- 11) elektrotehnika
- 12) ekonomija
- 13) agronomija
- 14) ekologija

Mnogi odgovori koje hidrotehnika traži ne mogu se dobiti samo na osnovu iskustva i teorijskih razmatranja pa je često potrebno pribjeći pokusima (eksperimentima).

1.6. Projektiranje i projektna dokumentacija

Prilikom rješavanja određenih zadataka korištenja voda (ili obrane od voda, ili zaštite voda) potrebno je prvo osmisliti – projektirati rješenje (objekte, opremu, način

izgradnje i financiranja) pa zatim pristupiti izgradnji objekata i montaži opreme koji čine rješenje zadatka. Projektna dokumentacija pismeni je trag projektiranja, u vidu crteža i planova, izvještaja i proračuna i predmjera i predračuna radova i opreme.

Projektiranje je postupno, projektira se u fazama (nivoima). Ide se od rješavanja općenitijih zadataka k detaljima:

1. Prvo je potrebno pokazati da je objekt tehnički izvodljiv i ekonomski opravdan, što se radi na nivou vodoprivredne osnove ili vodoprivredne studije (u okviru koje se razmatra vodoprivredno korištenje promatranog područja – sliva, država ili pokrajine).
2. Na nivou idejnog rješenja, od razmatranih mogućnosti, bira se rješenje s najpovoljnijim općim osobinama (npr. za hidroelektrane se može odlučivati između pribranske i derivacijske).
3. U idejnom projektu se određuju najvažniji parametri rješenja (veličina akumulacije, tip i mjesto – "profil" brane i sl.), kao i najznačajnije dimenzije i svojstva objekata i opreme
4. U okviru glavnog i detaljnog (izvođačkog) projekta određuju se sve veličine (dimenzije) i svojstva objekata i opreme kao i uvjeti i tehnologija gradnje.
5. Nakon izgradnje slijedi izrada projekta izvedenog stanja, što se, nažalost u našoj praksi rijetko ostvaruje.

2. Brane

2.1 Namjena brana

Akumulacijski bazeni za izravnavanje protoka stvaraju se pregradama – branama – u riječnoj dolini (slika 2.1). Brana stvara uspor za kontrolirano zahvaćanje vode iz vodotoka. Brane omogućavaju koncentraciju pada kod pribranskih hidroelektrana, a pad stvoren branom može se iskoristiti i za gravitacijsku vodoopskrbu naselja, industrije i drugih korisnika, kao i za održavanje razine potrebne za plovidbu.

Brane spadaju među najstarije hidrotehničke građevine, i među najstarije građevine uopće. Pojava brana proteže se unatrag do prvih dana civilizacije. Tehnologija projektiranja i izgradnje brana i dalje napreduje, mada se može reći da je doživjela vrhunac u prvoj

polovici 20-tog stoljeća. Smatra se da trenutno u svijetu postoji oko 300 000 brana, od kojih je preko 30 000 tzv. visokih brana.

Brane se proučavaju ne samo zbog svog značaja i zastupljenosti, već i da bi se na njihovom primjeru sagledali problemi, opterećenja, i moguća rješenja u projektiranju i izgradnji ostalih hidrotehničkih objekata. Tako su nasute brane slične nasipima, a betonske gravitacijske brane mogu biti primjer projektiranju većeg broja betonskih hidrotehničkih konstrukcija.

2.2. Tipovi brana

Postoji više podjela brana, a ovdje ćemo navesti samo najopćenitije:

a) Prema načinu prenošenja opterećenja brane se dijele na (sl. 2.2):

1) Gravitacijske, koje se suprotstavljaju opterećenju vlastitom težinom koju, zajedno s opterećenjem, prenose na tlo u temelju.

2) Lučne, koje se opiru opterećenju lučnim djelovanjem, a sile (opterećenje) prenose u bokove i dno doline.

3) Kontraforne, koje se opiru opterećenju grednim djelovanjem, a grede (koje mogu biti armirano-betonska platna, zatvarači-ustave, ili svodovi-lukovi) prenose opterećenje na zidove – kontrafore, koji ga dalje prenose u temelj.

4) Kombinirane: Olakšane i Lučno –gravitacijske

b) Prema materijalu od koga se grade brane mogu biti:

1) Betonske (od klasičnog betona ili "valjanog" betona - "rolkrita")

2) Nasute zemljane brane

3) Nasute kamene brane – (od kamenog nabačaja ili "valjanog" kamena)

4) Zidane brane (od kamena vezanog cementnim malterom)

5) Drvene brane

5) Metalne brane

Slika 2.1 Tipovi brana

Slika 2.2 Prenosjenje opterećenja kod brana

Od prethodno nabrojanih tipova najzastupljenije su nasute i betonske brane (sl.4.1) pa će se one proučavati u daljem izlaganju. Statistika pokazuje (Novak,1996) da je oko 90% brana u svijetu nasutih, bilo od zemlje ili kamenog nabačaja. Ovo je posljedica dobrih osobina nasutih brana - mali zahtjevi za nosivošću temelja, laka dostupnost prirodnog materijala za nasip, koji se učinkovito ugrađuje snažnom mehanizacijom.

c) Prema konvenciji međunarodnog udruženja za visoke brane ICOLD (International Commission on Large Dams) brane se po veličini mogu svrstati u:

- 1) Visoke brane
- 2) Niske brane

Pod visokim smatraju se brane čija građevinska visina (od najniže kote temelja do krune) prelazi 15 m. Visoke brane mogu biti i niže od 15 m, ako im je dužina u kruni veća od 500 m, ili stvarju akumulaciju veću od $100\ 000\ m^3$, ili su im evakuacijski organi dimenzionirani na protok veći od $2000\ m^3/s$.

d) Prema načinu evakuacije velikih voda brane mogu biti:

- 1) Preljevne, kod kojih se voda preljeva (pri evakuaciji velikih voda) preko posebno oblikovanog preljevnog dijela.
- 2) Nepreljevne, koje nisu predviđene za prelijevanje pa se za evakuaciju velikih voda koristi poseban objekt (pr. preljevna brana)
- 3) Preljevno-nepreljevne, kod koji je dio brane preleven, dok ostatak konstrukcije nije predviđen za prelijevanje (betonske brane).

2.3. Osnovni elementi brane

Neovisno o tipu, veličini i namjeni, većina brana ima određene obvezne elemente, koji su prikazani na slici 2.3:

1. Nepreljevni dio brane, je sama brana – pregrada za stvaranje akumulacije.
2. Evakuacijski organ je objekt koji omogućava kontroliranu evakuaciju velikih voda (može biti u sklopu tijela brane, ili neovisan objekt).
3. Umirivač energije je sastavni dio evakuacijskog organa, koji smiruje energiju preljevne vode, kako ne bi došlo do potkopavanja temelja, i rušenja brane

4. Temeljni ispust omogućava pražnjenje akumulacije i ispiranje nanosa
5. Zahvat omogućava kontrolirano zahvaćanje vode za korisnike iz akumulacije (radi preglednosti nije prikazana na sli.2.3)

Slika 2.3 Osnovni elementi brane

6. Temelj sačinjava *sredina* (stijena ili tlo) ispod i oko objekta, koja je uslijed opterećenja i prisustva vode, kao i uslijed geotehničkih radova (injektiranje, dreniranje), promijenila naponsko i fizičko stanje.

7. Kruna brane je horizontalna traka na vrhu brane duž koje je omogućen promet preko brane

8. Drenažni sustav omogućava smanjenje uzgona u brani i temelju, i kontrolirano odvođenje filtracijske vode iz brane i temelja. Sastoji se od drenažnih bušotina, galerija (po potrebi, pumpi i ostale neophodne opreme) ili slojeva tucanika zaštićenog filtrom, ovisno o tipu brane i tipu drenaže.

9. Injekcijska zavjesa i/ili zastor sprečava ili produžava put filtracijskoj vodi, čime smanjuje uzgon i filtracijski protok kroz branu i temelj.

Pored nabrojanih elemenata brane treba spomenuti i :

10. Nanos koji se, kako je naprijed objašnjeno, ne može izbjeći, i na koji uvijek treba računati.

11. Akumulacijski bazen zbog kojega se brana gradi.

12. Upravna zgrada za upravljanje branom i pratećim objektima.

13. Objekti za skretanje rijeke tijekom gradnje, koji omogućavaju kontrolirano skretanje vode uz korita u kojem se nalazi temeljna jama (nije prikazano na sl.2.3)

Potrebno je još definirati i:

14. Os brane, kao zamišljenu ravan duž brane

15. Građevinsku visinu barane, kao razliku između kote krune brane i najniže kote u temelju.

16. Hidrauličku visinu brane, kao razliku između kote maksimalnog uspora kote dna rijeke u profilu brane prije izgradnje.

17. Dužinu brane u kruni, kao udaljenost između obala, mjereno po osi brane.

2.4. Izbor pregradnog profila

Izbor pregradnog profila – mjesta na kojem će se brana podići – prvi je zadatak pri projektiranju svake brane, obzirom da mjesto brane određuje mogući volumen akumulacije i veličinu sliva, a time i hidrološki potencijal raspoloživ za moguću potrošnju. Uz to geološke i geomehaničke karakteristike tla na mjestu pregradnog profila bitno utječu na uvijete fundiranja, koji su jedan od najvažnijih činitelja za određivanje tipa brane. Zato je neophodno da odabrani profil bude optimalan.

Pri izboru profila brane zahtjeva se da volumen akumulacije bude što veći, a sa što jeftinijom branom. Također se traži da mjesto brane omogući zahvaćanje dovoljne količine vode za podmirenje potreba korisnika, to jest da pokrije što veći sliv. S druge strane treba zadovoljiti tehnički dio zahtjeva: stabilnost objekta je, svakako, najvažnija, ali se ne smije zaboraviti ni vododrživost, kao ni dostupnost građevinskih materijala. Ekonomskom analizom svih potencijalnih profila, a na osnovi učinjenih tehničkih rješenja, dolazi se do optimalnog pregradnog profila. Rezultat ekonomske analize nije jedini mjerodavan za izbor profila. Često odluku donose faktori okoline (ekologija i kulturno naslijeđe), kao i politički činitelj.

Prema gore navedenom, najvažniji činitelji pri izboru pregradnog profila (profila brane) su:

1. Količina vode na profilu (koja, uz odgovarajuće izravnavanje, treba da zadovolji zahtjeve korisnika). Kako bi se utvrdila količina vode neophodni su pouzdani hidrološki podaci kojima se dokazuje postojanje očekivanih protoka – niz srednjih mjesečnih (tjednih) protoka za period od najmanje 20 godina (poželjno je 40 i više godina).

Pored količine vode bitna je i kvaliteta pa se odgovarajućim analizama mora utvrditi: a) Da li je voda dobra za uporabu, i b) Da li je voda agresivna za objekt.

2. Topografija terena koja određuje:

a) Volumen akumulacije, V , ovisno o visini brane H (što veći odnos V/H to bolje).

b) Širinu pregradnog profila (dužina brane) od čega zavisi volumen brane, a često i tip i sama cijena brane.

c) Dispoziciju (raspored) i tip brane i evakuacijskih organa, zahvata, i ostalih objekata.

Pošto je određena makro lokacija, brana se najčešće projektira nešto uzvodnije od najužeg presjeka doline. Time se omogućava bolje upiranje bokova objekta na strane doline.

3. Geološki i geomehanički uvjeti koji utvrđuju:

a) stanje sredine za temelje brane, i temelje pratećih objekata. Neophodno je odrediti otpornost na smicanje, nosivost, deformabilnost i vododrživost sredine. Ove osobine su često ključne pri izboru mikrolokacije pregradnog profila, kao i pri određivanju najpovoljnijeg tipa brane.

b) Vododrživost akumulacije može u potpunosti kompromitirati lokaciju, a također se mora voditi računa i o stabilnosti bokova akumulacije (treba imati na umu akumulaciju Vaiont, u sjevernoj Italiji, gdje je cijelo brdo sklizilo u akumulaciju i izazvalo katastrofalni poplavni val).

4. Dostupnost građevinskih materijala odgovarajuće količine i kvalitete. Laka dostupnost određenog materijala utječe na cijenu, i može imati presudan utjecaj na izbor profila za branu, kao i tipa brane.

5. Troškovi eksproprijacije zemljišta i premještanja naselja, industrije i prometnica.

6. Ekološki, kulturni i politički činitelji

2.5 Izbor tipa brane

Izbor tipa brane usko je povezan s izborom pregradnog profila. Za određeni profil (sa svojim topografskim, hidrološkim, geološkim, i geomehaničkim osobinama) traži se tehnički i ekonomski najpovoljniji tip brane. (I tu ponekada utječu društveno – politički činitelji, ili ekologija, što može izmijeniti ekonomsku odluku).

Da bi se moglo raspravljati o izboru tipa brane, neophodno je kratko upoznavanje s prednostima i nedostacima najzastupljenijih tipova brana (betonske: lučne i gravitacijske, i nasute: zemljane i kamene).

Prednosti nasutih brana su:

a. Minimalni zahtjevi za uvjete fundiranja (naročito kod zemljanih brana), kako sa stajališta nosivosti, tako i sa stajališta slijeganja. Prilagodljivost gotovo svim vrstama terena, kako geološkim tako i topografskim: od stijene do aluvija, od široke ravničarske

doline do uske klisure (naravno pod uvjetom da se može osigurati prostor za evakuaciju velikih voda)

b. mogućnost korištenja raznovrsnog i heterogenog materijala za nasip, često raspoloživog u blizini pregradnog profila.

c. Jeftino i brzo ugrađivanje korištenjem mehanizacije, što zajedno s prethodnim omogućava malu cijenu koštanja po jedinici volumena brane.

Nedostaci nasutih brana su:

a. Velika osjetljivost na prelijevanje (vanjsku eroziju)

b. Velika osjetljivost na nekontrolirano procjeđivanje i ispiranje materijala (unutrašnju eroziju)

c. Kao posljedica prve dvije mane: za evakuaciju velikih voda, kao za temeljni ispušt i zahvat potrebni su posebni betonski objekti izvan tijela nasipa, a evakuacijski organ se mora dimenzionirati na veći protok nego kod betonskih brana zbog osjetljivosti nasipa na prelijevanje.

d. Veliki opseg radova uslijed blagih kosina uzvodnog i nizvodnog lica, što se često nadoknađuje niskom jediničnom cijenom.

Prednosti betonskih brana su:

a. Značajna izdržljivost na prelijevanje istjecanje, što omogućava gradnju evakuacijskih organa i zahvata u sklopu same brane, kao i da se dimenzioniraju na manji protok (što smanjuje cijenu koštanja).

b. Utrošak male količine materijala u odnosu na nasute brane, obzirom na daleko strmiji nagib kosina, posebno kod lučne brane.

Nedostaci betonskih brana su:

a. Visoki zahtjevi za uvijete fundiranja (visoka nosivost i otpornost na smicanje, niska deformabilnost)

b. Visoka jedinična cijena, obzirom na potrebu dovoženja cementa, ponekad i agregata, i na relativno spor rad, koji zahtjeva brojniju radnu snagu nego u slučaju nasutih brana.

c. Kod lučnih brana se, pored stabilnosti bokova i dna doline, zahtjeva još i odgovarajući odnos visine brane i širine doline (jer je zbog načina prenošenja opterećenja lučna brana pogodna samo za relativno uske doline).

Prema gore navedenom može se zaključiti da će za određivanje tipa brane od velikog utjecaja biti:

a) Osobine tla na kome se brana fundira, odnosno dozvoljeni naponi u tlu, smičuća čvrstoća, dozvoljene deformacije temelja. Jasno je da povećanje visine brane povećava i napone u tlu, što za slabije nosiva tla daje prednost nasutim (prvenstveno zemljanim) branama. Također treba imati u vidu da se s visinom brane povećava i hidraulički gradijent filtracijske vode pa time raste i opasnost od ispiranja tla nizvodno od brane. Ovo opet ide u prilog nasutim branama, obzirom da je kod njih hidraulički gradijent manji (u odnosu na betonsku branu iste visine), jer je širina temeljne stope, a time i dužina filtracijskog puta, znatno veća.

b) Vezano s prvom stavkom je i debljina naslaga aluvija i/ili **drobine** u riječnom koritu. Često se ekonomski ne isplati uklanjati naslage da bi se betonska brana fundirala na zdravoj stijeni (pogotovo za debljine aluvija veće od 5-6 m) pa prednost opet ima nasuta brana.

c) Blizina i dostupnost potrebnih količina odgovarajućih građevinskih materijala.

d) Dozvoljena vrijednost slijeganja brane, opet daje prednost nasutoj brani (osim ako je nasip od kamena s uzvodnim armirano-betonskim ekranom).

e) Topografija terena. Uske doline od zdrave stijene dobre nosivosti često daju značajnu prednost lučnoj brani zbog malog utroška materijala.

f) Uvjeti za evakuaciju velikih voda favoriziraju betonske brane, posebno u uskim dolinama, u kojima je ograničen prostor za razvijanje preljevnog ruba (betonskih) preljevnih konstrukcija nasute brane.

g) Klimatski činitelji mogu značajno utjecati na izbor. Niske temperature i veliki broj kišnih dana daju prednost branama od kamena (u odnosu na zemljane i betonske brane).

2.6 Uzroci rušenja brana

Brane se mogu srušiti, i rušenja su se, nažalost, dešavala u prošlosti. Najvažniji uzroci rušenja brana su:

1. Nepredviđeno prelijevanje brane

Do prelijevanja brane može doći uslijed kvara na ustavama, ili greške pri upravljanju ustavama, ili uslijed nedovoljnog kapaciteta evakuacijskih organa. Betonske brane se u tom slučaju mogu "odlomiti", a nasute brane stradaju od progresivne erozije tijela brane. Kako bi se izbjeglo prelijevanje brane neophodno je :

a) Osigurati pouzdane hidrološke podloge i računati s poplavnim valom odgovarajuće veličine.

b) Ispravno odrediti tip i kapacitet evakuacijskih organa, i takav kapacitet postići pravilnim izvođenjem i održavanjem objekta.

c) Ako se za evakuaciju velikih voda koriste preljevi s ustavama, obvezno je previdjeti više pogonskih mehanizma, rezervna preljevna polja (u slučaju da neka od ustava otkáže) kao i odgovarajući način upravljanja ustavama i osigurati siguran prilaz ustavama.

2. Unutrašnja erozija materijala brane ili njenih temelja

Nedovoljno poznavanje osobina materijala na kome se brana fundira ili materijala od kojega je brana izgrađena, kao i neodgovarajući tretman temelja i tijela brane može dovesti do nekontroliranog filtriranja vode kroz temelje ili tijelo brane, što izaziva ispiranje (unutrašnju eroziju) materijala, i konačno rušenje objekta. Često se javlja "privilegirani" put vode pored cijevi temeljnih ispusta ili drugih "stranih" tijela u nasipu brane. Zato je neophodno:

a) Što potpunije poznavanje osobina sredine u kojoj se brana temelji, kao i materijala od kojeg se brana gradi.

b) Izbjegavati rješenja koja bi mogla izazvati nekontrolirano istjecanje (cijevi u tijelu nasipa brane, na pr.).

c) Ispravno izvođenje, osmatranje i održavanje svih osjetljivih mjesta gdje bi mogao stvoriti "privilegirani" put vode, ako je već neophodno da se takva mjesta (slabe točke) uopće projektiraju.

3. Neispravan statički proračun prilikom projektiranja brane

Najčešće je u pitanju zanemarivanje ili podcjenjivanje nekih od sila koje narušavaju stabilnost brane – sile uzgona u prvom redu.

Na svim značajnim branama ugrađuju se uređaji preko kojih se prati ponašanje brane u toku eksploatacijskog razdoblja (uređaji za oskultaciju). Bilježi se slijeganje brane, nastanak i širenje prsnuća i pukotina u brani i temelju, filtriranje i pritisak vode, i slično.

Praćenje i analiza promatranih veličina omogućava da se na vrijeme uoče, i po mogućnosti otklone, uzroci oštećenja ili rušenja brane.

Također, bi trebalo usporediti stvarno ponašanje brane i temelja s rezultatima proračuna iz projekta, čime se stječe dragocjeno iskustvo za buduće objekte.

Kako bi se ublažile posljedice mogućeg rušenja brana, prema propisima mnogih država (uključujući i našu) za svaku visoku branu obavezno je procijeniti (fizičkim ili matematičkim modelom) širenje poplavnog vala koji bi nastao uslijed rušenja brane, i na terenu označiti granicu ugroženog područja odakle se stanovništvo mora evakuirati u slučaju da dođe do opasnosti od rušenja brane. Danas se razvijaju specijalni kriteriji za analizu rizika. Oni su temeljeni na kvantificiranju nepouzdanosti i probabilističkom pristupu (stohastičke metode).

3. Betonske gravitacijske brane

Betonska gravitacijska brana suprotstavlja se vanjskim silama vlastitom težinom. I nasute brane formalno spadaju u tip gravitacijskih brana, jer se opterećenju suprotstavljaju težinom, ali je uobičajeno da se pojam "gravitacijske brane" odnosi na betonske brane.

Gravitacijske (betonske) brane grade se na tlu koje ima dostatnu nosivost kako bi primio težinu brane i opterećenja koja brana prenosi u temelj

Slika 3.1 Poprečni presjek dijela betonske gravitacijske brane

Poprečni presjek gravitacijske brane ima oblik približno pravokutnog trokuta, s duljom katetom kao uzvodnim licem (Sl. 3.1). Ovakav oblik presjeka proizlazi iz uvjeta stabilnosti.

Po pravilu ove brane su preljevno-nepreljevne, što znači da se jedan dio brane (preljevni dio) oblikuje tako da se preko njega voda može slobodno ili kontrolirano prelijevati u nizvodno korito (sl.3.4). Naime, gravitacijske brane često se koriste i kao preljevni objekti (evakuacijski organi) nasutih brana.

3.1. Opterećenja koja djeluju na gravitacijsku branu

Prvi zadatak prilikom dimenzioniranja brana je odrediti opterećenja koja djeluju na objekt (analiza opterećenja). Najvažnija opterećenja kod brana su:

- 1) Hidrostatički pritisak na uzvodno i nizvodno lice brane.
- 2) Uzgon (porni pritisak vode)
- 3) Dinamički pritisak vode uslijed vjetra i valova.
- 4) Pritisak leda.
- 5) Pritisak nanosa.
- 6) Sile od potresa.
- 7) Težina brane (i temelja).

8) Reakcija brane (temelja) - sila iste jačine i pravca, a suprotnog smjera od rezultante vanjskih sila (nabrojanih od 1 do 7).

Gravitacijske brane se grade kao niz vertikalnih konzolnih nosača međusobno odvojenih razdjelnicama (sl. 3.2, 3.39). Zato je svaka konzola (lamela) neovisna i mora biti stabilna za sebe. Obzirom na malu širinu konzola (obično 6 -16 m), može se smatrati da je zadatak ravninski, pa se opterećenja i stabilnost izražavaju i računaju za 1 m dužine brane. Obično se analiza opterećenja provodi za presjek s najvećom visinom, a po potrebi se analiziraju i drugi procesi (u osloncima, ili na mjestu promjene uvjeta fundiranja). Zbog preglednosti, uobičajeno je svaku od promatranih sila rastaviti na horizontalnu i vertikalnu komponentu, otkuda se dobije horizontalna i vertikalna komponenta rezultante svih sila.

Pri analizi opterećenja pogodno je "figure" kojima se predstavljaju pritisci, težine, ili uzgon razdijeliti na jednostavne geometrijske oblike (trokut, pravokutnik, dio kruga i sl.)

Slika 3.2 Računski segment jedinične dužine

3.1.1 Hidrostatski tlak

Hidrostatski tlak, odnosno sila hidrostatskog tlaka, najznačajnije je opterećenje koje djeluje na branu. Ovo je tzv. vanjski pritisak vode (unutrašnji pritisak vode je uzgon - porni pritisak).

Prema osnovnoj jednadžbi hidrostatičke, hidrostatski tlak u nekoj točki tekućine jednak je visinskoj razlici piježometarske kote i položajne kote promatrane točke, pomnoženo sa specifičnom težinom vode, γ_w (sl.3.3). Ako je tekućina u dodiru s atmosferom, kao na slici 3.3, piježometarska kota je ujedno i kota slobodne površine tekućine ($\Pi = Z_G$) pa je hidrostatski tlak jednak dubini vode u točki, pomnoženo sa specifičnom težinom ($p = \gamma_w h$). Treba imati na umu da je ovo tzv. relativni tlak, kod kojeg se izostavlja utjecaj atmosferskog tlaka (pritisak sloja zraka iz atmosfere), za razliku od apsolutnog tlaka, gdje se uključuje i atmosferski tlak ($p^{ABS} = p + p^{ATM}$). U praksi se najčešće radi s relativnim tlakom, obzirom da isti tlak djeluje u svim točkama objekta.

Tlak integriran po površini na koju djeluje daje *silu hidrostatskog tlaka* – *hidrostatsku silu*. Hidrostatske sile se računaju po načelima hidrostatičke. Horizontalna komponenta, P , hidrostatičke sile na neku površinu jednaka je hidrostatičkoj sili na vertikalnu projekciju te površine okomito na pravac djelovanja tražene horizontalne komponente. Vertikalna komponenta, F , hidrostatske sile na površinu jednaka je težini tekućine u volumenu između promatrane površine i horizontalne projekcije površine u ravnini piježometarske kote.

Slika 3.3. Hidrostatičko opterećenje na nepreljevni dio brane (bez uzgona)

Za ravninski zadatak potrebno je odrediti silu koja djeluje na jedan dužni metar površine jer je opterećenje jednako u svim ravninama okomitima na promatranu površinu.

Tako je horizontalna komponenta hidrostatske sile po jedinici dužine na uzvodnom licu brane, P_G ,

(indeks G označava gornju vodu, sl.3.3), jednaka površini trokuta koji predstavlja raspored pritiska po dubini, pomnoženo sa specifičnom težinom vode:

$$P_G = \gamma_w \frac{H_G^2}{2} \quad (3.1)$$

Gdje je dubina gornje vode, H_G , mjerena od nivoa vode ispred brane do kote spojnice na kojoj počinje filtracija (na sl. 3.3 filtracija počinje na uzvodnom rubu temeljne spojnice). Sila P_G djeluje na rastojanju od $1/3 H_G$ od kote na kojoj počinje filtracija (u težištu površine opterećenja koje sila predstavlja – zamjenjuje). Horizontalna komponenta hidrostatske sile na nizvodnom licu, P_D (horizontalna sila od donje vode) je:

$$P_D = \gamma_w \frac{H_D^2}{2} \quad (3.2)$$

a, djeluje na rastojanju od $1/3 H_D$ iznad kote spojnice na kojoj se filtracija završava (nizvodni rub temeljne spojnice na sl. 3.3).

Vertikalna komponenta hidrostatičke sile (po jedinici dužine) na uzvodnom licu brane je:

$$F_G = \gamma_w V_G \quad (3.3)$$

i djeluje u težištu volumena - površine, V_G , (u težištu trapeza na sl.3.3), a vertikalna sila na nizvodnom licu je:

$$F_D = \gamma_w V_D \quad (3.4)$$

i djeluje u težištu trokuta iznad nizvodnog lica.

Slika 3.4 Hidrostatičko opterećenje na preljevni dio brane (bez uzgona)

Kod preljevnog dijela brane (sl. 3.4) obično se pretpostavlja da preljevni mlaz ne djeluje na branu. To je zbog sigurnosti, jer je pritisak na donjem rubu mlaza jednak nuli pri računskom protoku, dok je pri manjim protocima pozitivan, što doprinosi stabilnosti. Na strani sigurnosti je i pretpostavka o hidrostatskom rasporedu tlaka na uzvodnom licu brane, jer je stvarni – tzv. hidrodinamički tlak manji.

3.1.2 Uzgon

Beton i stijena su manje ili više porozne sredine, prožete mnoštvom povezanih mikro i makro šupljina (pora, lomova, pukotina) u koje se voda zavlači i kroz koje filtrira. Uzgon je opterećenje kojim voda u šupljinama betona i temeljne sredine potiskuje objekt prema gore. Uzgon djeluje i pri hidrostatskom stanju (kada voda u šupljinama miruje), i pri hidrodinamičkom (kada se kreće – filtrira).

Slika 3.5 Uzgon

Pri hidrostatskim uvjetima uzgon je (kao i svaka vertikalna hidrostatska sila) jednak težini vode između površine na koju djeluje (kontakt brane i tla na sl. 3.5a) i horizontalne projekcije površine u ravnini pijezometarske kote. Za ravninski zadatak, težina po jedinici dužine jednaka je površini između linije dodira duž koje djeluje uzgon, i pijezometarske linije, pomnoženo sa specifičnom težinom vode. Uobičajeno je crtati površinu odnosno dijagram opterećenja, ispod linije dodira (u smjeru djelovanja opterećenja), kao što je i prikazano na sl. 3.5.

I pri hidrodinamičkim uvjetima (kada se voda kreće) uzgon se računa na isti način – nema razloga da bude drugačije. Jedina razlika je u tome što sada pijezometarska linija nije više horizontalna, već opada u smjeru tečenja jer se energija troši na gubitke pri filtraciji vode (sl. 3.5b)

U homogenoj i izotropnoj sredini brzina filtriranja vode ispod brane približno je konstantna (osim u blizini uzvodnog i nizvodnog ruba, sl. 3.6) pa se obično uzima da tlak, odnosno pijezometarska linija, opada linearno. Ovakva pretpostavka je često na strani sigurnosti, jer sila uzgona računata po linearnoj teoriji, U_{LIN} , daje veći moment prevrtanja oko nizvodnog ruba od sile računate po potencijalnoj teoriji U_{POT} (krak okretanja linearnog uzgona, r_{LIN} , veći je od odgovarajućeg kraka "potencijalnog uzgona", r_{POT} , sl.3.7).

Međutim primjenom linearne teorije dobit će se podcijenjene vrijednosti uzgona za dio objekta na nizvodnom kraju filtracionog puta (za dno umirujućeg bazena, na pr.). Također, pri procjeni filtracijske stabilnosti tla u temelju, treba imati na umu da se filtracijske brzine značajno povećavaju u blizini uzvodnog i nizvodnog ruba brane (sl. 3.6).

Slika 3.6 Usporedba potencijalne teorije s linearnom teorijom

Ako se prihvati pretpostavka o linearnoj promjeni pijezometarske kote uzduž svake manje-više homogene dionice filtracijskog puta, sila uzgona, U , može se predstaviti kao površina mnogokutnika (pravokutnog trapeza ABCE za slučaj na sl. 5.8), pomnoženo specifičnom težinom vode:

$$U = \gamma_w B \frac{H_G + H_D}{2} \quad (3.5)$$

Sila djeluje u težištu površine.

Slika 3.7 Moment prevrtanja kod "linearnog" i "potencijalnog" uzgona

Uzgon se obično razdvaja na dva dijela (sl.3.8):

Slika 3.8 Bazni i diferencijalni dio uzgona

- a) Bazni uzgon (potisak), U_{BAZ} , koji odgovara hidrostatskom tlaku donje vode, i
- b) Diferencijalni (filtracijski) uzgon, U_{DIF} , koji odgovara pijezometarskoj razlici između gornje i donje vode ($\Delta H = H_G - H_D$):

$$U = U_{BAZ} + U_{DIF} = \gamma_w B H_D + \gamma_w B \frac{\Delta H}{2} \quad (3.6)$$

Nema ekonomičnog načina eliminacije baznog uzgona (U_{BAZ}), ali postoji dosta načina kojima se može smanjiti diferencijalni uzgon (U_{DIF}):

1. Dreniranjem vode iz pukotina i pora smanjuje se filtracijski protok, a time i filtracijska brzina nizvodno od drenaže, pa opada i gubitak energije, odnosno *opada pijezometarska razlika* na potezu od drenaže do nizvodnog lica brane (usporediti pijezometarske razlike s drenažom, $\Delta H'_I$, i bez drenaže, ΔH_I , na sl.3.9). Ovim drenaža ruši pijezometarski nivo, čime smanjuje pritisak filtracijske vode – smanjuje diferencijalni uzgon. U stjenovitim temeljima voda se često drenira mrežom drenažnih bušotina. Ako bi bušotine bile gusto raspoređene jedna uz drugu, nivo podzemne vode iza drenaže bio bi vrlo blizak nivou donje vode, pa diferencijalnog uzgona (iza drenaže) ne bi ni bilo. Drenažu treba postaviti

što bliže uzvodnom licu brane, kako bi se dio presjeka na kome je pritisak umanjen učinio što većim.

Na dijelu presjeka uzvodno od drenaže gradijent pritiska (pad piježometarske linije) je veći nego u slučaju nepostojanja drenaže (točkasta linija na sl. 3.9), što povećava filtracijski protok na potezu od uzvodnog lica do drenaže (u odnosu na slučaj bez drenaže). filtracijska voda se iz drenažnih bušotina odvodi u donju vodu kroz kanale u drenažnoj galeriji (gravitacijom ili pumpanjem).

Slika 3.9 Smanjivanje uzgona drenažom

2. Kada se produži put filtriranja vode uzvodnom horizontalnom i/ili vertikalnom zavjesom, smanjit će se pritisak (odnosno uzgon) ispod brane (sl. 3.10). Treba voditi računa da se u zavjesi ne jave pukotine, inače se efekt smanjuje, ili sasvim izostaje (ovisno o položaju i veličini pukotine). S druge strane, ispod slapišta (umirujućeg bazena) javlja se neželjeni efekt "nizvodne" zavjese s povećanim uzgonom (sl.3.11). Dreniranje slapišta je rizično zbog mogućnosti pojave opasnih pulzacijskih hidrodinamičkih opterećenja pa se slapišne ploče obično osiguravaju od isplivavanja ankerima.

Slika 3.10 Smanjivanje uzgona horizontalnim zastorom

Slika 3.11 Uzgon kod preljevnog dijela brane i slapišta

3. U dosadašnjem razmatranju pretpostavljalo se da je materijal kroz koji voda filtrira homogen, pa je vododrživost konstantna duž cijelog filtracijskog puta od uzvodnog do nizvodnog lica brane. Što ako to nije slučaj, bilo da je materijal heterogen u prirodnom stanju, bilo da se homogenost "umjetno" naruši? Utjecaj heterogenosti materijala na uzgon prikazan je na slici 3.12.

Slika 3.12 Utjecaj heterogenosti sredine na uzgon

U zoni velike vododrživosti površina otvora kroz koje voda filtrira je mala te su otpori tečenju veliki i piježometarska linija brže opada. Od tuda ideja da se materijal bliže uzvodnom rubu učini što više vododrživim, čime se povećavaju gubici pada, i obara

pijezometarska linija na početku filtracijskog puta, što kao i kod dreniranja, smanjuje silu uzgona (sl. 3.12c).

Kod stjenovitih sredina vododrživost se povećava injektiranjem. Injektirana masa pod tlakom se utiskuje u bušotinu, odakle prodire u pukotine i pore koje popunjava, stvarajući pregradu visoke vododrživosti –injekcijska zavjesa. Kod tla (vezanog i nevezanog) vododrživost se povećava zbijanjem. Kod nevezanog tla često se koriste dijafragme i priboji.

Slika 3.13 Injekcijska zavjesa gravitacijske brane

Povećanje otpora filtriranju injektiranjem na uzvodnom dijelu presjeka, uz smanjenje otpora dreniranjem nizvodno od injekcijske zavjese stvara heterogenost materijala kao na slici 3.12c, čime se postiže maksimalno smanjenje uzgona. (Ako bi drenaža bila uzvodno od injekcijske zavjese, stvorila bi se "nepovoljna" heterogenost s povećanjem uzgona na uzvodnom dijelu presjeka).

Injektiranjem i dreniranjem može se značajno smanjiti diferencijalni dio uzgona pa se izraz za uzgon (3.6) aproksimira s:

$$U = \gamma_w B H_D + \delta \frac{\gamma_w B}{2} \Delta H \quad (3.7)$$

Gdje koeficijent δ kvantificira učinak drenaže i zaptivanja na smanjenje diferencijalnog uzgona ($0 < \delta < 1$). U idealnom slučaju kada su drenaža i injektirani zastor maksimalno učinkoviti $\delta = 0$, a za slučaj bez drenaže i injektiranja javlja se pun diferencijalni uzgon ($\delta = 1$).

Slika 3.14 Linearna aproksimacija diferencijalnog uzgona

Vrijednost koeficijenta δ obično se uzima u granicama između $0.33 < \delta < 1.0$, s tim što je $\delta = 0.33$ samo kod zdravih stijena i to kad je predviđeno i dreniranje i injektiranje; u ostalim slučajevima (oštećena stijena, predviđeno samo injektiranje, ili samo dreniranje) uzima se $0.5 < \delta < 0.67$.

Za složenu liniju dodira (sredine i brane, ili neki drugi presjek) uzgon se dobije preko površine između linije dodira i pijsometarske linije (sl. 3.15). Na sl.3.15a uzgon je

prikazan s obje strane linije dodira i pijezometarske linije, i s donje strane, kao opterećenje koje potiskuje branu naviše (kako se uobičajeno predstavlja).

Uzgon je opterećenje koje karakterizira mnoge hidrotehničke objekte pa mu je zato i posvećeno ovoliko pažnje.

Slika 3.15 Proračun uzgona za razne oblike temelja

3.1.3. Dinamički pritisak vode uslijed vjetra i valova

Valovi izazvani vjetrom značajni su pri dimenzioniranju brane, ne toliko zbog opterećenja koje udarom izazivaju, koliko zbog određivanja kote krune brane (sl.3.17). Na kotu maksimalnog uspora u akumulaciji treba dodati i visinu mjerodavnog vala koji se penje uz uzvodno lice brane, uz obaveznu rezervu (tzv. slobodna visina brane - "freeboard") od 0.5 -1.0 m.

Kao mjerodavna visina obično se uzima tzv. "značajna" visina vala, h_v (Smith 1995). To je visina vala koji je viši od 87% valova (a niži od 13% valova) pri određenoj "valnoj slici", koju izaziva vjetra mjerodavne jačine (brzine) i pravca na razmatranoj akumulaciji. Razumno je očekivati da visina vala, h_v , bude razmjerna brzini vjetra, V_{vj} , i duljini vodene površine u pravcu brzine, L_0 (dužine na kojoj se stvara val, sl. 3.16).

Slika 3.16 Veličine koje određuju visinu vala

Prema istraživanjima (Smith, 1995) značajna visina vala, h_v , je :

$$h_v = 0.00513 V_{vj}^{1.06} (KL_0)^{0.47}, \quad (3.8)$$

a valna duljina, L_v , je :

$$L_v = 0.187 V_{vj}^{0.88} (KL_0)^{0.56}, \quad (3.9)$$

gdje su: h_v i L_v izraženi u metrima, brzina vjetra V_{vj} , u kilometrima na sat, a duljina pravca, L_0 , u kilometrima. Koeficijent, K , ovisi o odnosu srednje širine akumulacije (na razmatranom pravcu), i duljine pravca (W_0/L_0):

W_0/L_0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	2,0
K	0,00	0,26	0,40	0,51	0,67	0,83	0,90	1,00

Tablica 3.1 Koeficijent, K, ovisno o odnosu W_0/L_0

Mjerodavna brzina i pravac vjetra biraju se s ruže vjetrova. Obično se za osnovno opterećenje računa s vjetrom povratnog perioda od 20 godina, a usvaja se pravac koji daje najveću visinu vala u izrazu 3.8. Za izuzetno opterećenje se uzima povratni period od 50-100 godina. Valove stvara srednja jačina vjetra, a ne izrazito jaki udari, pa u računu treba koristiti srednju brzinu, a ne brzinu udara. Jednadžbe 3.8 i 3.9 vrijede ako je voda uzvodno od brane dovoljno duboka tj. ako je $H_G > 1/4 L_V$.

Slika 3.17 Visina vala i sila od vala na gravitacijsku branu

Treba imati na umu da val koji naiđe na prepreku "penje" se iznad visine koju ima u vodi udaljenoj od prepreke (obale). Pri udaru u vertikalnu prepreku val dostiže visinu od $h_p = 1.5 h_v$ iznad nivoa mirne vode (sl.3.17), pa prema ovoj visini treba i odrediti kotu krune brane. S obzirom da je dno vala za $0.5 h_v$ ispod nivoa mirne vode, to je ukupna visina kojom val udara (pritiska) vertikalnu prepreku (kao što je uzvodno lice gravitacijske betonske brane na slici):

$$h = 1.5h_v + 0.5 h_v = 2 h_v \quad (3.10)$$

Ako se usvoji hidrostatski raspored tlakova u valu, može se prihvatiti da je sila od vala, na 1 m duljine brane:

$$P_v = \frac{\gamma_w (2h_v)^2}{2} = 2\gamma_w h_v^2 \quad (3.11)$$

Obično se uzima da sila djeluje na koti nivoa mirne vode (Smith, 1995)

Ako pravac vjetra zatvara kut α_0 s pravcem osi brane, sila će biti (sl. 3.16):

$$P_v = 2\gamma_w h_v^2 \sin \alpha_0 \quad (3.12)$$

U slučaju kosog uzvodnog lica (kod nasipa), penjanje vala uz konturu može biti znatno više nego kod vertikalnog lica. Utvrđeno je da odnos penjanja, h_p , prema visini vala, h_v , ovisi o nagibu kosine "m" (sl.3.18), hrapavosti podloge, i odnosa visine vala i valne duljine, h_v/L_v (Roberson et al., 1988).

Slika 3.18 Penjanje vala uz kosinu

3.1.4. Pritisak leda

Led može djelovati na brane na dva načina:

- a) Pritiskom čvrstog pokrivača – statički pritisak leda i
- b) Silom koju izaziva udar ledene sante – dinamički pritisak leda.

a) Statički pritisak leda

Statički pritisak leda nastaje uslijed širenja ledenog pokrivača pri naglom otopljenju (Smith, 1995). Led se ponaša kao sva kruta tijela pa se pri snižavanju temperature skuplja i stvara pukotine u pokrivaču u koje prodire voda i stvara novi gušći led. Ako nastupi naglo otopljenje, led se širi, i ukoliko nema kuda (krute - stjenovite obale akumulacije) počinje pritiskati branu. Pritisak od leda se može javiti i zbog spuštanja razine vode ispod već formiranog ledenog pokrivača.

Slika 3.19 Statički pritisak leda

Pritisak je proporcionalan prirastu temperature i debljini leda. U stranoj literaturi postoje nomogrami i empirijske formule za određivanje statičkog pritiska leda (Smith 1995), ali se oni zasnivaju na iskustvu vezanom za određenu geografsku oblast, ili se u njima koriste podaci o veličinama koje se ne mjere u našoj zemlji.

Procijenjeno je da u najoštrijim klimatskim uvjetima u našim područjima, debljina ledenog pokrivača ne može preći $\delta = 0.4 - 0.6$ m, te je maksimalna statička sila leda s kojom bi trebalo računati $P_{SL} \cong 150$ kN/m (Pećinar, 1961). Treba imati na umu da statička sila leda ne može djelovati u isto vrijeme kada i sila vala.

Led nagomilan neposredno iza ustava, razbija se i propušta u donju vodu redovnim podizanjem ustava (za kraći period), što omogućava da se brana rastereti od statičkog opterećenja leda.

b) Dinamička sila leda

Dinamička sila leda, P_{DL} , nastaje uslijed udara santi leda u branu za vrijeme topljenja leda. I za proračun dinamičke sile leda koriste se empirijski izrazi. Ovdje se navodi obrazac Kuznjecova:

$$P_{DL} = K V_L \delta \sqrt{A_L} \quad (3.13)$$

gdje su: V_L = brzina kretanja leda (m/s), δ = debljina leda (m), A_L = površina osnove karakteristične sante leda (m^2), K = koeficijent koji ovisi o graničnoj čvrstoći leda pri drobljenju, dan je u tablici 3.2 (Građevinski kalendar, 1981):

Granična čvrstoća leda Na drobljenje (kN/m^2)	300	500	600	700
$K(kNs/m^3)$	23,6	30	33	43

Tablica 3.2 Koeficijent, K , ovisno o graničnoj čvrstoći leda na drobljenje

3.1.5. Pritisak nanosa (mulja)

Nanos istaložen ispred uzvodnog lica brane pritiska branu, i doprinosi njenoj nestabilnosti.

Slika 3.20 Sila od nanosa

Pritisak nanosa u nekoj točki na dubini, h_{NAN} , od gornjeg ruba sloja (sl.3.20) računa se kao aktivni pritisak tla (Novak, 1996):

$$P_{NAN} = (\gamma_{NAN} - \gamma_W) h_{NAN} \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3.14)$$

gdje je γ_{NAN} = volumna težina nanosa u zasićenom stanju, a φ = kut unutrašnjeg trenja nanosa pod vodom $0 < \varphi < 30^\circ$ (najčešće je $\varphi = 20^\circ - 30^\circ$, tj. kut unutrašnjeg trenja približno je isti kao i u nepotopljenom stanju, Novak 1996, Creager 1961).

Horizontalna sila od nanosa po metru dužnom brane dobiva se integriranjem pritiska po cijeloj debljini sloja H_{NAN} , pa iznosi:

$$P_{NAN} = \frac{(\gamma_{NAN} - \gamma_W) H_{NAN}^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.15)$$

Treba imati na umu da sila od nanosa ne umanjuje vrijednost hidrostatičke sile P_G , obzirom da voda prodire kroz pore u nanosu i "naliježe" na površinu uzvodnog lica brane (prema Smith-u 1995, dio konture brane na koju naliježe nanos je s oko 98% svoje površine u neposrednom dodiru s vodom). Kod nakošenog uzvodnog lica, sila od nanosa se rastavlja na horizontalnu i vertikalnu komponentu. Vertikalna sila se često ne uzima u obzir, što je na strani sigurnosti.

3.1.6 Sile od zemljotresa – seizmičke sile

Zemljotres predstavlja snažno oscilacijsko pomjeranje zemljine kore koje može značajno ugroziti stabilnost brane.

Slika 3.21 Mogući pravci djelovanja zemljotresa

Pomjeranje se preko temelja prenosi na branu. Brana dobiva ubrzanje, a , koje stvara inercijalnu seizmičku silu, P_S , razmjernu ubrzanju i masi brane, M . Ako se pretpostavi da svaki djelić brane dobiva isto ubrzanje, seizmička sila se može izraziti kao:

$$P_S = aM = K_S g M = \alpha G, \quad (3.16)$$

gdje su: g = ubrzanje zemljine teže (gravitacijsko ubrzanje), G = težina brane, $K_S = a/g$ = koeficijent seizmičnosti (ubrzanja) = odnos ubrzanja od zemljotresa i ubrzanja zemljine teže.

Vrijednost koeficijenta seizmičnosti ovisi o mogućoj seizmičkoj aktivnosti promatranog područja.

Tektonski pokret koji stvara potres može imati proizvoljan pravac djelovanja. Na slici 3.21 prikazana su tri osnovna pravca u Decartesovom koordinatnom sustavu: x , y , z .

Pokret u smjeru osi brane tj, u y - pravcu, neće imati mnogo utjecaja na stabilnost gravitacijske brane, obzirom da su bokovi brane poduprti stijenskom masom doline na koju se naslanjaju. (Za kontraforne brane i druge vrste olakšanih brana, mora se voditi računa i o ovom pravcu djelovanja, jer nema bočnog ukrućenja od sredine).

Pokret u vertikalnom z – pravcu može izazvati uzlaznu silu koja smanjuje težinu brane, a time i njenu stabilnost. Ubrzanje u vertikalnom pravcu, a_v , obično je manje od horizontalnog ubrzanja, a ; koeficijent seizmičnosti iznosi $K_{SV} \approx 0.5 - 0.75 K_S$, a vertikalna sila (koja "smanjuje" težinu brane) je:

$$P_{SV} = a_v M = K_{SV} g M = K_{SV} G \quad (3.16a)$$

Najopasniji je pokret u horizontalnom x – pravcu, jer pored inercijalne seizmičke sile od osciliranja same brane, $P_S = K_S G$ nastaje i dodatna inercijalna (dinamička) sila od osciliranja vode u akumulacijskom bazenu uzvodno od brane. Opterećenje u horizontalnom x – pravcu uvijek se uzima u analizi opterećenja.

Slika 3.22 Seizmička sila vode prema Vestergardu

Prema Vestergardu širina vodene mase x koja na dubini z oscilira zajedno s branom može se aproksimirati jednadžbom parabole:

$$x(z) = \frac{7}{8} \sqrt{z H_G}, \text{ pa je pritisak vode od potresa:} \quad (3.17)$$

$$p_{SW}(z) = a \rho_w \frac{x(z) dz}{dz} = K_S g \rho_w x(z) = K_S \gamma_w \frac{7}{8} \sqrt{z H_G} \quad (3.18)$$

Na dnu akumulacije (prema jednadžbi 3.18) seizmički pritisak je:

$$p_{SW}(H_G) = K_S \gamma_w \frac{7}{8} H_G, \quad (3.19)$$

pa je ukupna seizmička sila od vode jednaka površini parabole:

$$P_{SW} = K_S \gamma_w \frac{2}{3} \cdot \frac{7}{8} H_G^2 = K_S \gamma_w \frac{7}{12} H_G^2, \quad (3.20)$$

a djeluje na udaljenosti od $0.425 H_G$ od dna akumulacije (sl. 3.23)

Ako se pretpostavi potres od 9° Merkalijeve ljestvice, to jest $K_S = 0.10$, odnos seizmičke hidrodinamičke sile na branu i horizontalne komponente hidrostatičke sile je:

$$\frac{P_{SW}}{P_G} = \frac{0.10 \gamma_w \frac{7}{12} H_G^2}{\frac{1}{2} \gamma_w H_G^2} \approx 0.12, \text{ znači oko 12 \%}$$

3.1.7. Težina brane i temelja

Težina brane, G , najvažnija je stabilizirajuća sila kod gravitacijskih brana. Računa se kao volumen (odnosno površina poprečnog presjeka na 1 m dužni), pomnoženo s volumnom težinom betona:

$$G = \gamma_B A [kN/m], \quad (3.21)$$

gdje je A = površina poprečnog presjeka brane, a γ_B = volumna težina betona, obično $\gamma_B = 24 \text{ kN/m}^3$. Sila djeluje u težištu presjeka (sl.3.23).

Slika 3.23 Sila težine

Težina dijela temelja (sredine ispod ili oko brane), G_T , također može biti uzeta u račun pri analizi stabilnosti (npr., pri proračunu sigurnosti protiv klizanja). Kod nekih objekta (slapišta, površinskih zahvata, kanala i dr.) česti su primjeri da se vezivanjem ankerima za sredinu temelja postiže željena stabilnost.

3.1.8. Reakcija temelja

Prema zakonu "akcije i reakcije", svaka sila koja djeluje na objekt (na branu kao cjelinu, na temelj brane, ili neki dio brane), inducira reakciju iste jačine i pravca, sa suprotnim smjerom. Reakcija se *ne uzima* kao opterećenje, jer se razmatraju utjecaji sredine na objekt, a ne obrnuto.

3.1.9. Kombiniranje opterećenja

Sva navedena opterećenja ne mogu se istovremeno javiti. Ne može u isto vrijeme djelovati statički pritisak leda, i sila od udara vala. Isto tako, nije razumno očekivati da će se kratkotrajna opterećenja male vjerojatnosti pojave (kao što su, na primjer poplavni valovi maksimalno velike vode i katastrofalni potres maksimalne jačine za razmatrano područje) javiti jednovremeno. Postavlja se pitanje izbora kombinacije opterećenja, jer je u interesu za stabilnost objekta obuhvatiti sve realno najnepovoljnije kombinacije opterećenja. Za izbor mjerodavnih kombinacija opterećenja, bar za sada, ne postoje unaprijed utvrđeni recepti koji mogu pokriti sve situacije.

3.2 Stabilnost gravitacijske betonske membrane

Gravitacijska betonska brana je *stabilna* ako se može oduprijeti klizanju i okretanju. (Za mnoge hidrotehničke objekte važan uvjet stabilnosti je i otpornost na isplivavanje, što je kod gravitacijskih brana, u pravilu, uvijek ispunjeno). Da bi brana bila otporna na opterećenja i utjecaje, neophodno je da naponi i pomjeranja u brani i temelju budu u dozvoljenim granicama. Odsustvo napona zatezanja na uzvodnom licu je često mjerodavan uvjet pri dimenzioniranju gravitacijske betonske brane.

Navedeni uvjeti moraju biti zadovoljeni pri svim razmatranim kombinacijama opterećenja, s zahtijevanim koeficijentom sigurnosti. Koeficijent sigurnosti (na smicanje, okretanje, dozvoljene napone u tlu i betonu) razlikuju se ovisno o kombinaciji opterećenja. U početnim fazama projektiranja provjerava se samo tzv. "opća stabilnost" brane, što podrazumijeva određivanje stabilnost na klizanje i okretanje, kao i proračun napona i slijeganja u temeljnoj spojnici.

U višim fazama projektiranja potrebno je odrediti naponsko stanje i pomjeranje u konstrukciji i temelju, za što se kod visokih brana primjenjuje metoda konačnih elemenata. Brana i sredina koja čini temelj se razdjele na elemente odgovarajućeg oblika. Zatim se iz uvjeta ravnoteže sila, i veze napona i deformacija, za zadane konturne uvjete određuju pomjeranja i naponi za svaki element brane i temelja. Za manje objekte još uvijek se često koristi jednostavna metoda horizontalnih presjeka (poznata i kao gravitacijska metoda), koja tretira branu tj. svaku njenu lamelu s pripadajućim temeljom (sl.3.2), kao konzolni nosač od idealno elastičnog, homogenog i izotropnog materijala.

3.2.1 Stabilnost protiv klizanja (smicanja)

Stabilnost protiv klizanja (smicanja) često je najkritičniji od prethodno navedenih uvjeta. Klizanje (smicanje) može nastati: 1) na kontaktu brane i sredine, 2) u sredini-temelju i 3) u presjeku tijela brane (najprije na mjestu horizontalnih spojnica, sl.3.38). Treba provjeriti sve potencijalno opasne ravnine klizanja u temelju (pukotine, proslojke gline, i sl.) Razlikuju se uvjeti klizanja u temeljnoj spojnici kod brana fundiranih na stijeni, i kod brana na nekoherentnom (nevezanom) tlu.

a) Kod nevezanog tla nema otpora smicanju zbog kohezije unutar materijala pa se pomjeranju protivi jedino trenje. Do klizanja ne dolazi ako sila klizanja (za horizontalni presjek to je horizontalna komponenta rezultante sila na branu, H , sl.3.24a), manja od sile trenja, T , koja je jednaka proizvodu normalne sile (vertikalne komponente rezultante, V , za horizontalni presjek, kao na sl. 3.24) i koeficijenta trenja, f :

$$T > H, \text{ odnosno } f V > H \quad (3.22)$$

Obično se u uvjet ravnoteže uvodi i zahtijevani faktor – koeficijent sigurnost protiv smicanja (klizanja), C_s , koji ovisi o kombinaciji opterećenja ($C_s=1-3$) pa uvjet (3.22) za nevezano tlo postaje:

$$\frac{fV}{C_s} > H \quad (3.23)$$

Slika 3.24 Stabilnost protiv klizanja

Uvjet (3.23) može se sagledati i na drugi način. Iz odnosa stabilizirajućih sila i sila klizanja može se odrediti raspoloživi faktor sigurnosti koji mora biti veći od zahtijevanog faktora C_s

$$\frac{fV}{H} > C_s \quad (3.23a)$$

Koeficijent trenja, f , ovisi o kutu unutrašnjeg trenja materijala:

$$f = \text{tg } \varphi, \quad (3.24)$$

gdje je φ =kut unutrašnjeg trenja (kut pri kome je kosina stabilna). Za materijale koji su pogodni za fundiranje gravitacijske brane $\varphi = 20-35^\circ$.

b) U vezanom (koherentnom) materijalu (stijena, beton) smicanju se pored trenja suprotstavlja i kohezija (otpor na smicanje uslijed veza između čestica i materijala). Sila kohezije, T_c , (po metru dužnom brane) jednaka je (slika 3.24b)

$$T_c = c b \quad (3.25)$$

gdje je c = kohezija materijala. Sada se uvjet stabilnosti protiv smicanja u horizontalnom presjeku G - D može napisati kao:

$$f V + c b > H, \text{ odnosno: } \frac{f V + c b}{C_s} > H. \quad (3.26)$$

Raspoloživi koeficijent sigurnosti protiv smicanja može se izraziti kao odnos stabilizirajućih i smičućih sila, slično kao i kod nevezanog materijala:

$$\frac{f V + c b}{H} > C_S \quad (3.26a)$$

gdje je C_S = zahtijevani faktor sigurnosti i iznosi $C_S = 1,3 - 4$, ovisno o kombinaciji opterećenja.

Pri provjeri klizanja za koherentni (vezani) materijal uobičajen je slijedeći postupak:

1. Prvo se provjeri stabilnost bez kohezije korištenjem obrasca (3.23a), s tim što se dozvoljava nizak koeficijent sigurnosti $C_S = 1 - 1,3$. Ako se na ovaj način zadovolji stabilnost, nema potrebe za daljnjim provjeravanjem.
2. Ako uvjet stabilnosti nije postignut, uvodi se u račun i kohezija pa se primjenjuje obrazac (3.26a). Sada se traži da koeficijent sigurnosti bude znatno veći nego za slučaj bez kohezije ($C_S = 4$ Za normalno, do $C_S = 1,3$ za izuzetno opterećenje).
3. Ako ni tada nije postignuta zahtijevana sigurnost na klizanje, mora se povećati širina temeljne spojnice, b , ili se primjenjuje neka druga mjera za povećanje otpora klizanju.

Jedan od načina da se poveća stabilnost na klizanje je i zakošavanje temeljne spojnice (sl.3.25a). Ovime se povećava sila trenja, a smanjuje se sila smicanja (u odnosu na slučaj sa horizontalnom spojnicom). Uvjet stabilnosti na smicanje sada glasi:

$$\frac{f(V \cos \alpha + H \sin \alpha) + c b / \cos \alpha}{H \cos \alpha - V \sin \alpha} > C_S \quad (3.26b)$$

Slika 3.25 Kosa ravnina klizanja

3.2.2 Stabilnost protiv okretanja

Stabilnost protiv okretanja podrazumijeva da stabilizirajući moment vraćanja, M_V , oko najnižeg nizvodnog ruba brane (točka "D" na slici 3.26a) bude veći od destabilizirajućeg momenta okretanja, M_P , i to s zahtijevanim stupnjem (tj. koeficijentom) sigurnosti.

$$\frac{M_V}{M_P} > C_P, \quad (3.27)$$

gdje je C_P = koeficijent sigurnosti na okretanje. Dozvoljene vrijednosti koeficijenata sigurnosti ovise o kombinaciji opterećenja i kreću se od 1,5 za normalno opterećenje do 1,1 za izuzetno.

3.2.3 Metoda horizontalnih presjeka

Metoda horizontalnih presjeka (gravitacijska metoda) sastoji se iz proračuna naponskog stanja duž nekoliko horizontalnih presjeka razmatrane lamele gravitacijsko betonske brane. Najvažnije pretpostavke ove metode su:

1. Brana (s temeljom) je sastavljena od međusobno odvojenih konzolnih nosača koji rade zasebno, bez međusobnog utjecaja i prenošenja opterećenja s jedne konzole na drugu (ravno stanje deformacija).
2. Brana i temelj su od idealno elastičnog, homogenog i izotropnog materijala.
3. Za svaku horizontalnu presječenu ravninu u brani i temelju vrijedi linearan raspored normalnih napona, a parabolični raspored napona klizanja.

Gravitacijske betonske brane razdijeljene vertikalnim razdjelnicama na lamele koje ne prenose opterećenje, uglavnom zadovoljavaju uvjete ovih pretpostavki. Od "točnog rješenja" (dobivenog metodom konačnih elementa, na pr.), bitno odstupaju jedino vrijednosti napona u temelju i u nižim dijelovima brane, gdje uvjeti fundiranja mogu značajno izmijeniti naponsko stanje.

Za izabrane horizontalne presjeke prvo se računaju vertikalni normalni naponi, zatim horizontalni normalni naponi i naponi klizanja, da bi se na kraju dobile vrijednosti i pravci (trajektorije) glavnih normalnih napona.

3.2.4 Vertikalni normalni naponi i odsustvo napona zatezanja

Određivanje vertikalnih normalnih napona u presjeku brane

Traže se vrijednosti vertikalnih normalnih napona za horizontalni presjek G - D, sa središnjom točkom "0" (Sl. 3.26). Presjek može biti postavljen kroz tijelo brane, ili na dodiru brane i sredine. Sve sile koje djeluju u presjeku G – D slažu se u rezultantu, R, koja djeluje u točki "C" na udaljenosti "e" od središta presjeka ("e" je ekscentricitet, sl.3.26b).

Rezultanta se razlaže na horizontalnu komponentu, H , i vertikalnu komponentu, V , koja oko središta "O" daje moment $M = eV$ (horizontalna komponenta ne daje moment jer leži u ravnini presjeka G – D).

Vertikalna komponenta, V , (sa svojim momentom M) stvara vertikalne normalne napone u presjeku, dok horizontalna komponenta, H , izaziva napone klizanja.

Prema linearnoj teoriji napona za elastični nosač (Brčić 1978), vertikalni normalni napon u horizontalnom presjeku je:

$$\sigma_v = \frac{V}{A} + \frac{M}{I} x \quad (3.28)$$

Slika 3.26 Vertikalni normalni naponi

gdje je A = površina poprečnog presjeka = $b \times 1\text{m}$, I = moment inercije oko središta presjeka = $b^3/12 \times 1\text{m}$, i x = udaljenost od središta (sl.3.26) te se može napisati:

$$\sigma_v = \frac{V}{b} + 12 \frac{M}{b^3} x = \frac{V}{b} + 12 \frac{eV}{b^3} x \quad (3.29)$$

s tim da su V i M sila tj. moment po metru dužnom.

Najveća i najmanja vrijednost napona ostvarit će se na rubovima "G" i "D" presjeka, gdje je $x = \pm b/2$, pa je:

$$\sigma_{v,G} = \frac{V}{b} + 6 \frac{M}{b^2} = \frac{V}{b} + 6 \frac{eV}{b^2} = \frac{V}{b} \left(1 + 6 \frac{e}{b} \right) \quad (3.30)$$

za uzvodno lice, "G", i:

$$\sigma_{v,D} = \frac{V}{b} - 6 \frac{M}{b^2} = \frac{V}{b} \left(1 - 6 \frac{e}{b} \right) \quad (3.30a)$$

za nizvodno lice "D".

Uvjet odsustva napona zatezanja

Prema jednadžbama 3.30 i 3.30a očito je da su normalni naponi $\sigma_{v,G}$ i $\sigma_{v,D}$ pozitivni sve dok je:

$$-\frac{b}{6} < e < \frac{b}{6}, \quad (3.31)$$

odnosno dok se rezultanta R nalazi u okviru srednje trećine presjeka, tj. unutar "jezgre presjeka" (sl.3.27).

Da bi se brana okrenula oko svog nizvodnog ruba (točka "D" na sl.3.26) potrebno je da moment okretanja oko točke "D" bude veći od momenta stabilizirajućih sila, odnosno da ukupni obrtni moment oko točke "D" bude pozitivan (tj. da rezultanta sila, R , izađe izvan presjeka brane). Međutim, već pri manjim vrijednostima obrtnog momenta od kritičnog (okretanja), na uzvodnom licu brane javit će se naponi zatezanja, što će izazvati puknuća, zbog male otpornosti betona na zatezanje. Voda u pukotini će povećati silu uzgona na uzvodnom dijelu presjeka (sl.3.12b), što dodatno povećava napone zatezanja, pa se pukotina širi k nizvodnom licu. Ukoliko se pukotina dovoljno proširi, horizontalna sila će odnijeti (otklizati) olakšanu i od temelja odvojenu branu, prije nego što moment okretanja postane dovoljno velik da je okrene. Zato je neophodno spriječiti pojavu napona zatezanja, prije svega na uzvodnom licu brane.

Projektanti često dozvoljavaju neznatne napone zatezanja, isključivo pri seizmičkim utjecajima. Ovi naponi moraju biti manji od dozvoljenih napona zatezanja u betonu. Smatra se da zbog kratkog trajanja seizmičkog opterećenja neće doći do povećanja uzgona u pukotinama koje bi se mogle otvoriti uslijed zatezanja. S druge strane, zatezanje – posebno na uzvodnom licu - ne smije se dopustiti pri ostalim kombinacijama opterećenja, jer otvaranje (uzvodnih) pukotina smanjuje otpor proviranju na uzvodnom dijelu presjeka čime se povećava sila uzgona, U (vidjeti sl. 3.12b).

Slika 3.27 Rezultanta djeluje unutar jezgre presjeka

Širina presjeka (G-D) obično se odredi tako da rezultanta, R , pada u najnižvodniju točku jezgre, "d" (sl. 3.27), za najnepovoljniji slučaj opterećenja. Time se postiže najmanji (najjeftiniji) presjek, kod kojega se ne javlja zatezanje na uzvodnom licu brane.

3.2.5 Uvjet ograničenja glavnih napona

Neophodno je da naponi u betonu i temelju budu manji od dozvoljenih, pa je potrebno provjeriti – izračunati vrijednost glavnih napona u izabranim horizontalnim presjecima, za sve promatrane varijante opterećenja.

Naponi klizanja i horizontalni normalni naponi

Horizontalni normalni naponi, σ_H , računaju se prema pretpostavci o linearnoj promjeni normalnih napona između uzvodnog i nizvodnog lica brane. Naponi na uzvodnom i nizvodnom licu (normalni $\sigma_{H,G}$ i $\sigma_{H,D}$, i smičući τ_G i τ_D) računaju se iz uvjeta ravnoteže horizontalnih i vertikalnih sila za infinitezimalnu prizmu na licu brane. Na nizvodnoj granici, "D", biti će (sl.3.28):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{H,D} ds \cos \alpha = \tau_D ds \sin \alpha + p ds \cos \alpha \\ \sigma_{V,D} ds \sin \alpha = \tau_D ds \cos \alpha + p ds \sin \alpha \end{array} \right\}, \quad (3.32)$$

odakle je napon klizanja na nizvodnoj konturi:

$$\tau_D = (\sigma_{V,D} - p) \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.33)$$

a horizontalni normalni napon na nizvodnoj konturi:

$$\sigma_{H,D} = p + \tau \operatorname{tg} \alpha = p(1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + \sigma_{V,D} \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (3.34)$$

Slika 3.28 Određivanje napona na granici

Ako nema donje vode izostatiti će hidrostatički tlak, p . Slično se računaju i naponi na uzvodnom licu, pri čemu " p " obuhvaća sve utjecaje koji djeluju na uzvodnoj konturi (pritisak nanosa, seizmički pritisak vode i dr.), a ne samo hidrostatički tlak.

Dijagram klizajućih napona, τ , dobiva se iz ravnoteže horizontalnih sila, uz pretpostavku o paraboličnom rasporedu τ -napona, i za poznate vrijednosti na uzvodnom i nizvodnom licu (τ_G, τ_D).

Glavni naponi i granične čvrstoće

Najčešće su kritični glavni normalni naponi na uzvodnom i nizvodnom licu presjeka, pa je za grublju analizu (nižu fazu projektiranja) dovoljno provjeriti samo ove napone (Smith 1995). Ravnine glavnih normalnih napona na licu brane su sama ravan konture (lice brane), jer tu nema klizanja, i ravan upravna na nju, jer su glavni naponi međusobno upravni (kao i njihove ravnine).

Na slici 3.29 prikazane su ravnine glavnih normalnih napona, i sami naponi za slučaj nizvodnog lica. Glavni normalni napon za ravninu konture je hidrostatički pritisak, $\sigma_{2,D} = p$.

Iz uvjeta ravnoteže vertikalnih sila za zasjenčanu infinitezimalnu prizmu (sl.3.29) dobiva se drugi glavni napon, σ_1 . (sila težine se zanemaruje kao beskonačno mala veličina višeg reda, a na površinama gdje djeluju glavni normalni naponi, napona klizanja, po definiciji, nema). Izvedeni su samo izrazi za glavne normalne napone na nizvodnom licu, dok se naponi na uzvodnom licu dobivaju istim postupkom:

Slika 3.29 Glavni normalni naponi na nizvodnom licu brane

$$(\sigma_{1,D} ds \cos \alpha) \cos \alpha = \sigma_{V,D} ds - (p ds \sin \alpha) \sin \alpha, \quad (3.35) \quad \text{odnosno:}$$

$$\sigma_{1,D} = \frac{\sigma_{V,D}}{\cos^2 \alpha} - p \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (3.36)$$

a) Ako je kota nivoa vode ispod promatranog presjeka, nema hidrostatskog pritiska ($p=0$), pa je:

$$\sigma_{1,D} = \frac{\sigma_{V,D}}{\cos^2 \alpha}$$

b) Za slučaj vertikalnog uzvodnog lica ($\alpha = 0^\circ$) dobiva se:

$$\sigma_{1,D} = \sigma_{V,D}$$

Dozvoljeni naponi za beton i sredinu u kojoj je temeljna konstrukcija određuju se na osnovu graničnih čvrstoća na pritisak. Za procjenu dozvoljenog napona pritiska može se, pri normalnom opterećenju, uzeti 20% čvrstoće betona na pritisak ($3 \approx 6$ Mpa, ovisno o marki), dok se izvanrednom ili izuzetnom opterećenju može dopustiti i veći napon, pogotovu na rubovima presjeka. Za stijenu se obično uzima 5 -10 čvrstoće monolita na pritisak, podijeljeno s faktorom sigurnosti od 1.5 - 3.5, ovisno o kombinaciji opterećenja. (Orijentacijske vrijednosti dozvoljenih napona pritiska za pojedine vrste sredina prikazane u tablici 3.2)

Tip sredine	Dozvoljeni napon pritiska (Mpa)
zdravi granit	4 - 6
zdravi krečnjak	3 - 4
zdravi pješčenjak	2 - 3
raspadnuta stijena	1 - 1,5
šljunak	0,3 - 0,6
pijesak	0,2 - 0,4
tvrda glina	0,2 - 0,4
meka glina	0,05 - 0,1

Tablica 3.2 Orijentacijske vrijednosti dozvoljenih napona pritiska

Vrijednosti iz tablice 3.2 treba shvatiti kao polazne vrijednosti, i koristiti samo za niže faze projektiranja, dok se točna vrijednost mora odrediti istražnim radovima na terenu. Vrijednosti glavnih napona obvezno treba provjeriti pri opterećenju koje izaziva najveće pritiske u brani i temelju, a to je slučaj kada nema uzgona. Ovakvo opterećenje može nastati u periodu neposredno poslije punjenja akumulacije (prije nego što se uzgon razvije kroz pore), ili ako mjere za sprječavanje uzgona djeluju besprijekorno.

Uspoređivanje valjanosti različitih geometrijskih oblika za poprečni presjek gravitacijske brane (Smith 1995). Za četiri promatrana oblika presjeka brane (sl.3.31), a pri istim uvjetima opterećenja (hidrostatički tlak, uzgon reduciran na polovinu punog uzgona, i težina brane, sl.3.30), usporedit će se:

- 1) naponi zatezanja na uzvodnom licu
- 2) stabilnost protiv klizanja.

1) Širina temeljne spojnice, b , računa se iz uvjeta da se na uzvodnom licu ne javi zatezanje ($\sigma_{v,G} = 0$, sl.3.26c) odnosno da rezultanta, R , djeluje u nizvodnom rubu jezgre "d" (sl.3.30) pa je moment okretanja oko točke "d", $M_d = 0$. Za ovako dobivenu širinu izračuna se površina poprečnog presjeka, A (volumen po jedinici dužine), koja određuje cijenu brane.

Slika 3.30 Opterećenje presjeka

2) Za presjek određen prvim uvjetom računa se odnos vertikalnih i horizontalnih sila, V/H , kao pokazatelj stabilnosti protiv klizanja.

Slika 3.31 Promatrani oblici poprečnog presjeka

Pretpostavlja se da $\gamma_B = 2.4\gamma_W$, a sve sile su izražene po jedinici težine, i na jedan metar dužni.

a) Pravokutni presjek:

$$H = P_G = \frac{h^2}{2}, U = \frac{1}{2} \frac{bh}{2}, G = 2.4bh,$$

$$\sum M_d = 0 \Rightarrow \frac{h^2}{2} \frac{h}{3} + \frac{1}{2} \frac{bh}{2} \frac{b}{3} = 2.4bh \frac{b}{6} \Rightarrow b = 0.725h,$$

$$A = bh = 0.725h^2 \quad i \quad \frac{V}{H} = \frac{G-U}{H} = 3.12$$

b) Pravokutni trokut s vertikalnim uzvodnim licem:

$$H = \frac{h^2}{2}, U = \frac{1}{2} \frac{bh}{2}, G = 2.4 \frac{bh}{2},$$

$$\sum M_d = 0 \Rightarrow \frac{h^2}{2} \frac{h}{3} + \frac{1}{2} \frac{bh}{2} \frac{b}{3} = 2.4 \frac{bh}{2} \frac{b}{3} \Rightarrow b = 0.725h,$$

$$A = 0.363h^2 \quad i \quad \frac{V}{H} = 1.38$$

c) Jednakokrani trokut s kosim uzvodnim i nizvodnim licem:

$$G = 2.4 \frac{bh}{2}, F_G = \frac{bh}{4}$$

$$\sum M_d = 0 \Rightarrow \frac{h^2}{2} \frac{h}{3} + \frac{bh}{4} \frac{b}{3} = 2.4 \frac{bh}{2} \frac{b}{6} + \frac{bh}{4} \frac{b}{2} \Rightarrow b = 0.83h,$$

$$A = 0.415h^2 \quad i \quad \frac{V}{H} = 1.99$$

d) Pravokutni trokut s vertikalnim nizvodnim licem:

$$b = 1.41h, \quad A = 0.707h^2, \quad \frac{V}{H} = 4.10.$$

Pravokutni presjek je najnepovoljniji obzirom na uvjet napona zatezanja, jer zahtjeva najveću površinu, tj. volumen, što znači da je najskuplji. Nešto jeftiniji je trokutni presjek d) s vertikalnim nizvodnim licem, koji međutim, ima najpovoljniji odnos $V/H = 4.10$, najbolje se suprotstavlja smicanju.

Najnepovoljniji presjek s gledišta napona zatezanja je pravokutni trokut b) s vertikalnim uzvodnim licem te se upravo ovaj presjek najčešće primjenjuje kod gravitacijskih brana. S druge strane, pokazatelj stabilnosti na klizanje (odnos $V/H = 1.38$) je mali, pa se kod tla slabe klizajuće čvrstoće primjenjuju dodatne mjere za povećanje stabilnosti, ili se usvaja drugi presjek ili tip brane.

Kod trokutnog presjeka d) s vertikalnim nizvodnim licem, sila težine brane ne daje moment oko ruba jezgre "d", pa se brana može "olakšati" (ošupljiti), što se primjenjuje kod olakšanih gravitacijskih brana.

3.3 Postupak pri projektiranju gravitacijske brane

Za promatrano mjesto pregradnog profila, i promatranu visinu brane analiziraju se moguća opterećenja. Zatim se iz uvjeta opće stabilnosti izračunaju i provjere dimenzije poprečnog presjeka barane (nagib uzvodnog i nizvodnog lica, oblik krune brane, veličina i položaj zuba i galerije i sl.) na kraju se ovisno o fazi projekta, vrši proračun otpornosti i dimenzioniranja, računaju pomjeranja, određuju uvjeti gradnje, rade crteži, premjer, predračun radova i tehnički izvještaj.

3.3.1 Određivanje nagiba nizvodnog lica brane

Obično se koriste dva načina za određivanje nagiba nizvodnog lica brane (odnosno određivanje širine presjeka ovisno o visini presjeka):

a) postepeno dimenzioniranje (Multy – step design), gdje se nagib brane (odnosno širina presjeka) mijenja ovisno o visini presjeka iznad temelja (sl.3.32). Idući od krune brane k temelju, iz uvjeta dimenzioniranja računaju se širine presjeka na međusobnoj udaljenosti od $1/3$ do $1/10$ visine brane .

b) Izravno dimenzioniranje (Single-step design) gdje se usvaja konstantan nagib nizvodnog lica brane (po cijeloj visini brane).

Nagib lica, odnosno širina u osnovi, b , (sl.3.33) može se odrediti iz uvjeta stabilnosti osnovnog trokuta "AGD" pri najnepovoljnijoj kombinaciji opterećenja (najčešće se uzima III-ća kombinacija tj. izuzetno opterećenje od vode). Traži se nagib za koji su zadovoljeni uvjeti stabilnosti, pri kome nema napona zatezanja, a glavni naponi pritiska su u dozvoljenim granicama. Vrh trokuta, "A", obično je u presjeku nizvodnog lica brane i razine vode pri koti maksimalnog uspora, Z_{MU} .

Zatim se osnovni trokut (AGD) dopuni u kompletan profil brane (doda se kruna, galerije, uzvodni zub i sl.), pa se za mjerodavne kombinacije opterećenja provjeri opća stabilnost, naponsko stanje u izabranim presjecima te se načine ostali proračuni, ovisno o nivou projekta.

Iako je površina presjeka dobivenog postepenim dimenzioniranjem manja (veća je ušteda u materijalu), prednost izravnog dimenzioniranja je lakše izvođenje konstrukcije, pa se ovaj postupak češće primjenjuje, posebno kod nižih objekata.

Slika 3.33 Izravno dimenzioniranje

3.3.2 Kruna brane

Pravokutna (sandučasta) kruna (sl.3.34) omogućava promet duž brane. Širina krune je obično 0.05-0.20 od visine brane (dodatna širina se može osigurati armirano-betonskim pločama na konzolnim nosačima).

Slika 3.34 Kruna gravitacijske brane

Pravokutna kruna i trokutno tijelo brane povezuju se kružnom prelaznicom na nizvodnom licu (sl.3.34a), što omogućava povoljnije naponsko stanje na mjestu prelaska, posebno pri utjecaju potresa.

Kota krune brane, Z_{KB} , (sl.3.34a) podignuta je iznad nivoa maksimalnog uspora, Z_{MU} , za visinu (zazora) slobodne visine brane (freeboard-a, $f=r+h_P$ gdje je h_P = visina penjanja vala (sl.3.17), a r = rezerva (obično je $r = 0.5-1.0$ m). Valobran, u vidu zaobljene konzole na kruni služi da skrene val. Umjesto da se kruna brane nadvisi za pun zazor,

$f=r+h_P$, iznad maksimalnog uspora često se pravi armirano-betonski parapetni zid (visine $h_Z \approx 1\text{m}$), što omogućava da se kruna spusti za visinu zida (sl.3.35). Ponekad je visina uzdužnog nosača mosta, h_M , na preljevnom dijelu brane (sl.3.34 b), veća od visine penjanja vala, h_P , pa je mjerodavan uvjet za visinu krune: $Z_{KB} = Z_{MU}+r+h_M$.

3.3.3 Uzvodna kosina

U slučaju da se stabilnost ne može efikasno postići zakošenjem nizvodnog lica, pribjegava se blagom zakošenju uzvodnog lica, čime se, kao stabilizirajuća sila, uvodi i vertikalna komponenta hidrostatičke sile na uzvodnom licu. Uzvodni nagibi su obično mali (10:1, 20:1) i dodaju se u donjoj zoni brane (sl.3.36).

Slika 3.36 Zakošenje uzvodnog lica

(Odgovarajućim uzvodnim zakošenjem izbjegavaju se negativni naponi koji mogu nastati na uzvodnom licu u slučaju prazne akumulacije, a koje stvara moment od sandučastog presjeka krune brane)

3.4 Pravila konstrukcije

Određivanje osnovnih dimenzija prvi je korak u projektiranju brane. Dalje treba posvetiti pažnju detaljima kako bi se osigurali uvjeti pod kojima je načinjen proračun (i odabrane dimenzije brane), a vodeći računa da gradnja bude što jednostavnija. Detalji za izvođenje i uvjeti građenja daju se u posebnom dijelu glavnog projekta. Pod pojmom pravila konstrukcije podrazumijevaju se postupci pri projektiranju i izvođenju kojima se osiguravaju spomenuti uvjeti, i kojima se otklanjaju ili ublažavaju negativni utjecaji određenih činitelja na branu. Za slučaj betonske gravitacijske brane, kao negativni činitelji razmatrat će se:

- 1) Utjecaj temperature
- 2) Uzgon u temeljnoj spojnici i u tijelu brane
- 3) Naponi u temeljnoj spojnici prouzrokovani nejednakim uvjetima slijeganja.

3.4.1 Utjecaj temperature

Zbog nejednakog širenja/skupljanja pojedinih dijelova betonske mase u brani se javljaju naponi zatezanja koji izazivaju stvaranje pukotina. Pukotine se vremenom šire, slabe otpornost brane na smicanje, i omogućavaju procjeđivanje vode i stvaranje uzgona.

Temperaturni naponi nastaju:

- a) Uslijed zagrijavanja i hlađenja objekta pri promjeni vanjske temperature (meteorološki čimbenici). Ovi utjecaji se ublažavaju gradnjom u lamelama.
- b) Uslijed oslobađanja velike količine topline pri vezivanju betona, na što se može utjecati na više načina:
 - 1) Treba koristiti sporovezujuće cemente kod kojih se proces vezivanja (i oslobađanja topline) odvija sporije.
 - 2) Praviti beton s manjom količinom cementa (a da se ne ugrozi nosivost i vododrživost betona).
 - 3) Omogućiti hlađenje betona poslije ugrađivanja i/ili sniziti temperaturu betonske mješavine upotrebom hladne vode za spravljanje betona. Također, agregat za beton ne bi smio biti izložen suncu, a ponekad se hladi dodavanjem leda.
 - 4) Betoniranje ne smije biti kontinuirano, jer se u velikoj masi betona vanjski slojevi hlade znatno brže od unutrašnjih, što izaziva zatezanje i puknuća. Moraju se praviti prekidi betoniranja-radne razdjelnice kako bi se svježje betonirani blok prilikom vezivanja ravnomjerno hladio i skupljao, bez većih puknuća. U izvođačkoj praksi koristi se nekoliko načina raspoređivanja blokova unutar lamele: dugi, kosi, stubasti blokovi (sl.3.37). Najčešće je dužina bloka jednaka dužini lamele, širina ovisi o načinu betoniranja (obično do 25 m), a visina je između 0.5 i 3 m. Betonirani blok se ostavlja "slobodan" da se hladi najmanje 3 dana.

Slika 3.37 Razdjelnice kod gravitacijske brane

Obvezno je radne razdjelnice (spojnice) između blokova (mjesto na kojima se nastavlja betoniranje) pripremiti za nanošenje narednog sloja, tako što će se osigurati dobro prijanjanje novog i starog bloka. Obično se površina starog bloka "haba" i čisti oštrim pijeskom koji se velikom brzinom izbacuje iz "pištolja" (pjeskarenje), a prije betoniranja se

na površinu starog bloka polaže sloj cementnog maltera od oko 2 cm debljine, čime se sprečava segregacija novog betona na mjestu spojnice (tzv. spužvasta mjesta). Otvori radnih razdjelnica se injektiraju, za razliku od otvora konstruktivnih-dilatacijskih razdjelnica između lamela, koje trajno ostaju fleksibilne.

Kod nekih shema betoniranja horizontalne radne razdjelnice ne leže u istoj ravnini, već formiraju izlomljene (zupčaste) površine (stubasti blokovi na pr. sl.3.37b), čime se postiže veća otpornost na klizanje u slučaju da se pukotina javi u razdjelnici (gdje će se najprije i javiti, jer je to najslabije mjesto u "okolini"). Gravitacijske brane, kako je već rečeno, grade se u lamelama (sl.3.37c). Lamele omogućavaju "disanje" betona po širini i po dubini, jer zazor (otvor) između lamela - dilatacijska (konstruktivna) razdjelnica omogućava rasterećenje termičkog napona i sprječavanje nastanka pukotina. Izbjegavaju se i puknuća uslijed nejednakog slijeganja, koje može nastati kao rezultat topografskih i /ili geomehaničkih uvjeta.

Beton za branu mora osigurati dovoljnu čvrstoću, otpornost na mraz i potrebnu vododrživost, a da s druge strane ima nisku toplinu hidratacije i nisku cijenu koštanja. Kod većih brana se često koristi zoniranje, pa se na višim kotama, gdje je potrebna čvrstoća betona, stavlja manje cementa, nego u nižim zonama. Uzvodno i nizvodno lice se "oblažu" betonom veće čvrstoće, s više cementa i, po potrebi, uz aditive kojima se popravljaju otpornost na mraz, a za prelivne površine i otpornost na udar i habanje. Ako je voda agresivna na beton, neophodno je sve površine koje mogu biti izložene dodiru s vodom odgovarajuće zaštititi.

3.4.2 Uzgon i injektiranje temelja

U temeljnoj spojnici uzgon se može smanjiti vertikalnom zavjesom na uzvodnom licu (injekcijskom zavjesom, dijafragmom ili pribojem i drenažom). Ponekad se koriste i horizontalne zavjese uzvodno od brane za produžetak puta vode. Uz smanjenje uzgona zavjese osiguravaju i vododrživost akumulacije na profilu brane.

Dubina injekcijske zavjese i raspored bušotina određuje se na osnovu geoloških istražnih radova (USBR 1987, Creager 1961). Ako se ne raspolaže terenskim podacima, može se za najniži nivo projektiranja usvojiti da dubina zavjese bude jednaka visini brane, a da se injekcijsku bušotine postave na rastojanju od 2 do 3 m. Injekcijsku zavjesu, po

pravilu, treba izvesti i u bokovima profila brane (sl.3.13) kako bi se smanjilo proviranje vode iz akumulacije. Treba osigurati da injekcijske bušotine sijeku ispucale slojeve u temelju kako bi im što bolje predale injekcijsku masu, a ne da se masa gubi duž pukotina (sl.3.38, Pećinar 1960).

Slika 3.38 Postavljanje injekcijskih bušotina u odnosu na slojevitost

Prema namjeni injektiranje može biti:

- 1) Zaptivno - za zaptivanje i smanjenje proviranja i uzgona.
- 2) Konsolidacijsko - za povećanje nosivosti tla.
- 3) Vezno (kontaktno) – za povezivanje konstrukcije s okolnim (stjenovitim) tlom, i sprečavanje ispiranja materijala na kontaktu brana-tlo. Vezano injektiranje treba obvezno primjenjivati kod svih hidrotehničkih objekata koji se vezuju za stijenu (brane, tuneli, podzemni hodnici i sl., sl.3.13)

Stjenoviti materijal obično se drenira mrežom vertikalnih (ponekad i kosih) bušotina. Za prvu procjenu mogu se usvojiti bušotine promjera $d = 10 - 20$ cm, na razmaku od 3 - 5 m, dubine od $1/4 - 1/2$ visine brane (Creager 1961). Bušotine se ulijevaju u drenažnu galeriju otkuda se gravitacijom ili pumpanjem filtrirana voda odvodi van tijela brane, najčešće u donju vodu. Drenažna galerija može se koristiti i za promatranje (inspekciju). Površina poprečnog presjeka galerije mora biti dovoljna da omogući nesmetan pristup, ventilaciju i osvjtljenje (otvor ne bi trebao biti manji od 2×1.5 m).

3.4.3 Smanjenje uzgona u tijelu brane

Uzgon u tijelu brane smanjuje se, kao i kod temelja, uzvodnim zaptivanjem, i dreniranjem. Zaptivanje (smanjenje vodopropusnosti) u tijelu gravitacijske betonske brane može se postići na više načina:

- 1) Ugrađivanjem betona manje vodopropusnosti na uzvodnom dijelu presjeka brane stvara povoljnu sliku uzgona (sl.3.12c).
- 2) Bitumenski premaz ili postavljanje vodonepropusnih folija na uzvodnom licu daje sličan efekt.

3) Odgovarajućom njegom betona sprječava se pojava pukotina kroz koje voda dopijeva u branu i stvara uzgon.

4) Zaptivanju pomaže i mutna voda, koja sa sobom donosi čestice lebdećeg nanosa kojim se popunjavaju puknuća u brani.

Zaptivne mjere mogu biti nedovoljne pa se ponekad primjenjuje i dreniranje. Za drenažu se obično koriste perforirane betonske cijevi, postavljene u vertikalne otvore u tijelu brane (sl.3.39b), i raspoređene tako da prihvate što više filtracijske vode.

Treba predvidjeti mogućnost zamjene cijevi i pročišćavanja, jer može doći začepljenja uzrokovanog kalcifikacijom.

Voda se iz cijevi odvodi horizontalnim galerijama u tijelu brane.

Slika 3.39 Drenaža za smanjenje uzgona u tijelu brane

3.4.4 Naponi u temeljnim spojnicaama zbog nejednakog slijeganja

Vertikalne dilatacijske razdjelnice omogućavaju samostalan rad svake od lamela, pa se time omogućava i nejednako slijeganje istih, i eliminiraju naponi i pukotine koje mogu nastati zbog različitih geomehaničkih svojstava (modula deformabilnosti) stijene, ili naglog diskontinuiteta u topografiji doline (sl.3.40)

Slika 3.40 Lamele gravitacijske brane

Ako se iz nekog razloga razdjelnice moraju injektirati (tzv. gravitacijske betonske brane s injektiranim razdjelnicama), izostaje "sloboda" pomicanja lamela, pa brana radi (i računa se) kao jedinstvena prostorna konstrukcija.

3.4.5 Priprema temelja

Priprema temelja je izuzetno značajan i osjetljiv posao pri izradi svake brane. Tri najznačajnija uvjeta kod pripreme temelja su:

1. uvjet - osigurati maksimalnu nosivost tla

a) Na stjenovitom tlu treba ukloniti površinski sloj zemlje i nanosa i drobinu (raspadnutu stijenu), da bi se brana fundirala na čvrstoj stijeni. Ako je stijena ispucala na većoj dubini,

pa se uklanjanje ne isplati, temelj se ojačava konsolidacijskim injektiranjem. Obično su konsolidacijske injekcijske bušotine duboke do 5 m (znatno pliće nego zaptivne).

b) Kod nevezanog tla nosivost se daleko teže popravlja . Opterećenje se može šipovima prenijeti dublje do nosivog sloja (rijetko se primjenjuje, i to samo kod nižih objekata). Pri radu sa šipovima treba koristiti posebnu tehnologiju jer naknadno slijeganje tla na dodiru s branom (sl.3.41) može otvoriti put vodi, što dovodi do katastrofe zbog unutrašnje erozije temelja (kontaktnog ispiranja). Obično se na glavu šipa postavlja deformabilna metalna "kapa" čija deformacija prati slijeganje tla, pa brana ostaje u kontaktu s temeljom.

Slika 3.41 Mogući put proviranja kod temelja na šipovima

2. uvjet - osigurati maksimalnu otpornost na smicanje – otpornost na smicanje može se postići na više načina:

- 1) Kod stjenovitih temelja površina se ostavi hrapavom i "nazupčanom" poslije miniranja, što povećava koeficijent trenja (miniranjem se skida drobina).
- 2) Izradom uzvodnog zuba, ili dubljim fundiranjem uzvodnog dijela temelja (sl.3.27), čime se ravnina smicanja pomjera na veću dubinu.
- 3) Smanjenjem uzgona.
- 4) Fundiranjem na šipovima kod nevezanog tla (rijetko se primjenjuje).

3. uvjet - osigurati filtracijsku stabilnost tla

Neophodno je spriječiti unutrašnju eroziju tla temelja (detaljnije u poglavlju o nasutim branama).

3.5 Planiranje i faze izvođenja brane

Pri izgradnji velikih i složenih objekata, kao što su brane, neophodno je detaljno isplanirati svaku fazu gradnje i svih pomoćnih i pripremnih radova i aktivnosti. Najvažnije faze su:

1. Izgradnji prethodi projektiranje s istražnim radovima
2. U prvoj fazi gradnje potrebno je uraditi pristupni put i pripremiti gradilište.

3. U drugoj fazi se obavljaju radovi na skretanju rijeke, a paralelno se započinju radovi na objektima i dijelovima objekata koji su iznad razine vode u rijeci. Dno buduće akumulacije se čisti od vegetacije, kako bi se izbjegla eutrofikacija jezera.
4. Kada je rijeka skrenuta, pripremaju se temelji i osigurava temeljna jama. Osigurava se sanitarna zaštita akumulacije.
5. Slijedi betoniranje brane i ostalih objekata (preljeva, umirujućeg bazena, zahvata i dr.), izrada injekcijska zavjese i sl..
6. U posljednjoj fazi završava se montaža opreme, i puni akumulacija.

4. Nasute brane

Nasute brane i nasipi spadaju u najrasprostranjenije hidrotehničke građevine. Grade se kontroliranim nasipanjem i zbijanjem dostupnog materijala, a vanjskim silama se odupiru vlastitom težinom. Velika prednost nasutih brana u odnosu na betonske je što prenose opterećenje na tlo preko znatno veće površine, čime se znatno smanjuju naponi u tlu.

Često su nasute brane jedino rješenje za slabo nosivo tlo. Uz to, nasute brane su i manje osjetljive na slijeganje temelja od betonskih brana. Grade se od lako dostupnih materijala, uz potpuno mehanizirano ugrađivanje pa su i troškovi po jedinici volumena brane značajno niži u odnosu na betonske brane. S druge strane, volumen nasute brane veći je od volumena alternativne betonske brane (volumen zemljane brane je desetak puta veći, a kamene 4 do 5 puta veći od volumena odgovarajuće gravitacijske betonske brane). Najveća mana nasutih brana je velika osjetljivost na eroziju vodom.

Osnovna podjela nasutih brana je na:

- 1) zemljane brane i
- 2) brane od kamena (kamenog nasipa)

Nasute brane su se najviše gradile, ali i najčešće rušile. Tri najčešća uzroka rušenja su:

- 1) prelijevanje, praćeno vanjskom erozijom
- 2) ispiranje materijala nasipa – unutrašnja erozija

3) klizanje kosina

Prilikom projektiranja, izgradnje i održavanja nasutih brana moraju se primijeniti sve raspoložive mjere i postupci za otklanjanje navedenih uzroka.

4.1. Prelijevanje i površinska erozija

Nikakve mjere, ni "konstruktivna pravila" ne mogu pomoći u slučaju prelijevanja brane. Ukoliko je prelijevanje dovoljno dugotrajno, dolazi do erozije i negativne posljedice su neizbježne. Jedino preostaje mogućnost sprečavanja prelijevanja, a to se može postići:

- 1) Ispravnom procjenom mjerodavnog vala velike vode – vala od kojeg se objekt brani, i prema kojem se dimenzioniraju evakuacijski organi
- 2) Pravilnim izborom, dimenzioniranjem, izradom i održavanjem evakuacijskih organa

Najvažnije postavke za izbor mjerodavnog vala i dimenzioniranje evakuacijskih organa:

- 1) ako je područje nizvodno od nasute brane naseljeno, obavezno treba dimenzionirati evakuacijske organe na maksimalnu veliku vodu (skraćenica MPF = Maximum probable flood). Ako je nizvodno područje nenaseljeno pa val izazvan rušenjem brane ne može ugroziti ljudske živote, obično se za mjerodavan val usvaja 10 000 – godišnja velika voda, ili 1000 – godišnja voda, ako ekonomska analiza to opravdava. U svakom slučaju dobro je da se zazor između maksimalnog nivoa vode i krune brane ostavi dovoljno širokim i da se na kruni podigne parapetni zid (sličan valobranu kod betonskih gravitacijskih brana)
- 2) zbog mogućnosti havarije ustava i uređaja za rukovanje ustavama, projektanti uglavnom izbjegavaju preljeve s ustavama (kontrolirane preljeve) kod nasutih brana te se opredjeljuju za slobodne preljeve bez ustava. Ako se ustave koriste moraju imati više alternativnih pogona, mada ni to ne jamči da će uvijek biti u operativnom stanju. Projektiranje dubinskih ispusta za evakuaciju velikih voda izuzetno je rizično rješenje te se za visoke nasute brana ne preporučuje ni u kojem slučaju.

4.2 Unutrašnja erozija

Unutrašnja erozija je osobito opasna kod zemljanih brana. Nastaje odnošenjem čestica nevezanog materijala koje se ne mogu oduprijeti hidrodinamičkoj sili filtracijske vode (unutrašnja erozija može nastati i kod vezanog materijala ako postoji mogućnost da kohezijske sile oslabe, zbog nepovoljnih kemijskih reakcija). Unutrašnja erozija obično se dijeli na:

- 1) Ispiranje (sufozija)
- 2) Podizanje (fluidizacija)

4.2.1 Ispiranje-sufozija

Filtracijska voda odnosi čestice (tla, nasipa) koje nemaju oslonac iza sebe, a svojom težinom se ne mogu oduprijeti sili toka. Ova pojava se naziva ispiranje-sufozija. Može biti isprana čestica na nizvodnom licu, iza koje nema čestica da je podupru (čestice A,B, i C na sl.4.1), ili čestica iz unutrašnjosti nasipa (čestica D) koja je suviše sitna da bi je okolne krupnije čestice mogle zadržati (tj. može se provući kroz prostor - pore između susjednih čestica). Ovaj drugi oblik ispiranja redovito se javlja na izravnom kontaktu sitnozrnog i krupnozrnog materijala-tzv.sufozija na kontaktu (naravno ukoliko je smjer filtracije prema krupnozrnog sloju).

Slika 4.1 Sufozija kroz nasip brane

Na slici 4.2 pretpostavljeno je da su čestice sferičnog oblika, pa sitnija čestica promjera $d=2r$ može se osloniti na susjedne krupnije čestice promjera $D = 2R$ samo ako je $D \leq 6.45 d$. U protivnom će sitnija čestica biti isprana.

Slika 4.2 Ispiranje sferičnih čestica

Ispiranje jedne frakcije čestica iz brane ili temelja ne mora uvijek biti opasno. Sitnije čestice mogu biti isprane iz heterogene mješavine bez narušavanja stabilnosti objekta ako preostale čestice nisu ugrožene rezultirajućim povećanjem brzine filtracije vode, i ako čestice naliježu jedne na drugu. U ovakvom slučaju, prvobitno mutna filtracijska voda, izbistrit će se kad sve sitne čestice budu isprane. Naprotiv, povećanje mutnoće i

filtracijskog protoka, znači da je erozija dobila na intenzitetu (da se ispire sve veći broj čestica), pa će, ako se nešto ne poduzme, doći će do potpunog ispiranja tla, i rušenja objekta.

Hidrodinamička sila kojom voda djeluje na čestice tla razmjerna je brzini filtracije, u , a ona (prema Darcy-evom zakonu) ovisi o gradijentu filtracije, I i koeficijentu filtracije, K . Gradijent filtracije, I , predstavlja pad pijezometarske linije duž filtracijskog puta, a u praksi se često aproksimira kao količnik pijezometarske razlike, $h = -\Delta\Pi$, i duljine filtracijskog puta, $L = \Delta l$, na kome se razlika h ostvari:

$$u = KI = K \left(-\frac{d\Pi}{dl} \right) \approx K \frac{-\Delta\Pi}{\Delta l} = K \frac{h}{L} \quad (4.1)$$

(Znak "-" ispred izvoda označava da pijezometarska linija, $\Pi(l)$, opada u smjeru tečenja).

Opasnost da čestica određene krupnoće bude isprana (zbog djelovanja hidrodinamičke sile) raste s povećanjem gradijenta, I , i porastom koeficijenta filtracije, K (prema jednadžbi 4.1). gradijent pri kome dolazi do sufozije promatranog tla naziva se kritični gradijent filtracije na sufoziju, I_{KR}^S . Kritični gradijent se određuje laboratorijski, a orijentacijske vrijednosti (kao i orijentacijske vrijednosti koeficijenta filtracije) prema američkom istraživaču Leinu dane su u tablici 4.1.

Materijal	$I_{KR}^S = h/L$	K (m/s)
1. sitni pijesak	1/8,5	10^{-3} - 10^{-4}
2. srednji pijesak	1/6,0	10^{-2} - 10^{-3}
3. srednji šljunak	1/3,5	10^{-1} - 10^{-2}
4. oblutci	1/2,5	$>10^{-1}$
5. meka glina	1/3,0	10^{-6} - 10^{-8}
6. tvrda glina	1/8,0	$<10^{-8}$

Tablica 4.1 Orijentacijske vrijednosti kritičnog gradijenta ispiranja (sufozije) i koeficijenta filtracije

Ukoliko je na nizvodnom dijelu brane predviđen dren s filtarskom zaštitom, navedene vrijednosti kritičnog gradijenta se mogu povećati za oko 20%. Opasnost od sufozije određenog tla opada povećanjem zbijenosti (smanjenjem poroznosti), jer se smanjuju otvori kroz koje se mogu provući sitnije čestice.

Uz to, sitniji otvori stvaraju veće gubitke energije, što smanjuje brzinu, a time i hidrodinamičku silu filtracijskog toka. (Ako se uspoređuju dva tla istog sastava, ali različite zbijenosti, kritični gradijent će biti veći kod zbijenog tla, dok će koeficijent filtracije biti manji).

Zbijanje po pravilu, nije dovoljno, pa se ugroženi materijal nasipa redovito štiti filtrima. Filtar onemogućava ispiranje sitnih čestica kroz pore krupnih čestica u susjednoj zoni-sloju (sufozija na kontaktu). Filtar čine slojevi različite krupnoće zrna. Krupnoća zrna raste idući u smjeru toka vode, tako da materijal iz prethodnog (uzvodnog) sloja ne može biti ispran kroz naredni (nizvodni).

Najuzvodniji sloj filtra (od najsitnijeg zrna) osigurava neposrednu potporu za materijal koji se štiti (sl.4.3), slijedeći sloj štiti prethodni, i tako redom do filtracijskog stabilnog sloja, gdje je ugrađen materijal kojem krupnoća osigurava stabilnost (za promatrane uvjete tečenja $l=h/k < I_{KR}^S$).

Slika 4.3 Princip filtarske zaštite

4.2.2 Fluidizacija - podizanje

Fluidizacija (podizanje, "tečenje") tla nastaje kada hidrodinamička sila vode koja provire naviše postane veća od težine tla. Tlo u potpunosti gubi nosivost- dolazi do sloma tla.

Slika 4.4 Fluidizacija tla

Nastanak fluidizacije prikazan je na slici 4.4. Na slici 4.4a je eksperimentalna aparatura za procjenu kritičnog gradijenta filtracije na fluidizaciju, I_{KR}^F , dok slika 4.4b prikazuje fluidizaciju tla nizvodno od priboja. Debljina uzorka, t , (slika 4.4a) odnosno dubina priboja (t , na sl.4.4b) predstavlja filtracijski put vode kroz tlo između presjeka "1" i "2" ($t \equiv L$, iz jednadžbe 4.1). Pijezometarska razlika, h , između presjeka omogućava vodi

svladavanje otpora tečenju duž filtracijskog puta, t , a ujedno stvara i hidrodinamičku silu koja će, ako postane dovoljno velika, pokrenuti – podići čestice tla. Vrijednost pijeziometarske razlike pri kojoj počinje fluidizacija je kritična razlika, $h=h_{KR}$, a odgovarajuća vrijednost gradijenta je kritični gradijent na fluidizaciju, I_{KR}^F .

Kritična pijeziometarska razlika, i kritični gradijent na fluidizaciju se određuje iz uvjeta ravnoteže sila koje djeluju na masu tla i vode uzorka unutar volumena između presjeka "1" i "2" u trenutku podizanja tla ($h=h_{KR}$). Kada hidrodinamička sila pokrene čestice tla, ove više neće nalijegati na rešetku na koju je uzorak (bio) oslonjen (sl.4.4a), pa će izostati i reakcija kojom rešetka djeluje na uzorak. Zato će pri fluidizaciji na masu uzorka između presjeka "1" i "2" djelovati samo sila težine i sila pritiska vode:

$$A\gamma_W H_2 + A\gamma_Z t = A\gamma_W (h_{KR} + H_2 + t), \quad (4.2) \quad \text{odakle je:}$$

$$(\gamma_Z - \gamma_W)t = \gamma_W h_{KR}, \quad (4.3)$$

gdje je: γ_Z = volumna težina tla u zasićenom stanju, a A =površina poprečnog presjeka kroz koji filtrira voda. Prema jednadžbi (4.3) fluidizacija (podizanje čestica tla) nastaje ako je:

$$h \geq h_{KR} = \frac{\gamma_Z - \gamma_W}{\gamma_W} t, \quad (4.4)$$

odnosno ako je dostignut kritični gradijent na fluidizaciju:

$$I \geq I_{KR}^F = \frac{h_{KR}}{t} = \frac{\gamma_Z - \gamma_W}{\gamma_W}, \quad (4.5)$$

Da bi se podizanje spriječilo, neophodno je ugroženo tlo zaštititi balastom koji će neutralizirati "višak" pijeziometarske razlike, $h-h_{KR}$ (sl.4.5).

Slika 4.5 Balast

Minimalna debljina balastne ploče, p (potrebno je spriječiti fluidizaciju), dobiva se iz ravnoteže sila (sl.4.5):

$$A\gamma_W H_2 + A\gamma_Z t + A\gamma_P p = A\gamma_W (h + H_2 + t + p) \quad (4.6)$$

odnosno:

$$p = \frac{\gamma_W h - (\gamma_Z - \gamma_W)t}{\gamma_P - \gamma_W} \quad (4.7)$$

gdje je γ_P = volumna težina ploče. Obzirom da je $h_{KR} \gamma_W = (\gamma_Z - \gamma_W) t$ (prema jednadžbi 4.4) dobiva se:

$$p = \frac{\gamma_W (h - h_{KR})}{\gamma_P - \gamma_W} \quad (4.7a)$$

Balastna ploča mora biti perforirana, inače se pritisak vode ispod ploče (uzgon) dodatno povećava (jer se voda "usporava", pa h raste), što dovodi do isplivavanja ploče. Ispiranje sitnijih čestica tla kroz otvore ploče treba spriječiti odgovarajućom filtarskom zaštitom između ploče i tla koje se štiti. Obično se kod nasutih brana, umjesto balastne ploče koristi kameni nabačaj sa filtrom (sl.4.29).

Značajno "nagomilavanje" pritiska nastaje ako se iznad vodopropusnog sloja nalazi slabopropusni "pokrovni" sloj. Slično, kao i kod balastne ploče, i ovdje se na dodiru propusnog i nepropusnog (odnosno, slabopropusnog) sloja javlja veliki "nadpritisak", potreban da omogući filtraciju kroz slabopropusni sloj, zbog čega može doći do podizanja pokrovnog sloja-tzv. izdizanja na kontaktu (sl.4.20).

Treba uočiti da je kritični gradijent fluidizacije, I_{KR}^F , veći od kritičnog gradijenta sufozije, I_{KR}^S , jer pri fluidizaciji hidrodinamička sila mora savladati punu težinu čestice (mora podići česticu), dok kod sufozije česticu treba "samo" pogurati.

4.3 Analiza vanjskih sila

Bitne razlike u odnosu na betonske brane su:

1)hidrostatički tlak ne djeluje na nekoherentno tijelo brane kao cjelinu. On djeluje na svaku česticu nasipa pojedinačno, smanjujući joj volumnu težinu (prema Arhimedovom zakonu). Ako postoji vododrživa zavjesa, onda na njega djeluje sila hidrostatičkog tlaka, kao i na svaku drugu vododrživu površinu (sl.4.6).

Slika 4.6 Hidrostatički tlak na zavjesu nasute brane

2) Hidrodinamičke sile ispiranja (sufozije) i podizanja (fluidizacije) bitno utječu na stabilnost brane i temelja.

- 3) Površinska erozija uslijed udara vala može biti fatalna za nasip, pa se ne smije dozvoliti da valovi prelijevaju krunu brane. Zato se na kruni gradi valobran, a dio površine uzvodne kosine koji može biti ugrožen udarima vala (u rasponu od minimalnog radnog nivoa, Z_{min} , do krune brane) mora se zaštititi pločama ili krupnom kamenom naslagom.
- 4) Sile potresa su opasne kao dodatni stimulans za klizanje kosina (naročito kod materijala bez kohezije i ujednačenog zrna), jer naglo pokretanje smanjuje trenja (daje početni impuls za savladavanje trenja).
- 5) Nema statičke sile od leda, jer je brana dovoljno "meka" da amortizira opterećenje od širenja leda, a pošto se sante kreću k preljevnoj građevini (koja je uvijek posebna betonska konstrukcija), izostaje i dinamički utjecaj leda na nasip brane.
- 6) Težina daje stabilnost brani, tako što stvara silu trenja i time se odupire klizanju. Prisustvo vode u tijelu brane smanjuje efektivnu težinu i koheziju (kod vezanih) materijala, pa je korisno što više spustiti nivo vode u tijelu brane. Zato je potrebno procijeniti gdje se voda nalazi - treba procijeniti položaj filtracijske linije.

4.4 Filtriranje kroz branu i filtracijska linija

Filtracijska linija (freatička linija) predstavlja liniju slobodne površine vode u nasipu. Poznavanje položaja filtracijske linije omogućava:

- 1) Određivanje težine i kohezija svih dijelova brane.
- 2) Određivanje mjesta za drenažu i filtre.
- 3) Procjenu filtracijskog protoka, i sl.

Položaj filtracijske linije dobiva se rješavanjem jednadžbi filtracije, koje se u proizvoljnom slučaju ne mogu analitički riješiti. Za poznate parametre tla i granične uvjete rješenje se može dobiti numeričkim modelom, ili elektronskim zapisom (Pinder 1977).

Za niže faze projekta koriste se približni postupci, gdje se, uz određena pojednostavljena zadatka, primjenjuju modificirana analitička rješenja jednostavnih problema. Modifikacije analitičkih rješenja često omogućavaju uračunavanje utjecaja anizotropije i heterogenosti materijala.

Heterogenost nasipa određuje položaj filtracijske linije (sl.4.7) isto kao što heterogenost temelja određuje položaj pijezometarske linije ispod temelja gravitacijske

brane (sl.3.12). Slučaj homogene i izotropne brane na vododrživom temelju prikazan je filtracijskom linijom "a" na sl.4.7

Slika 4.7 Utjecaj heterogenosti materijala na položaj filtracijske linije u nasipu
Filtracijska linija se "podigne" ako vododrživost materijala raste u pravcu toka, jer se najveći dio pada gubi na nizvodnom dijelu nasipa, gdje je najveća brzina (najmanji presjek pora kroz koje voda filtrira), a time i najveći energetski gubici (linija "b"). Ako vododrživost opada u smjeru toka linija filtracije se "spušta" (linija "c"), jer su gubici energije dominantni na uzvodnom dijelu nasipa, gdje su brzine veće.

U nastavku su opisane dvije pojednostavljene metode za određivanje položaja filtracijske linije: "Kasagrandeov postupak", i "Linearna aproksimacija" (Smith 1995, Boreli 1980).

4.4.1 Kasagrandeov postupak za određivanje filtracijske linije na osnovi Kozenijevog rješenja

Kasagrandeov postupak zasniva se na Kozenijevom analitičkom rješenju, s filtracijskom linijom u obliku kvadratne parabole (osim najuzvodnijeg dijela gdje je krivulja prilagođena graničnom uvjetu).

Kozenijevo analitičko rješenje

Na slici 4.8 prikazano je Kozenijevo analitičko rješenje položaja filtracijske linije za homogenu branu (branu od homogenog materijala) fundiranu na vododrživom temelju s horizontalnim drenom na nizvodnom kraju.

Slika 4.8 Kozenijevo analitičko rješenje

Pretpostavlja se ravninski zadatak, pa je strujanje istovjetno u svakoj presječnoj ravnini duž brane. Filtracijska linija određena je koordinatama x , i h (sl.4.8), gdje je x = horizontalna udaljenost mjerena od uzvodnog ruba drena u smjeru prema uzvodnom rubu brane, a h = visina filtracijske linije (formalno piježometarska razlika točke na filtracijskoj liniji i točke u drenu nizvodno od filtracijske linije).

Kozeni je pokazao da je linija filtracije kvadratna parabola s **tjemenom** u točki "A" na uzvodnom rubu drena:

$$x = \frac{h^2 - h_0^2}{2h_0^2}. \quad (4.8)$$

Parabola siječe liniju slobodne površine jezera u točki "B", udaljenoj 0.3 m od presjeka slobodne površine s uzvodnom kosinom brane (sl.4.8). Zamjenom $x = d$, i $h = H$ za točku presjeka parabole i razine u jezeru dobiva se:

$$h_0 = \sqrt{H^2 + d^2} - d, \quad (4.9)$$

od jednadžbe parabole (jed.4.8) odstupa jedino najuzvodniji dio filtracijske linije. Na osnovu jednadžbe (4.8) može se procijeniti filtracijski protok po metru dužnom nasipa, q . Prema Darcy-ovoj jednadžbi je:

$$q = hKI = Kh \frac{dh}{dx}, \quad (4.10)$$

a iz jednadžbe parabole (4.8) je:

$$(4.11) \quad h = \sqrt{2xh_0 + h_0^2}, \quad \text{što diferenciranjem po } x \text{ daje:}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_0}{\sqrt{2xh_0 + h_0^2}} = \frac{h_0}{h}, \quad (4.12)$$

pa je protok jednak:

$$q = Kh_0 = K(\sqrt{H^2 + d^2} - d) \quad (4.13)$$

Filtracijska linija se spušta (obara) pomicanjem drenaže uzvodno. Time se povećava stabilnost brane na klizanje, jer je povećan nepotopljeni dio nasipa (koji nije olakšan). Međutim istovremeno se povećava i filtracijski protok, proporcionalno povećanju gradijenta dh/dx , odnosno povećanju visine h_0 , koja raste pomicanjem drenaže uzvodno (ako $d \rightarrow 0$ onda $h_0 \rightarrow H$, ako $d \rightarrow \infty$ onda $h_0 \rightarrow 0$). (Da bi se smanjio filtracijski protok drenažu treba pomaknuti nizvodno.)

Kasagrande je proširio Kozenijevo rješenje za proračun filtracijske linije (s horizontalnim drenom) na slučajeve s "proizvoljnim" položajem drena. Dren se rotira oko točke "A" za kut α (sl.4.9).

Slika 4.9 Mogući položaji drena kod Kasagrandeovog postupka

Slučaj d) na slici 4.9, gdje je zamišljena drenaža zarotirana na nizvodno lice, predstavlja filtriranje kroz nasip bez drena. Na slici 4.10 uočava se razlika u odnosu na Kozenijevo rješenje. Točka "C", gdje linija filtracije izlazi na nizvodnu kosinu nasipa spuštenu je u odnosu na točku "C₀", u kojoj Kozenijeva parabola (jednadžba 4.8) siječe nizvodnu kosinu.

Slika 4.10 Filtracijska linija za nasip bez drena

Položaj točke C₀ se određuje iz presjeka jednadžbe parabole i pravca koji prolazi kroz koordinatni početak "A" pod kutom α (sl.4.11):

$$\begin{aligned} a + \Delta a &= \sqrt{x^2 + h^2} = \sqrt{x^2 + h_0^2 + 2h_0x} = \\ &= x + h_0 = (a + \Delta a)\cos \alpha + h_0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

odakle je: $a + \Delta a = h_0 / (1 - \cos \alpha).$ (4.15)

Slika 4.11 Jednadžba parabole u polarnim koordinatama

Položaj točke "C", odnosno udaljenost $a = \overline{AC}$, ovisi o kutu α , i dobiva se preko iskustvenog dijagrama iz tablice 4.2 (Creager 1961), ili se aproksimira formulom (Linsley et al., 1979):

α	30	60	90	120	180
$\Delta a / (a + \Delta a)$	0,36	0,32	0,25	0,17	0,00

$$\Delta a / (a + \Delta a) = (180 - \alpha) / 400,$$

gdje je kut α , u stupnjevima.

Tablica 4.2 Ovisnost odnosa $\Delta a / (a + \Delta a)$ o kutu α

Za filtracijski protok vrijedi ista formula (4.13) kao i kod Kozenijevog rješenja:

$$q = Kh_0 = K(\sqrt{H^2 + d^2} - d).$$

Opisani postupak vrijedi samo ako su temelji vododrživi. U protivnom mora se uključiti i protok kroz temelj.

Anizotropna sredina $K_x \neq K_y$

Dosada je promatrana izotropna sredina. Međutim, obično je vodopropusnost (koeficijent filtracije, K) značajno veća u horizontalnom (K_x) nego u vertikalnom pravcu (K_y) pogotovo kod konsolidiranih materijala.

Za proračun filtracijske linije u uvjetima anizotropne vodopropusnosti primjenjuje se transformacija dužina u horizontalnom smjeru, čime se strujanje u anizotropnoj sredini transformira u strujanje u izotropnoj sredini, na koje se mogu primijeniti prethodno pokazana rješenja.

U daljnjem tekstu će se naznačiti priroda ovakve transformacije.

Problem je ravninski. Jednadžba održanja mase za elementarni volumen jedinične duljine ($dV=dx \times dy \times 1$), pri ustaljenoj filtraciji prema Darcy-evim pretpostavkama, a pri orijentaciji osi i brzina kao na sl.4.12, glasi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (4.16)$$

gdje su: u i v komponente "Darcy-eva" filtracijske brzine za pravce "x" i "y":

$$u = K_x \frac{\partial \Pi}{\partial x}, \quad (4.17)$$

$$v = K_y \frac{\partial \Pi}{\partial y}, \quad (4.18)$$

gdje je Π = pijezometarska kota – potencijal filtriranja (sl.4.12)

Slika 4.12 Jednadžba održanja mase za ravninski problem

Uvođenjem Darcy-evih brzina, u , i v , (jed.4.17 i 4.18) u jednadžbu održanja mase (4.16) dobiva se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) = 0 \quad (4.19)$$

što za homogenu sredinu ($K_x = \text{const.}$, i $K_y = \text{const.}$) daje:

$$K_x \frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.20)$$

Ako je sredina izotropna ($K_x = K_y$) dobiva se Laplasova jednadžba po piježometarskoj koti, Π :

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0 \quad , \quad \text{za koju vrijedi Kasagrandeovo rješenje.} \quad (4.21)$$

Za anizotropnu sredinu jednadžba (4.20) može se prepisati kao:

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\frac{K_y}{K_x} \partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0, \text{odnosno :} \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0, \quad (4.21a)$$

Što predstavlja jednadžbu za izotropnu sredinu (jed.4.21), samo s novom neovisno promjenjivom (s novom duljinom) u horizontalnom pravcu, $x_* = x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}}$, umjesto prvobitne promjenjive, x (sl. 4.13).

Linija filtracije $h(x_*) = h \left(x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \right)$ računa se po već opisanom Kozenijevom rješenju:

$$h = \sqrt{2x_* h_0 + h_0^2} = \sqrt{2x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} h_0 + h_0^2}, \quad (4.23)$$

s tim što je:

$$h_0 = \sqrt{\frac{K_y}{K_x} d^2 + H^2} - \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} d. \quad (4.23a)$$

Slika 4.13 Transformacija x-koordinate

Filtracijski protok, q , procjenjuje se kao i u prethodnom razmatranju:

$$q = h K_x I = K_x h \frac{dh}{dx} \quad (4.10a)$$

gdje se izvod dh/dx računa iz transformirane Kozenijeve parabole (jed.4.23):

$$\frac{dh}{dx} = \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \frac{h_0}{\sqrt{2x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} h_0 + h_0^2}} \quad (4.24) \quad \text{pa je protok jednak:}$$

$$q = K_x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} h_0 = \sqrt{K_y K_x} h_0 = K' h_0, \quad (4.25)$$

gdje je

$$K' = \sqrt{K_y K_x}.$$

4.4.2 Linearna aproksimacija

Često se u praksi filtracijska linija kroz nasip bez drena aproksimira ravnom linijom umjesto parabolom. Greška koja se pritom čini obično nije značajna, pa je u dosta slučajeva sasvim opravdano koristiti ovu jednostavnu metodu (Creager et al.1961).

Razmatra se filtracija kroz homogenu izotropnu nasutu branu na vododrživoj podlozi (sl.4.14). Treba procijeniti položaj filtracijske linije i filtracijski protok (po metru dužnom brane).

Slika 4.14 Linearna aproksimacija filtracijske linije

Iskustvo s velikog broja objekata pokazuje:

- 1) Da filtracijska linija presijeca nizvodnu kosinu (u točki C) na rastojanju $H/3$ od temelja,
- 2) Da se filtracijska linija (većim djelom dužine) može aproksimirati ravnom linijom koja spaja točku C s točkom A, udaljenom za razmak 0,3 m od presjeka razine gornje vode i uzvodne kosine brane (slika 4.14).

Protok, q , određuje se iz Darcy -eve jednadžbe:

$$q = h K l = h K \frac{\Delta H}{\Delta L}. \quad (4.10b)$$

Sa slike 4.14 očigledno je da pijezometarska razlika iznosi $\Delta H = 2/3 H$. Visina protočnog presjeka, h (površina po jedinici širine) uzima se kao srednja visina filtracijske linije:

$h = \frac{H_1 + H_2}{2} = \frac{1}{2} \left(H + \frac{H}{3} \right) = \frac{2}{3} H$, a duljina filtracije, ΔL , kao središnja linija trapeza DCEF

(Creager 1961):

$$\Delta L = L - \left(0.7n_U + \frac{n_N}{6} \right) H \quad (4.26)$$

Izraz za protok sada postaje:

$$q = K \frac{2}{3} H \frac{\frac{2}{3} H}{\Delta L} = K \frac{4}{9} \frac{H^2}{\Delta L}. \quad (4.27)$$

Ako se u anizotropnoj sredini s koeficijentima vodopropusnosti K_x u horizontalnom, i K_y u vertikalnom pravcu, jednako značajne obje komponente filtracijske brzine (u i v), za koeficijent K u jednadžbi (4.27) predlaže se, slično kao i kod izraza (4.25):

$$K = \sqrt{K_x K_y}. \quad (4.28)$$

Napominje se da je ovakvo osrednjavanje besmisleno i pogrešno ako je dominantan pravac strujanja horizontalan, kada je mnogo bolja procjena $K \approx K_x$. (Slično, ako je dominantno strujanje u vertikalnom pravcu, treba računati s $K \approx K_y$).

4.5 Filtracija u temeljima

Nasute brane se često fundiraju na vodopropusnom tlu (aluviju – riječnom nanosu) pa je potrebno procijeniti protok filtracije kroz temelj, i gradijente filtracije (gradijent pijezometarske linije) na mjestu gdje voda napušta tlo (ili se smjenjuju slojevi različite krupnoće). Isto vrijedi i za temelje betonskih objekata, fundiranih na aluviju, gdje još treba odrediti i silu uzgona.

Za složenije slučajeve (izrazita heterogenost, nepravilne konture) koriste se numerički modeli ili elektronski zapisi. Ipak, dosta praktičnih zadataka može se uspješno aproksimirati modificiranim analitičkim rješenjima, bez primjene numeričkih metoda. Kroz nekoliko primjera pokazati će se kako se dolazi do približnog rješenja kod jednostavnih problema filtracije u temeljima. Cilj je objasniti ideje na kojima se zasnivaju aproksimacije i

rješenja, a ne davati recepte. Treba imati na umu da je gotovo svaki hidrotehnički objekt specifičan, pa nije preporučljivo slijepo preslikavati rješenja sa, po nečemu "sličnih" objekata.

4.5.1 Filtracija ispod betonske brane u homogenom tlu ograničene dubine

a) Horizontalna temeljna ploča bez priboja

Prvo će se razmotriti filtracija u temelju betonske brane, s obzirom da nema filtracije kroz samu branu pa su granice filtracijske sredine jasno određene. Pretpostavlja se da je tlo izotropno $K_x=K_y$, i da je temeljna ploča horizontalna, bez "zuba" i priboja. Na ovakvo strujanje može se lako primijeniti potencijalna teorija i stvoriti strujna mreža međusobno okomitih strujnica i ekvipotencijalnih linija (sl.4.15). Strujnice su linije koje imaju pravac brzine - pri ustaljenom tečenju voda se kreće duž strujnica. Ekvipotencijalne linije su linije istih pijezometarskih kota (linije istih potencijala). Strujnice su okomite na ekvipotencijalne linije jer se strujanje obavlja po liniji gradijenta - najvećeg pada. (Najveći pad između dvije ekvipotencijalne linije je uzduž njihove najkraće udaljenosti, a najkraća udaljenost je po normali, sl.4.15)

Slika 4.15 Filtracija ispod temelja betonske brane

Ako se izabere da razmak između dvije susjedne ekvipotencijalne linije, ΔL bude jednako razmaku dvije susjedne strujnice, ΔT (sl.4.15), dobiva se kvadratna strujna mreža, s koje se lako određuju pritisci na temeljnu ploču (odakle se dobiva sila uzgona), gradijenti pritiska, a može se brzo procijeniti i filtracijski protok, kao:

$$q = \sum_{n=1}^{n=N} q_i \quad (4.29)$$

Indeks, N , označava broj "strujnih kanala" (protočnih površina između dvije strujnice) a q_i je protok (po jedinici dužine) između dvije strujnice:

$$q_i = K \frac{\Delta h}{\Delta L} \Delta T = K \Delta h, \quad (4.30)$$

gdje je $\Delta h = \Delta H / M$ pijezometarska razlika dvije susjedne ekvipotencijalne linije, dok je $M+1$ broj ekvipotencijalnih linija ($M=10$, u slučaju sa sl. 4.15) Prema jednadžbi 4.29 ukupni filtracijski protok kroz temelj je:

$$q = N K \Delta h = \frac{N}{M} K \Delta h \quad (4.31)$$

Strujanje nije uvijek jednostavno kao na sl.4.15. Sredina je često heterogena i anizotropna, a konture složene, pa konstrukcija strujne mreže postaje, u najboljem slučaju, zahtjevan i kompliciran posao.

Određeno pojednostavljivanje se ponekad može postići linearizacijom pijezometarske linije u temelju (kao kod brana na stjenovitom tlu). Time se ne utiče mnogo na točnost procjene uzgona, ali se značajno podcjenjuje izlazni gradijent filtracije (usporediti linearnu i "potencijalnu" pijezometarsku liniju na sl.4.15), što treba nadoknaditi odgovarajućim koeficijentom sigurnosti pri provjeri filtracijske stabilnosti temelja (na sufoziju i fluidizaciju).

Filtracijski protok za linearnu aproksimaciju se računa kao:

$$q \approx K T \frac{\Delta H}{L}. \quad (4.32)$$

Ovako se dobiva nešto veći protok nego primjenom potencijalne teorije (jed.4.31), jer je potencijalni gradijent $(-dh/dx)_{50}$ na sredini temeljne ploče (gdje je protočni presjek, T, isti za obje metode), manji od prosječnog gradijenta, $\Delta H/L$ (usporediti pad točkaste i pune pijezometarske linije na slici 4.15).

b) Horizontalna temeljna ploča s pribojem

Radi smanjena uzgona, filtracijskog protoka, i izlaznog gradijenta, često se u temelj pobijaju vertikalne zavjese –priboji - kojima se produžava filtracijski put vode (sl.4.16). Filtracijska dužina, L, može se računati kao zbroj svih dodirnih "površina" (dužina) između objekta i tla:

$$L_{(o)} = 2p + L_{BR}, \quad (4.33)$$

gdje je: p = dubina priboja (zastora), a $L_{BR} = B$ = širina temelja.

Uzimajući u obzir anizotropnost koeficijenta filtracije ($K_x \gg K_y$), i mogućnost lokalnih slijeganja duž horizontalnog dijela temeljne spojnice, američki inženjer Lein predložio je da se dužina filtracije u temeljima reducira u odnosu na jednadžbu (7.38), i računa kao zbroj:

1) *Punih (nereduciranih)* dužina po svim vertikalnim kontaktima objekta i temelja, i svim kosim kontaktima s nagibom strmijim od 45° i

2) Dužina reduciranih na jednu trećinu stvarne dužine za horizontalne kontakte i kose kontakte s nagibom blažim od 45° .

Ovako dobiven zbroj dužina (punih i reduciranih) uspoređuje se s dvostrukom širinom temelja, $2 \times L_{BR}$, (ili dvostrukim rastojanjem nizvodnog i uzvodnog priboja, ako postoji nizvodni priboj), pa se za filtracijsku dužinu, $L_{(L)}$, uzima manja od te dvije vrijednosti.

a) Za proračun gradijenta filtracije (s ciljem procjene opasnosti od sufozije i fluidizacije tla na kontaktu brane i temelja i neposredno nizvodno od brane) treba koristiti Leinovu reduciranu dužinu filtracije $L_{(L)}$, jer je kraća, pa daje veći gradijent.

Slika 4.16 Filtracija za temelj s pribojem

b) Za proračun uzgona treba koristiti "običnu" dužinu filtracije, određenu jednadžbom 4.33, s nereduciranim horizontalnim dužinama jer se tako dobiva veći uzgon. (Ovaj postupak se naziva "Blajova" metoda).

Lein je na osnovu promatranja velikog broja brana, napravio tablicu dozvoljenog izlaznog gradijenta pritiska, h/L , ovisno o vrsti materijala u temelju (tablica 4.1).

Uzgon je vertikalna komponenta hidrostatičke sile koja djeluje na dodiru objekta i tla (ili u pukotinama unutar samog objekta). Kod ravninskog zadatka uzgon se računa kao površina (volumen po jedinici dužine) između linije dodira i projekcije linije dodira na pijezometarsku liniju (koja vlada duž linije dodira), pomnožena sa specifičnom težinom vode.

Položaj pijezometarske linije, $h(x)$, može se aproksimirati tako što se denivelacija gornje i donje vode, $\Delta H = H_G - H_D$, linearno rasporedi duž linije dodira. Ako se rastojanje duž linije dodira, mjereno od najuzvodnije točke "G", označi s, x , (sl.4.17), a ukupna dužina linije dodira (filtracijska dužina) s, $x_D=L$, linearnom interpolacijom se dobiva:

$$h(x) = H_D + \frac{L-x}{L} \Delta H. \quad (4.34)$$

Slika 4.17 Uzgon ispod brane s pribojem

Filtracijski protok u temelju, q , ne može se dobiti direktno iz Darcy - eve jednadžbe. Priboj se, hidraulički gledano, ponaša kao zatvarač na sredini cijevi-stvara gubitke, ali ne određuje kontrolni presjek (za razliku od zatvarača na slobodnom kraju cijevi, Creager 1961).

U tablici 4.2 dana je iskustvena ovisnost, bezdimenzionalnog filtracijskog protoka, $\varphi_q = q/q_0$ (q_0 je protok bez priboja), od odnosa dubine priboja i debljine vodonosnog sloja, p/T . Filtracijski protok, q , se odatle računa kao:

$$q = \varphi_q(p/T)q_0 = \varphi_q(p/T)K T \frac{\Delta H}{L_{BR}} \quad (4.35)$$

p/T	1.00	0.95	0.85	0.80	0.60	0.20	0.00
φ_q	0.00	0.25	0.42	0.48	0.66	0.90	1.00

$$\varphi_q = \left(1 - \frac{p}{T}\right)^{0.45}$$

Tablica 4.2 Ovisnost bezdimenzionalnog filtracijskog protoka o odnosu dubine priboja i debljine vodonosnog sloja

Za točnija razmatranja može se koristiti strujna mreža (mreža strujnica i ekvipotencijalnih linija), numerički model, ili elektronski zapis).

4.6 Metode kritičnih kliznih krugova

Iskustvo je pokazalo da će kosina brane najprije skliznuti po površini kružnog (ili približno kružnog) oblika (sl.4.18)

Metode kritičnih kliznih krugova (Švedska, Bishopova i sl.) uspoređuju okretni moment smicanja sa stabilizirajućim momentom oko centra kliznog kruga, čiji je isječak AB potencijalna površina smicanja kosine. Smicanje izaziva tangencijalna komponenta težine – sila T_i na sl.4.18, dok stabilnost daju normalna komponenta težine, N_i , i kohezija $L_i c_i$. Obzirom da sve razmatrane sile imaju isti krak (radijus kliznog kruga, r) odnos stabilizirajućeg i klizajućeg momenta će biti:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (N_i \operatorname{tg} \varphi_i + L_i c_i)}{\sum_{i=1}^N T_i} > C_s \quad (4.36)$$

Slika 4.18 Metoda kritičnih kliznih krugova

gdje su L_i = dužina elementa "i", c_i = kohezija elementa "i", φ_i = kut unutrašnjeg trenja elementa "i", N = broj elemenata u razmatranom kružnom odsječku, i C_S = zahtijevani koeficijent sigurnosti.

Određivanje kritičnog (najopasnijeg) kliznog kruga može se vršiti po više metoda (Novak 1996, Maksimović 1995, Nonveiller 1983). Bitno je uzeti u obzir i klizanje u temelju ako brana nije fundirana na stijeni.

4.7 Rezime o osnovnim pravilima za projektiranje nasutih brana

Najvažnija pravila za stabilnost nasutih brana (Creager 1961) su:

- 1) Ne smije se dozvoliti prelijevanje preko nasipa brane
- 2) Ne smije se dozvoliti nekontrolirana filtracija vode kroz branu.
- 3) Filtracijska linija mora se uvijek presjeći filtarskim drenom (horizontalnim, kosim ili na nizvodnoj kosini).
- 4) Brzina (gradijent pritiska) vode koja izlazi iz tijela i temelja brane, ne smije izazvati pokretanje čestica brane i/ili tla.
- 5) Nagibi uzvodne i nizvodne kosine moraju biti stabilni, s dovoljnim koeficijentom sigurnosti, za sve promatrane slučajeve opterećenja (uključujući i seizmička). (Uzvodna kosina mora biti stabilna na naglo spuštanje razine u akumulaciji). Analiza stabilnosti mora obuhvatiti i temelje ako su od materijala podložnog klizanju.
- 6) Uzvodno lice brane mora se zaštititi od razornog djelovanja valova, a nizvodno od ispiranja kišom.

4.8 Tipovi nasutih brana

Osnovna podjela nasutih brana je na:

1. Zemljane brane i
2. Brane od kamenog nabačaja.

4.8.1 Zemljane brane

Zemljane brane se grade od materijala manje krupnoće (gline, pijeska, sitnog šljunka). Brane od sasvim homogenog materijala su rijetkost, jer su raspoloživi materijali manje ili više heterogeni te se ne isplati iz " smjese " koristiti samo jednu frakciju. ako je cijeli nasip približno homogenog sastava, smatra se da je brana homogena (sl.4.19a). Homogena brana se štiti od sufozije (ispiranja) nizvodnom drenažom. Obično se vertikalni ili kosi dren – tzv. " dimnjak " ("chimney") povezuje horizontalnim drenažnim tepihom s nizvodnom nožicom (sl. 4.19a). Ovime se osigurava efikasno spuštanje filtracijske linije, naročito kod izrazito anizotropnih materijala.

Homogene brane se grade od materijala znatne vododrživosti, kako bi se smanjio gubitak vode. S druge strane, ovakav materijal je slabije nosivosti, što zahtjeva relativno blag nagib kosina i veliki volumen nasipa. Krupniji materijali (pijesak i šljunak) imaju veliki kut unutrašnjeg trenja, čime se postižu strmije kosine, a time i manji volumen nasipa, ali su zbog velikih pora slabo vododrživi. Ovo nameće ideju o zoniranju presjeka brane.

Slika 4.19 Zemljane brane različitog stupnja heterogenosti

Zonirane brane se grade od materijala različitih karakteristika. Obično se vododrživi (a slabije nosiv) materijal ugrađuje na uzvodnom dijelu presjeka, a prema nizvodnom kraju se nižu slojevi slabije vododrživosti i veće nosivosti (sl 4.19b). Ovim se postiže značajno obaranje filtracijske linije (sl.4.7) pa je veći dio nasipa oslobođen pornog pritiska. S druge strane, uzvodni dio nasipa je slabije nosiv, što zahtjeva blažu kosinu.

U suvremenoj praksi najčešće su zonirane zemljane brane s vododrživom glinenom jezgrom. Kosine (" potporne zone") se grade od stabilnog krupnozrnog materijala, koji štiti slabije nosiv, ali vododrživi materijal u jezgri (sl. 4.19c). Ovako se postiže stabilnost sa strmijim kosinama (manjim volumenom nasipa) nego za slučaj b). Za jezgru je bitno da pored dobre vododrživosti ima i visoku plastičnost, što smanjuje rizik od nastanka pukotina pri eventualnim deformacijama.

Obzirom da razlika u krupnoći materijala omogućava ispiranje čestica jezgre kroz pore čestica kosina, na kontaktu jezgre i kosina mora se postaviti filtarska zaštita (sl.7.40), i to i nizvodno i uzvodno od jezgre (zbog povratnog tečenja pri pražnjenju akumulacije).

Debljina jezgre u odnosu na kosine određuje se ovisno o osobinama i raspoloživosti materijala.

Po položaju jezgra može biti kosa-uzvodna, ili vertikalna-centralna.

Slika 4.20 Filtarska zaštita kod brane s jezgrom

Prednost kose uzvodne jezgre u odnosu na centralnu vertikalnu (sl.4.21) je efikasnije obaranje filtracijske linije, što omogućava da znatno veći dio brane bude oslobođen uzgona, čime se popravljiva stabilnost brane.

Slika 4.21 Položaj jezgre kod zemljanih brana

4.8.2 Brane od kamenog nabačaja

Brane od kamenog nabačaja se grade nasipanjem i zbijanjem lomljenog kamena. Obzirom na veliku vodopropusnost kamenog nabačaja ove brane se uvijek grade s vododrživom zavjesom. To može biti:

a) glinena jezgra

b) kruta zavjesa, obično armirano – betonski ili asfalt – betonski ekran

U oba slučaja drenaža u tijelu brane je suvišna, obzirom na poroznost materijala. Međutim, filtarska zaštita između glinene jezgre i kamenog nabačaja (s uzvodne i nizvodne strane) je neophodna.

Brane od kamenog nabačaja grade se u područjima s lako dostupnim - jeftinim kamenom za nasip, ako je materijal za zemljanu branu nedostupan ili skup. Brane od kamenog nabačaja su također u prednosti u vlažnim i hladnim klimatskim uvjetima, gdje bi građevinska sezona za nasipanje zemljane brane bila nedopustivo kratka. Brane od kamenog nabačaja otpornije su na eroziju od zemljanih, a zbog velikog kuta unutrašnjeg trenja dozvoljavaju i strmije nagibe kosina. S druge strane, brane od kamenog nabačaja su zahtjevnije u pogledu fundiranja u odnosu na zemljane brane (ali su u tom pogledu znatno povoljnije od betonskih). Potrebna je veća nosivost tla jer je manja površina temeljne stope i neophodno je ograničiti slijeganje temelja zbog opasnosti od pucanja zavjese. To ne predstavlja problem kod fundiranja na zdravoj stijeni, ali zahtjeva dobro zbijanje šljunkovitog ili pjeskovitog temelja.

Krute zavjese, kao i glinena jezgra, mogu biti kose uzvodne, ili centralne vertikalne (sl.4.22). Zavjesa se ukopava do stjenovitog materijala u temelju gdje se vezuje s injekcijskom zavjesom, a filtarska zaštita u tijelu brane mu nije potrebna.

Slika 4.22 Brane s armirano-betonskim ekranom

Uzvodni ekran je zastor na samom uzvodnom licu brane. Najčešće se radi od armiranog betona ili asfalt – betona. Armirano – betonski ekran se obično slaže asfaltnim slojevima, epoksi premazima, ili nekom drugom zaštitom protiv procjeđivanja. S gledišta stabilnosti, uzvodni ekran je povoljniji od vertikalnog, jer je cijela brana na "suhom", a klizanju se suprotstavlja i vertikalna komponenta hidrostatičke sile (sl. 4.22a), što omogućava strmije nagibe kosina nego kod vertikalnog ekrana (ili vertikalne glinene jezgre). Prednost uzvodnog ekrana je i pristupačnost za održavanje, što je praktički nemoguće kod rješenja s vertikalnom ekranom. Uz to, uzvodni ekran osigurava zaštitu od valova i omogućava jednostavnije nadvišenje brane, ako se za to ukaže potreba tijekom eksploatacije. Nedostatak uzvodnog ekrana je velika osjetljivost na slijeganje nabačaja ispod ekrana, zbog čega može doći do deformacija ekrana i pucanja. Prednost vertikalnog ekrana je što se uz njega (s uzvodne strane) može postaviti vododrživi glineni sloj koji sprečava filtraciju u slučaju pojave pukotina u betonu.

4.9 Konstrukcijska pravila i okvirne dimenzije

4.9.1 Zemljane brane

Zemljane brane se grade:

- 1) Mehaničkim nasipanjem i nabijanjem, ili
- 2) Hidrauličkim nasipanjem.

1) Mehaničko nasipanje i nabijanje

Materijal za nasipanje se uzima s **pozajmišta**, gdje mu se otkopavanjem značajno povećava volumen pa se pri ugrađivanju mora zbijati, kako bi se smanjilo naknadno slijeganje ili bubrenje. Pored toga zbijanjem se povećava vododrživost materijala, jer se

smanjuje veličina pora prilikom "pakiranja" zrna, a raste i otpornost na smicanje. (Zbijanje ne treba zamijeniti s konsolidacijom. Pri zbijanju iz pora se istiskuje zrak i to je brz proces, a konsolidacija (glinenih materijala) je dugotrajan proces koji podrazumijeva smanjenje volumena na račun postepenog istiskivanja vode djelovanjem opterećenja, obično od težine samog objekta.)

Zbijanje gline se vrši teškim valjcima i ježevima u slojevima debljine od 20 – 30 cm. Zbijanje je najučinkovitije pri optimalnoj vlažnosti – to je obično prirodna vlažnost materijala, ili vlažnost nešto manja od prirodne. Previše vlažan materijal se zbog prisustva vode ne može zbiti do zadovoljavajućeg stupnja. Zato se glina ne smije ugrađivati po kiši pa je vremenski period (u toku godine) pogodan za gradnju zemljanih brana kraći nego kod betonskih. (Ne smije se nasipati ni u vrijeme mraza). Prema tome, meteorološki uvjeti na gradilištu su vrlo bitni za procjenu trajanja radova.

Ugradnja nasutog materijala koji nije glinovit (pijesak, šljunak) također zahtjeva zbijanje, a dinamičko nabijanje daje bolje rezultate od statičkog. Ovakvom materijalu pogoduje veća vlažnost pri zbijanju. Što je materijal krupniji, to se prilikom zbijanja dodaje više vode – krupni pijesak i šljunak se prelijevaju prije nabijanja, a pri ugrađivanju krupnog kamena ponekad se koriste mlazovi pod pritiskom. Filtarski materijal se nabija u slojevima od ~ 30 cm debljine.

Prije početka nasipanja temelj se čisti od organskog materijala (panjeva, korijenja), da nakon truljenja ne bi ostale šupljine u zemljanoj masi, što može izazvati slijeganje brane. (Prema Creageru, 1961, u nasipu brane dozvoljeno je najviše 5-6 % organskog materijala).

Priboje (ako su predviđeni) je potrebno učiniti prije početka nasipanja, dok se injektiranje može uraditi i kasnije kroz injekcijsku galeriju (ili, ponekad, kroz glinenu jezgru). Injekcijska zavjesa mora biti izvedena kao nastavak vododržive jezgre ili betonskog ekrana.

Potrebno je osigurati dobru vezu između susjednih slojeva nasipa, posebno između temelja i prvog sloja, kako bi se izbjeglo klizanje po ravnini spoja, kao i stvaranje privilegiranog puta filtracijske vode između slojeva. Ovo se postiže ohrapavljenjem donjeg (starog) sloja ježevima neposredno prije početka nasipanja novog sloja.

Kada se rad na nasipanju privremeno prekida (kiša, mraz) potrebno je zbijanje gline završiti glatkim valjcima kako bi se dobila glatka, ocjedna površina s koje kiša otječe prije nego što se upije u nasip. Iz istog razloga slojeve treba raditi s uzdužnim padom (1:20 – 1:50) od jezgre prema kosinama (sl.4.23)

Slika 4.23 Nagib materijala pri prekidu nasipanja

Visinski položaj krune nasipa (zemljane ili brane od kamenog nabačaja) određuje se slično kao kod betonskih brana. Postoji, međutim, i jedna važna razlika. I pored svih mjera za smanjenje slijeganja kod nasutih brana treba se računati s 1 – 6% slijeganja, pa prema tome i izvoditi nasip (osigurati odgovarajuće "nadvišenje" nasipa). Neuzimanje u obzir slijeganja nasipa može biti kobno, jer se preljev (evakuacijski organ) fundiran na stijeni, daleko manje sliježe od nasipa brane, pa će nasip ostati snižen u odnosu na preljev. Ovo znači da se na preljevu može javiti nivo vode viši od krune nasipa, pa će nasip biti prelišen s katastrofalnim posljedicama. Da bi se to izbjeglo na uzvodnom rubu krune gradi se valobran, a na nizvodnom ograda.

Uzvodna kosina mora biti zaštićena od valova, što se postiže: oblogom od betonskih ploča, oblogom od rukom položenog kamena (kamenom naslagom), slojem kamenog nabačaja ili povećanjem otpornosti površine nasipa cementom. Ova zaštita mora biti postavljena od krune brane do najnižeg radnog nivoa vode u akumulaciji. Između nasipa i zaštitnog sloja ugrađuje se filter, čime se onemogućava ispiranje materijala nasipa prilikom pražnjenja akumulacije.

Nizvodna kosina se mora zaštititi od erozivnog djelovanja kiše. Zaštita se postiže kamenim nabačajem ili **oblogom**. Ukoliko nema opasnosti od procjeđivanja kroz nizvodnu kosinu (tj. ako je filtracijska linija presječena drenažnim filtrom), otpada i potreba za filtarskom zaštitom ispod kamene obloge. Zaštita od erozivnog djelovanja kiše može se osigurati i zatravljanjem nizvodne kosine pogodnim gusto rastućim travama.

Slika 4.24 **Berme** na nizvodnoj kosini

Kod brana visokih preko 15-20 m često se rade proširenja – berme na svakih 10-ak m visine, u cilju smanjenja erozivne energije kiše koja otječe kosinom. Berme su široke 2 –

3 m, s poprečnim padom prema nožici ("prema unutra"), i s uzdužnim ocjednim kanalima (sl.4.24) kojima se voda odvodi, obično do kolektora na bokovima, a odatle kontrolirano do donje vode.

Pri nasipanju i zbijanju posebnu pažnju treba obratiti na mjesta spoja nasutog materijala s dijelovima betonske konstrukcije i bokovima dolina, gdje najlakše dolazi do stvaranja pukotina i nekontroliranog procjeđivanja.

1. Ne smije se dozvoliti da betonska konstrukcija ili dio boka doline budu iznad zbijenog materijala jer to redovno dovodi do pojave šupljina na mjestu dodira zbog naknadnog slijeganja (sl.4.25a). Granični zidovi trebaju biti nagnuti od nasipa (sl.4.25b), a nikako prema nasipu (materijal nasipa treba nalijegati na zidove).

2. Zidove kojima se nasip veže za konstrukciju treba porebriti (sl.4.26a) čime se produžava put procjeđivanja vode na spoju (smanjuje se gradijent procjeđivanja). Dijelovi nasipa oko betonskog objekta nisu pristupačni za velike strojeve pa se zbijanje mora vršiti specijalnim nabijačima.

Slika 4.25 Veza betonske konstrukcije i nasipa

3. Cijevi se, po pravilu, ne postavljaju kroz nasip brane, niti kroz erodibilne temelje (treba ih postaviti kroz bokove doline u stjenovitom materijalu). Ako je neophodno da cijevi prođu kroz branu, onda se mogu postaviti jedino u rovove u temelju, i to samo ako je temelj dovoljno nosiv, kako ne bi došlo do neravnomjernog slijeganja i pucanja cijevi. Rovovi se presijecaju "kragnama" za produženje puta filtracijske vode (sl.2.26b), a neophodno je osigurati zatvaračnicu i na uzvodnom kraju cijevi kako bi se omogućio pristup u slučaju havarije.

Slika 4.26 Veza nasipa s zidom i postavljanje cijevi ispod nasipa

2) Hidrauličko nasipanje

Hidrauličko nasipanje je rjeđe primjenjivana metoda za izradu brana, obzirom da se obično isplati samo za izuzetno velike količine nasipanja. Zemljani materijal se razmuti u vodi pa se specijalnim crpkama transportira i deponira na mjesto nasipanja (Creager et al. 1961)

3) Okvirne dimenzije

U početnim fazama projektiranja neke od dimenzija nasutih brana (širina krune, širina jezgre, nagibi kosina) se procjenjuju iskustvom. Širina nasipa brane u kruni, b_K , (sl.4.27) može se računati kao (Nonveiller 1983):

$$b_K = 1 + A\sqrt{H} \quad (4.37)$$

gdje je $A = 1.1 - 1.65$, s tim da je $b_K > 4\text{m}$.

Širina glinene jezgre u kruni, b_J , obično nije manja od 3 m (mada postoje brane s $b_J = 1\text{m}$),

dok se za širinu u osnovi, B_J , može pretpostaviti $B_J = \frac{1}{2}$ do $\frac{1}{4}H$

Slika 4.27 Orijentacijske dimenzije zemljanih brana

Nagibi kosina ovise o materijalu nasipa i uvjetima fundiranja. Na zdravom stjenovitom obično se uzima nagib od 1:2,5 do 1:3,5 za glinaste i prašinate materijale i 1:2 do 1:3 za pijesak i šljunak. Za teže uvijete fundiranja povećava se i nagib i kosina. Nizvodna kosina je obično s većim nagibom od uzvodne.

4.9.2 Brane od kamenog nabačaja

Kamen se zbija u vlažnom stanju upotrebom vibrovaljaka (ponekad uz pomoć mlazova pod pritiskom). Slojevi nabačaja su debljine od 0,3 do 2,0 m (najčešće ~ 1m), ovisno o tipu brane i mjestu ugrađivanja (kod brane s glinenom jezgrom slojevi su tanji, naročito u blizini jezgre). Ugradnja kamenog nabačaja obavlja se po, takoreći, svim vremenskim uvjetima, što je velika prednost ovog tipa brana. Najveća mana brana s uzvodnim armirano – betonskim ekranom je deformiranje i pucanje ekrana zbog nejednakog slijeganja materijala ispod ekrana pa se ekran postavlja nakon što je završeno zbijanje materijala u nasipu.

Obično se brane od kamenog nabačaja rade zonirano. Nizvodna zona, koja daje stabilnost – potporu, je od najboljeg i najkrupnijeg kamena (zona C na sl.4.28). Uzvodna zona (A) je od dobro zbijenog šljunka i sitnijeg tucanika što osigurava stabilnu osnovu za ekran koji se preko nje polaže. (Ponekad se postavlja i sloj od kamene naslage s istom

ulogom). Središnja zona (B) obično je od kamena slabije kvalitete i čini popunu između zona (A) i (C).

Slika 4.28 Zoniranje materijala u brani od kamenog nabačaja

Utjecaj neravnomjernog slijeganja ekrana se smanjuje korištenjem ploča manjih veličina (rijetko se koriste ploče veće od 10 x10 m), a spojnice se rade od elastičnog veziva – obično bakrenog lima.

Armatura ekrana štiti ploče od prskana uslijed neravnomjernog slijeganja. Ako se i jave, pukotine u betonu će radi povezujućeg djelovanja armature biti znatno uže nego kod nearmiranih ploča, čime se postiže bolja vododrživost ekrana.

Okvirne dimenzije

Nagib kosina nabačaja pri fundiranju na stjenovitom temelju kreće se od 1:1,5 do 1:1,3 (i strmije). Za prvu procjenu može se uzeti da je debljina zavjesa u kruni oko 30 cm, i da idući niz kosinu raste za 1 cm na svaki metar dubine vode.

5. Literatura

Boreli, M., Hidraulika, Beograd, 1980.

Creager, W.P et al., Engineering For Dams, John Wiley and Sons, 1961.

Maksimović, M.,Mehanika tla, Grosknjiga, Beograd, 1995.

Nonveiller,E., Nasute brane, Školska knjiga – Zagreb, 1983.

Novak, P et al., Hydraulic Structures, E&FN SPON, 1996.

Pinder, J.,F. i Gray, W.,G., Finite Element Simulation In Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press, 1977.

Savić,Lj.M.,Uvod u Hidrotehničke Građevine, Građevinski fakultet, Beograd, 2003.

Sherard, J.L, et al., Earth and Earth –Rock- Dams - Engineering Problems of Design and Construction, Wiley, New York, 1963.

Smith,D.C.,Hydraulic Structures, University of Saskatchewan, 1995.

Stojić,P., Hidrotehničke građevine (I, II i III dio) Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 1997.

Thomas, H.H, The Engineering of Large Dams, Wiley, Chichester, 1976.

USBR, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION, Design Of Small Dams, A Water Resources Technical Publication, 1987.