

1400°C, a titan-borid do 1400...1500°C. T. t. nekih vrlo teško taljivih metalnih borida jesu ove (u °C):

CaB_x	TiB_x	ZrB_x	VB_x	TaB_x	MoB	MoB_x	W_xB	WB	NbB_x
2235	2900	3040	2400	3100	2180	2100	2770	2860	2900
± 50	± 100	± 50	± 50	± 50			± 80	± 80	

Zbog velike otpornosti prema visokim temperaturama i prema kemijskim djelovanjima neki boridi mogu ili mogli bi biti korisni kao gradiva ili prevlake u raketama, mlaznim turbinama, mlaznicama za rastaljene metale i soli i druge uređaje koji su izloženi sličnim utjecajima. Vršeni su pokusi da se boridi titana i cirkonijuma upotrijebe za elektrode u elektrolizi glinice. Velika tvrdoća borida uz termičku stabilnost ukazuje na njihovu upotrebljivost za rezne alate i klizne kontakte. Boridi nekih rijetkih zemalja imaju izvanredno visoke termičke emisivite i niske radne funkcije, što su svojstva vrlo poželjna u elektronici. Odlične apsorpcijske osobine izotopa ^{10}B za termičke neutrone čini boride s visokim sadržajem bora dragocjenim materijalom u nuklearnoj tehnici. Primjena borida u tehniči tek je u svojim počecima, ali ima izgleda da će se brzo razvijati. God. 1963 najviše se trošilo borida titana i cirkonijuma, njihova je cijena (prah čistoće 99...100%) bila 11...12 \$/lb.

U metalurgiji se upotrebljavaju legure bora sa željezom, manganom, niklom i kalcijumom, također ferolegure s manjim sadržajem bora. Feroborovi sa 10...19% B upotrebljavaju se u crnoj metalurgiji, mangan-bor (sa 17,5% B, 75% Mn, 3% C, 1,5% Si, ostatak Fe) služi za dezoksidaciju i čišćenje bakra i bakrenih legura, nikal-bor (sa 15...18% B, 0,5% C, 1% Al, 1,5% Si, ostatak Ni) poglavito za dezoksidaciju nikalnih legura otpornih prema visokim temperaturama. Za metalurgiju se proizvodi također kalcijum-borid (40...45% B, 14...18% C, 30...35% Ca, ostatak Fe), 50%tni ferosilicij sa 0,04...0,08% B, ferotitan sa 0,11...0,15% B, ferocirkon sa 0,2...0,5% B, ferotitan-aluminijum sa 0,2...0,5% B, 10...13% Al i 15...20% Ti.

LIT.: R. Nasini, I soffioni e i laghi della Toscana e la industria boracifera, Roma 1930. — Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, System-Nr. 13: Bor, Weinheim/Bergstr. 1934, Ergänzungsband 1954. — J. A. Kohn, W. F. Nye, G. K. Gaule, Boron, New York 1960. — Г. В. Саксонов, Л. Я. Марковский, А. Ф. Жуач, М. Г. Баллико, Бор, его соединения и сплавы. — M. F. Lappert, Comprehensive boron chemistry, Amsterdam 1961. — W. Gerrard, The organic chemistry of boron, New York 1961. — H. Steinberg, Organoboron chemistry, New York 1963. — F. E. Bacon, J. G. Bower, Boron and boron alloys; N. P. Nies, H. C. Newsom, J. L. Boone, M. L. Iverson, S. M. Dragunov, G. W. Campbell, Jr., W. G. Woods, Boron compounds, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, New York 1964. — R. M. Adams, ed., Boron and boron compounds, New York 1964.

V. Logomerac

BRANE (vodojaže, pregrade), privremeni ili stalni objekti koji se grade u riječnom koritu u svrhu uređenja toka i iskorištenja vode. Razlikuju se *niske* i *visoke brane*. Prema međunarodnoj definiciji, u visoke brane spadaju sve one brane čija visina od temelja do krune iznosi više od 15 m, kao i one više od 10 m koje imaju dužinu po kruni veću od 500 m, veće jezero od 100 000 m³, ili ako preko njih treba propuštati količinu vode veću od 2000 m³/s. Sve druge brane smatraju se niskima.

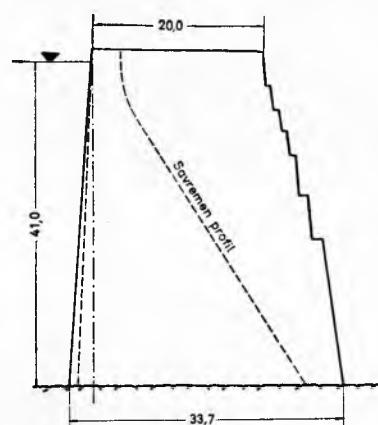
Izgradnja brana poznata je preko 3000 godina, u vezi sa navodnjavanjem zemljije u starom Egiptu, Mezopotamiji, Kini itd. Primitivni oblici izgradnje brana zadržali su se još i danas u te svrhe i u svrhu iskorištenja energije vode za pogon vodenica. Gradene su niske brane i izdane brane. Tek u XVI v. brane dobivaju znatnije dimenzije, i to u Španiji; ove masivne brane postoje još i danas. Poznata je brana Alicante iz 1580 (sl. 1). Ona ima veoma neekonomične dimenzije ako se uporedi sa današnjim konstruktivnim oblicima. Sredinom XIX v. iznalaže se u Francuskoj racionalniji profili, sigurni protiv prevrtanja i klizanja. Snažan napredak u usavršavanju oblike brana i tehnički njihova izvođenja počinje u posljednjoj deceniji prošlog vijeka, kada je usavršena mogućnost prenosa električne energije na velike daljine vodovima visokog napona. To je dovelo do iskorištenja vodnih snaga u većoj mjeri, a s tim u vezi do znatnijih izgradnji brana. Nešto kasnije, velik razvoj industrije izaziva potrebu za izgradnjom većih brana u cilju zadovoljavanja potreba u vodi u jače razvijenim industrijskim predjelima (npr. Rurskom području u Zapadnoj Njemačkoj).

Izgradnja brana poslije Drugoga svjetskog rata znatno je porasla, tako da je do 1964 postojalo već oko 9000 visokih brana; oko 150 brana imalo je visinu preko 100 m, a 8 brana prelazi visinu od 200 m (Vaiont u Italiji, Grande Dixence i Mauvoisin u Švicarskoj, brane Hoover-Boulder, Glen Canyon i Oroville u USA, brana Bhakra u Indiji i brana Dez u Iranu).

Prva visoka brana u našoj zemlji izgrađena je 1896 u Klinju, da bi se omogućilo navodnjavanje Gatačkog polja u istočnoj Hercegovini. Prije Drugoga svjetskog rata postojale su na teritoriji SFRJ svega 4 visoke brane. Krajem 1964 ovaj broj se popeo na 55. Naša najviša brana, ukupne visine 85 m, nalazi se u Jablanici (izgrađena 1955), a najviša brana u izgradnji je brana Grančarevo na Trebišnjici. Naša najviša projektovana brana je Komarnica (200 m) u izvornom dijelu Drine. U svjetskoj literaturi poznat je slučaj brane Jajce II, gdje je provedeno fundiranje na nanosu. Započeta su naša nova ostvarenja u kraskim predjelima, gdje nisu postojala nikakva ikustva (Peruća na Četini).

Najveći značaj za jednu zemlju imat će nova brana Saad el Aali kod Asswana na Nilu u Egiptu, visine 110 m. Ona će biti nasutog tipa, od kamena sa jezgom

od gline. Novo jezero omogućit će dalji razvoj poljoprivrede u Egiptu i Sudanu uz zadovoljstvo potreba za energijom, jer će imati korisnu zapremenu od 130 milijardi m³ vode, pa će moći da služi za višegodišnje izravnanje. Ukupna zapremina nasipa za ovu branu iznosit će 44 miliona m³.

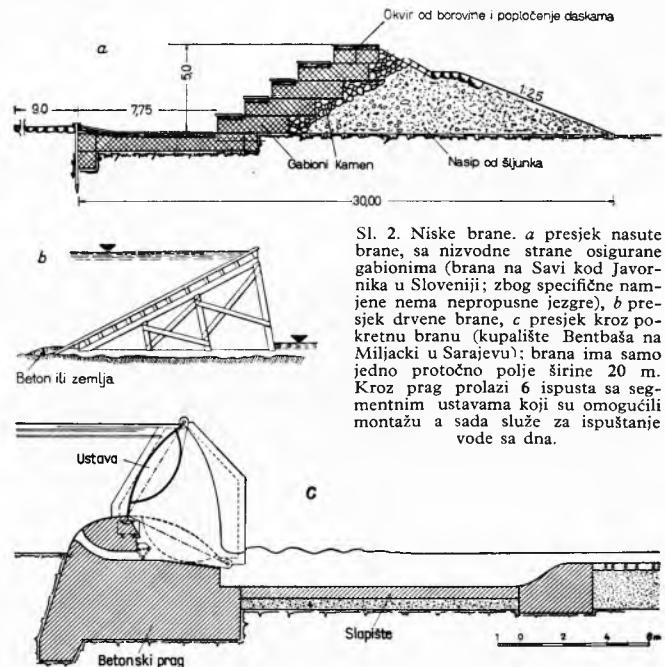


Sl. 1. Brana Alicante u Španiji; materijal: kamen, malter od napuljskog pucolana.

skaja ima nešto manju zapremenu ali je najveće dužine (570 km). Te su dvije brane dovršene 1960 odnosno 1962. Najveće umjetno jezero u izgradnji u nas nalazi se uz branu Grančarevo na Trebišnjici; njegova zapremina vode iznosi 1,3 milijarde m³.

NISKE BRANE

Niska brana (pregrada, franc. *barrage*, njem. *Sperre*; ruski *плотина*, engl. *dam*, tal. *traversa*) predstavlja građevinu koja uglavnom ima zadatak da skreće vodni tok ili da podiže vodostaj u koritu i na taj način omogući plovidbu. Svaka niska brana stvara koncentraciju pada i time omogućava iskorištenje vodne snage; ona može da u gradovima ili njihovoj okolini stvori manje jezera podesno za rekreativne svrhe, može da služi i za zadržavanje nanosa, za sprečavanje erozije i sl. Niske brane služe i za skretanje vode u cilju napajanja kanala za navodnjavanje polja, kanala za snabdijevanje industrijskih postrojenja, plovnih kanala, kao i tunela koji odvode vodu do hidroelektrana. Za ove svrhe grade se i tzv. *pomoćne brane*, koje omogućavaju izgradnju visokih brana u suhoj jami u koritu rijeke, navraćajući vodu u obilazne tunele. Grade se obično udvojene: jedna sa uzvodne a druga sa nizvodne strane gradevinske jame.



Sl. 2. Niske brane. a) presjek nesute brane, sa nizvodne strane osigurane gabionima (brana na Savi kod Javornika u Sloveniji; zbog specifične namjene nema nepropusne jezgre), b) presjek drvene brane, c) presjek kroz potkretnu branu (kupalište Benteba na Miljacki u Sarajevu); brana ima samo jedno protoco polje širine 20 m. Kroz prag prolazi 6 ispusta sa segmentnim ustavama koji su omogućili montažu a sada služe za ispuštanje vode sa dna.

Niske brane mogu biti nepokretnе ili pokretnе. Nepokretnе brane mogu biti betonske ili od kamena, zidane u malteru odnosno u suho, ili pak od miješanog materijala, kao npr. od drveta i ka-

mena; mogu biti izgrađene i od žičanih korpi ispunjenih krupnim kamenjem (gabiona, sl. 2a); čelične brane kombinuju se sa betonskim osloncima i sl. Danas se ovakvi materijali vrlo rijetko upotrebljavaju za izradu brana, i to samo za manje visine. Na sl. 2b pokazan je karakterističan presjek jedne drvene brane. Brane sličnih tipova mogu se u nas vidjeti na manjim rijeckama kao objekti uz vodenice ili pilane. Pokretne brane sastoje se od masivnog dijela, izgradenog od betona ili zida od kamena u cementnom malteru, i od pokretnog dijela koji čine ustave (zapornice) obično od metala, ponekad i od drveta (sl. 2c).

VISOKE BRANE

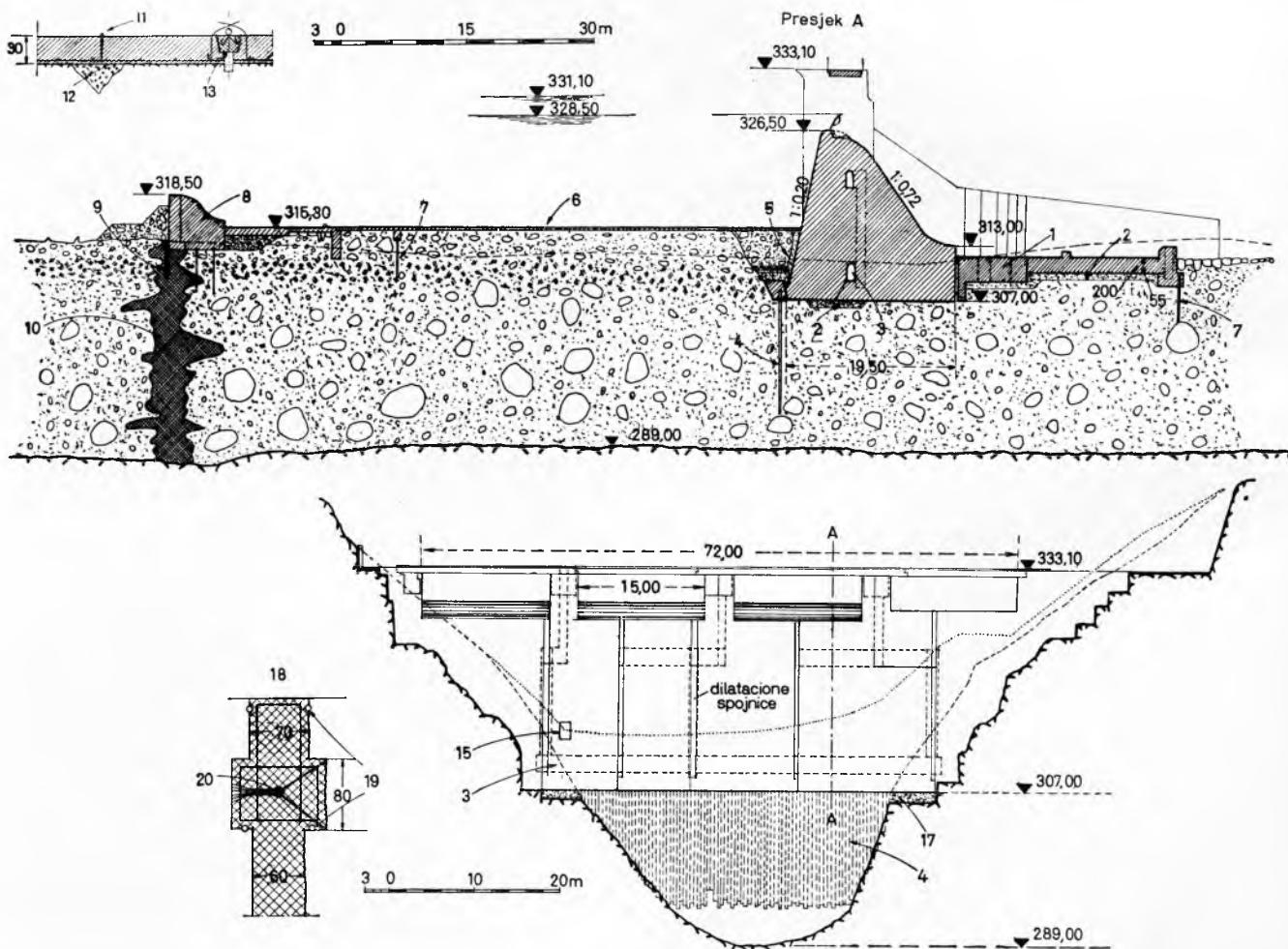
Visoke brane (dolinske pregrade, vodojaže, franc. *grands barrages*; engl. *large dams*, ruski *высокие плотины*; njem. *Talsperren*, tal. *grandi dighe*) služe formiraju umjetnih jezera, odnosno akumulacionih bazena za razne vodoprivredne i elektroprivredne svrhe. Tako, npr., jezero brane Grošnica kod Kragujevca (građevna visina 40,7 m) služi za snabdijevanje grada pitkom vodom; buduće brane na Miljacki, uzvodno Sarajeva, služit će za formiranje akumulacija za snabdijevanje korita Mljacke u gradu svježom vodom u doba ljetnih sušnih perioda i za povećanje protoka vode u rijeći Bosni nizvodno od grada, gdje se nalazi industrija. Brana Grančarevo na Trebišnjici služit će za zaštitu Popova Polja od poplava i za navodnjavanje. Visoke brane na zapadu USA služe, uglavnom, za navodnjavanje Kalifornije i susjednih pustinjskih područja i za opskrbu pitkom vodom. Brane na ruskim rijeckama služe za poboljšanje plovidbe, zaštitu od poplava itd. Većina ovih brana ujedno služi za proizvodnju

velikih količina električne energije u hidroelektranama koje su vezane za njih i bez kojih ne bi bila ekonomična izgradnja takvih velikih i skupih objekata.

Znatan porast potrošnje električne energije daje poticaja za intenzivnu izgradnju visokih brana u cilju stvaranja akumulacionih bazena sa zadatkom da se neravnomerni prirodni protoci na rijeckama prilagode relativno konstantnim potrebama energije. Sa druge strane, intenzivan razvoj poljoprivrede, naročito u područjima tople klime, ne može se ni zamisliti bez navodnjavanja zemljišta. Prema tome se interesi elektroprivrede i poljoprivrede obično poklapaju, i svaka brana izgrađena u elektroprivredne svrhe može obično da služi i za potrebe poljoprivrede. Katastrofalni uticaj sušnih godina, sa gledišta poljoprivrede, zahtijeva izgradnju jezera tolike veličine da se zadržava voda iz niza vlažnih godina može iskorištavati u sušnim godinama.

Visoke brane grade se i isključivo za potrebe elektroprivrede, što dokazuju mnogobrojni primjeri, naročito u Norveškoj, Švedskoj, Italiji, Švajcarskoj, pa i u našoj zemlji (Moste na Savi visine 51,5 m, Jajce II na Vrbasu visine 21,5 m, Lokvarka za HE Vinodol u Gorskom Kotaru, visine 51,0 m). Isto tako grade se brane i isključivo za poljoprivredne ili industrijske svrhe (u našoj zemlji brana Lipkovo u Makedoniji visine 38,0 m, za navodnjavanje, Modrac na Spreči kod Tuzle, visine 27,0 m, za potrebe industrije).

Prema materijalu od kojeg se grade visoke brane razlikuju se: *masivne brane* od kamena ili betonskih blokova zidanih u suho, od kamena u malteru, od betona i od armiranog betona; *nasute brane* od zemlje, pijeska, šljunka ili kamena.



Sl. 3. Uzdužni i poprečni presjek kroz pomoćnu i glavnu branu hidroelektrane Jajce II na Vrbasu. Brana je gravitacionog tipa, fundirana srednjim dijelom na sloju nanosa debeline 20 m. Četiri srednjih bloka fundirana su na nanosu, a dva krajnja na stjeni. Zbog boljeg prilagođavanja većim slijeganjima most je izveden kao Gerberov nosač. 1 slapište, 2 filterski sloj, 3 kontrolni hodnici za osmatranje, 4 čelično žmurnje sistema Larssen, 5 osiguranje spoja s branom pomoću sloja gline, 6 horizontalni sag od betonskih ploča, 7, 8 i 9 pomoćna brana sa zagatima, 10 injektionska zavjesa radi osiguranja izgradnje u suho, 11 sastavljanje ploča saga pomoću bitumen, 12 glineni sloj koji osigurava spoj ploča od propuštanja, 13 osiguranje saga protiv uzgona izvršeno betonskim ventilima, 15 temeljni isput, 17 uvaljani sloj kao jastuk na dijelu srednjih blokova koji leže iznad stijene, 18 detalj čepa na uzvodnoj strani dilatacionih spojnice između blokova, 19 impregnirano i katranisano uže ϕ 45 mm, 20 cijev za injektiranje spojnice.

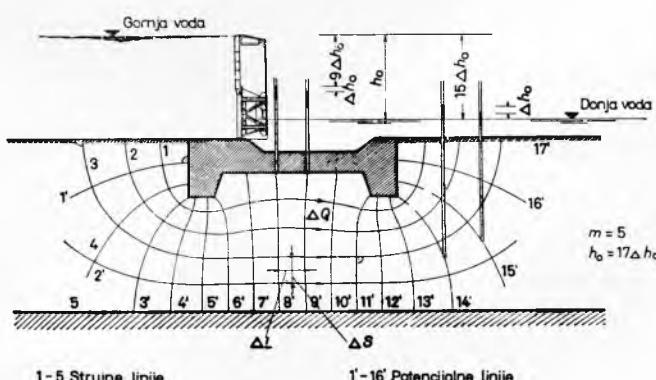
Masivne brane

Na masivnoj pregradi razlikuju se uzvodni dio (izdignut iznad korita), tzv. *tijelo brane*, koje se suprostavlja pritisku vode, i nizvodni dio, manje više u obliku ploče položene po koritu, koji se zove *slapište*. Prednji dio, obično vertikalni, produžuje se do stjenovite ili nepropusne podloge preko *pražnog zida* ili preko *žmurja*. Na isti način se završava i prag slapišta na nizvodnom dijelu (sl. 3).

Žmurje (priboj), ovisno o visini i važnosti objekta, može biti od drvenih ili armiranih betonskih greda pobijenih jedna uz drugu na utor, ili od specijalnih čeličnih profila (npr. Larssenovih i sl.). Ako je pregrada fundirana na stijeni, dubina pražnog zida koji zaštićuje građevinu od većeg podvirivanja ovisi o kvalitetu stijene i njenoj kompaktnosti. Ako je stjenovita podloga duboko, pražni zid ili žmurje ima zadatak da smanji procjeđivanje time što produžuje put podvirnoj vodi. Srednja filtraciona brzina u nekoj propustljivoj homogenoj sredini proporcionalna je padu pjezemetske linije a određena je Darcyjevim zakonom

$$v = K \cdot \frac{h_0}{L} = K \cdot I,$$

gdje je v brzina kretanja podzemne vode, h_0 razlika u pritisku između gornje i donje vode, L dužina puta oko temelja, I pad pjezemetske linije, K konstanta ovisna o stepenu poroznosti sredine (koeficijent filtracije). Prema Blighovoj empirijskoj formuli potrebna dužina perimetra temelja treba da iznosi $L = m \cdot h_0$ da bi se spriječila opasnost od ispiranja procjeđne vode na nizvodnom kraju pregrade. Vrijednost za m kreće se od 4 (šljunak) do 18 (fini pijesak ili mulj) (sl. 4).



Sl. 4. Stručna slika ispod brane u propusnoj homogenoj sredini. Protočno polje zatvoreno dvodijelnom pločastom ustavom.

Stručna slika ispod građevine može se odrediti matematičkim putem ili grafički, na osnovu ispitivanja na hidrauličkim ili električnim modelima. Ispitivanja na električnim modelima osnivaju se na postojećoj analogiji između razdiobe električnog toka u vodiču i hidrauličkog toka u propusnoj homogenoj sredini. Stručnu sliku čine linije jednakog potencijala i okomito na njih postavljene strujne linije. Slika je neovisna o stepenu poroznosti, a na svakome mjestu daje veličinu pritiska vode na građevinu, što predstavlja uzgon. Ako je poznata vrijednost K , što se obično utvrđuje eksperimentalnim putem na licu mesta, i razlika potencijala h_0 , odnosno Δh_0 , može se na svakom mjestu izračunati brzina procjeđivanja i količina procjeđne vode. Količina procjeđne vode može se mjeriti ispod brane na razne načine. Jedan je, npr., pomoću radioaktivnih izotopa, kao što je bilo učinjeno na brani Rossaupten u Zapadnoj Njemačkoj.

Podviranje može u slučaju kratkog puta i velikog uzgona ugroziti stabilnost objekta jer dovodi do ispiranja čestica i do loma u temeljnog tlu, pa ga treba svesti na najmanju moguću mjeru. Kao preventivna mjera predviđaju se, obično, filteriiza nizvodne nožice brane. Put procjeđnoj vodi može se produžiti i na taj način da se položi sag od betona ili gline na uzvodnoj strani tijela brane. Zaštita protiv procjeđivanja na stjenovitoj podlozi vrši se danas, obično, injektiranjem spoja između tijela brane i osnove. Sa visinom brane povećava se dubina *injekcione zavjese*; kod veoma propusnih stijena ona može preći visinu brane. Pre-



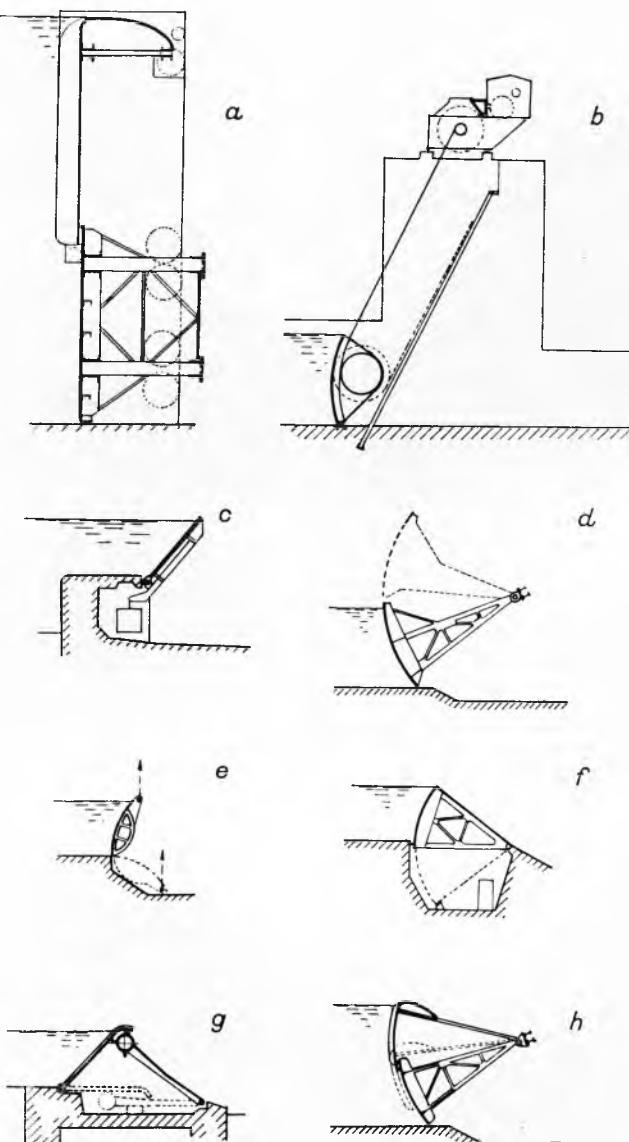
Sl. 5. Hidroelektrana Ybbs-Persenbeug na Dunavu u Austriji. Uspor vode visine 11 m čini pet protočnih polja s ustavama; centrala su smještene s obje strane; na lijevoj obali nalaze se dvije brodske splavnice koje omogućavaju istovremenu plovidbu u oba smjera

velika filtracija kroz raspucali krečnjački desni bok ugrozila je u decembru 1959 branu Idbar u slivu Neretve izazvavši, zbog neizvršenog injektiranja, velika odronjavanja ispiranjem, što je poremetilo stabilnost desnog boka. Brana je sačuvana tako da je jezero bilo ispraznjeno prisilnim putem, miniranjem otvora u dnu brane.

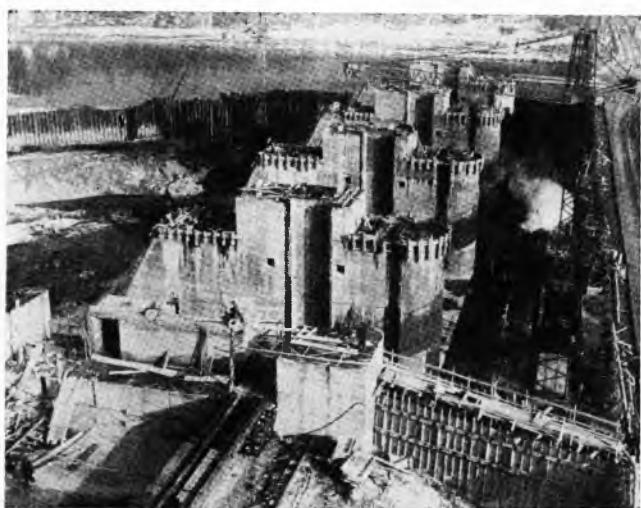
Masivne pregrade stalnog karaktera danas se grade gotovo isključivo od betona. Glavni problem u vezi s ovim branama predstavlja propuštanje velikih voda. Postojeće saobraćajnice, naselja i drugi objekti obično ograničavaju dopuštenu visinu uspora u jezeru, tako da se rijetko dopušta veće povišenje vodostaja pri nadolasku velikih voda. Problem se rješava ostavljanjem tzv. protočnih polja u tijelu brane, na kojima se smještaju pokretnе ustave. Visina ustava, širina i broj protočnih polja zavise od lokalnih topografskih i hidroloških uslova; one mogu da obuhvate cijelu dužinu brane ili samo jedan dio (sl. 5). Širina jednog polja može da iznosi do 50 m kod valjkastih tipova ustava. Kod drugih vrsta ona obično ne prelazi 30 m. Najviše ustave ne prelaze visinu od 20 m. One mogu biti čelične ili, u slučaju manjih raspona i visina, kombinirane sa drvetom. Postoje tri glavna tipa ustava: *podizne* (sl. 6), *preklopne* i *krovne*. Prve imaju prednost da omogućavaju bolje ispiranje



Sl. 6. Brana hidroelektrane Gráda u Švedskoj. Protočna polja imaju segmentne ustave podiznog tipa, koje se danas vrlo često primjenjuju jer su najlakše. Korito između zgrade centrale i protočnih polja služi za propuštanje debala



Sl. 7. Ustave (u presjeku). a) dvostruka podizna ustava s kukom, na točkovima, b) valjkasta ustava, c) preklopna ustava s protutegom na betonskom pragu, d) jednostavna segmentna ustava, e) preklopna ustava tipa »riblji trbuš«, f) sektorska ustava s osovinom na nizvodnoj strani (drum gate), g) krovna ustava, h) sektorska ustava s kukom



Sl. 8. Izgradnja protočnih polja hidroelektrane Schärding na Innu u Austriji, unutar zagata prve faze. Veliki žljebovi predstavljaju mjesto za vodice glavnih ustava a mali za pomoćne ustave koje omogućavaju privremeno izoliranje jednog polja za slučaj remonta. Širina polja iznosi 24 m a visina ustava 11 m

nanosa sa dna, koji može ugroziti jezero ako se povremeno pri većim vodama ne ispira. Druge omogućavaju automatsku regulaciju nivoa pomoću plovaka. Na niskim branama obično se upotrebljavaju samo ustave podiznog tipa. Pogon ustava može biti hidraulički, električni ili ručni. Električni ili ručni pogon obavlja se putem prenosa i vitlova, koji mogu biti smješteni bilo iznad protočnog polja ili u stupovima sa strane. On može biti obostran ili jednostran. O potrebnoj veličini prostora obično ovisi i širina stupova, koja se kreće od 2 do 6 m.

Prema načinu kretanja podizne ustave mogu biti: a) sa translatornim kretanjem: gredne, igličaste i pločaste ustave; b) sa rotacionim kretanjem oko osi izvan tijela brane: segmentne, valjkaste ustave; c) sa rotacionim kretanjem oko osi u tijelu brane, pričvršćenoj na prelivnoj kruni ili na pragu brane (preklopne ustave): ravne, tipa riblji trbuš, ustave sa protutegom, sektorske i krovne ustave (sl. 7).

Gredne ustave se sastoje od horizontalnih greda, spojenih medusobno na utor i pero ili sa brtvama. Presjek greda zavisi od raspona polja i od dubine vode. Kad su veličine otvora manje, srednje grede su obično hrastove i sve jednake debljine, dimenzionirane prema najvećem pritisku, koji djeluje na dnu ustave:

$$\sigma_{\text{drv}} = \frac{M}{W} = \frac{\gamma t h b^2}{8 W} \leq \sigma_{\text{dop}} = 80 \text{ kp/cm}^2,$$

gdje je t dubina vode, h visina grede, b raspon između osi ležajeva grede, W moment otpora grede. Za veće raspone upotrebljavaju se I-nosači sa umecima od drveta. Zbog spore manipulacije pri dizanju i spuštanju upotrebljavaju se danas samo na manje važnim objektima ili kao tzv. pomoćne ustave na većim objektima.

Igličaste ustave mogu biti izradene od drveta, cijevi ili ploča, položenih u nagibu približno 1:0,2 jedna uz drugu, u uspravnom položaju. U pragu se obično ulazu u posebne utore a na površini vode se oslanjaju na posebnu čeličnu konstrukciju. Zbog uzgona teško se može manipulirati drvenim ustavama debljina od 10 cm i duljina od 5 m. Cijevi su Mannesmannove i obično na dnu zatvorene kako bi se mogao iskoristiti efekt uzgona, koji smanjuje težinu. Proračunavaju se kao grede na 2 ležaja. Zbog slabog brtvljenja mora se sa uzvodne strane sipati piljevina i usitnjena šljaka. To takve ustave čini nepodesnima, pa se danas upotrebljavaju isključivo još kao pomoćne ustave.

Klizne pločaste ustave kreću se u žlijebu ili utoru stupova koji im služe kao oslonci u protočnim poljima (sl. 8). Izvode se od drvenih greda ili su čelične konstrukcije. Pokreće se obično pomoću 2 zupčaste poluge sa pogonom preko zajedničke osovine. Utori služe ujedno kao vodice i obloženi su valjanim profilima, usidrenim u beton stupova. Zaptivanje je dobro i nije potrebno bočno brtvljenje.

Otpor koji treba savladati pri podizanju malih ustava iznosi $P = W\mu + G$, gdje je $W = \gamma \cdot \frac{h^2}{2} \cdot b$ pritisak vode, h visina uspora, b širina ustave, G težina ustave i eventualnih tereta, μ koeficijent trenja pri kretanju (varira od 0,1 do 0,45 ako kliže čelik po čeliku ili hrastovo drvo po čeliku). Mehanizam za dizanje mora biti podešen tako da se ustava može izdignuti bar 0,5 m iznad nivoa najviše vode, kako bi ispod nje mogli proći plivajući predmeti.

Ako su rasponi veći a time i opterećenja, ustave se izrađuju isključivo od čeličnih profila i ploča, a kretanje se vrši zbog velikog trenja samo po točkovima. U tom slučaju jedan od glavnih problema predstavlja dobro zaptivanje. Načini brtvljenja prikazani su na slici 9. Kad su visine veće, pa su ustave dvostrukе, jedan dio gornje ustave može imati oblik kuke, da bi se omogućilo prelijevanje.

Segmentne ustave. Težnja da se izbjegne trenje klizanja ili kotrljanja pri radu sa zatvaračem dovela je do konstrukcije ustava koje se kreću oko horizontalne osovine a uspor vrše pomoću kružno ili cilindrično zakrivljenih ploča sa potrebnim ukrućenjima. Tijelo segmentnih ustava naliježe na dvije poluge koje preko okretnog zgloba prenose silu na oslonce. Kako je ustava kružnog oblika, hidrostaticki pritisak prolazi kroz tačku okretanja, čime se izbjegava okretni moment pri podizanju ustave. Preko ustave ovoga tipa ne dopušta se prelijevanje, nego voda ističe ispod ustave. Uredaj za pokretanje sličan je uredaju na pločastim ustavama, ali jer je

potrebna sila manja bar za 10%, ustava je ekonomičnija za visoke pritiske. Velika je prednost tih ustava da su ležajevi smješteni iznad nivoa vode i u vijek dostupni, ali je nedostatak što su okretni zglobovi jako opterećeni, pa o njihovoj dobroti ovisi trajnost ustave.

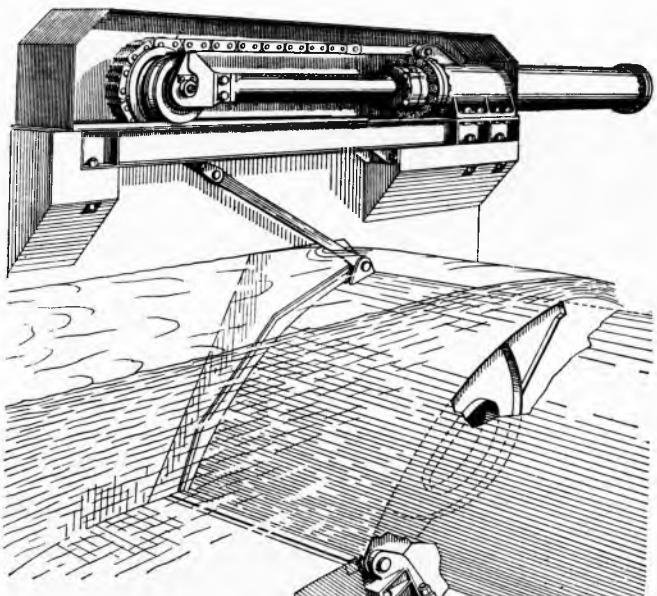
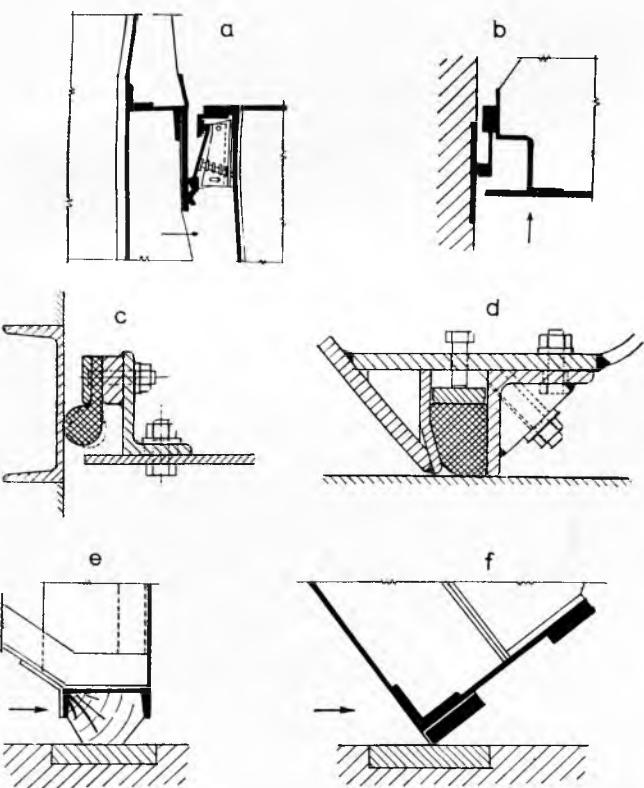
Valjkasta ustava predstavlja šuplji čelični cilindar koji se kreće po kosoj pruzi. Cilindar je otporan na torziju pa je dovoljno primjeniti pogonski mehanizam samo na jednoj strani. Pokretanje se vrši Gallovim ili MAN-lancem. Takve ustave su naročito pogodne za velike otvore. Danas se rijetko upotrebljavaju jer traže veće dimenzijske stupova.

Preklopne ustave su čelične konstrukcije sa uspornom plohom od čeličnog lima kad su veće, ili od drveta kad su manje. Pokreću se, sa obje strane ili jednostrano, u ležajevima koji su pričvršćeni duž praga protočnog polja. Ako se ustava uspravlja pod pritiskom vode, moment raste sa trećom potencijom visine uspora, pa se često stavljuju protutegovi, smješteni u pragu ispod ustave ili iznad nivoa vode, čime se moment smanjuje. Normalno se ustava pokreće mehaničkim putem motorima ili hidraulički pomoći uljnih cilindara (sl. 10 i 11).

Kad je zavješenje jednostrano na većim rasponima, povećane momente torzije i savijanja preuzimaju ukrućenja ustave u obliku cilindara ili poput ribljeg trbuha. Izborom pogodnog oblika može se postići minimalno opterećenje od vode u svakom položaju ustave. Preklopne ustave ne mogu se upotrijebiti za visine preko 6 m, a često se primjenjuju kao gornji dio podiznih ustava, čime se omogućava preljev. U tom slučaju moraju biti tako konstruirane da se preljevni mlaz može prevesti bez štete po donju konstrukciju.

Na svim preljevnim ustavama mogu se javiti vibracije uslijed stalnih dinamičkih naprezanja, što u izvjesnim uslovima ugrožava stabilnost konstrukcije. Da bi se to spriječilo, treba osigurati potpuno ozračivanje preljeva putem velikih kanala za dovod zraka u stupovima, koji prema Dubsu zavise o dužini preljeva L i visini preljevnog mlaza h . Presjek kanala $F = 0,005 L h$. Osim toga treba izvesti što kruće fundiranje pragova.

Krovna ustava je stvarno dvostruka preklopna ustava; ona se sastoji od uzvodne glavne ustave oslonjene na nizvodnu ustavu, kao potporu. Obje su pričvršćene na prag pomoći zglobova. Pro-



stor ispod tako oblikovanog krova povezan je kanalima sa gornjom i donjom vodom, što omogućava da se putem posebnih zatvarača ustava stavlja u bilo koji željeni položaj. Pogodna je za niske pragove, jer inače traži velike betonske radove u temeljima. Skuplja je od preklopne ustave, ali se da bolje regulirati.

Sektorske ustave su dio kružnog cilindra koji se kreće oko pokretne osovine pričvršćene za donji, masivni dio brane, u koji se mogu u spuštenom položaju potpuno upustiti. Pogon im je obično hidraulički i prostor za upuštanje vezan je za donju i gornju vodu. Ustava je slabo napregnuta savijanjem i torzijom i u uzdužnom smislu ne mora preuzimati velike sile od pritiska vode i vlastite težine, jer se hidrostatički pritisak prenosi direktno na masivnu podlogu. Osovina joj može biti smještena sa uzvodne ili nizvodne strane. Pogodniji je nizvodni položaj jer je lakša kontrola i održavanje. Nisu pogodne na branama gdje voda pronosi mnogo nanosa, a ni za velike visine uspora. U dužini su praktično neograničene jer se oslanjaju na cijeloj dužini protočnog polja. Ovaj tip ustave izrađen je prvi put u USA, a poznat je pod imenom »drum gate«.

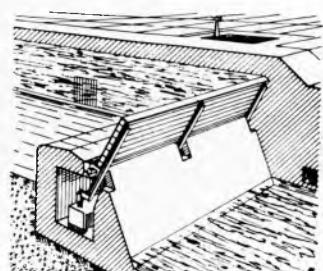
Ukoliko ustave ne dopiru do dna korita, treba u brani predvidjeti ispuste koji omogućavaju ispiranje nanosa i pražnjenje jezera za slučaj nužde. Oni su snabdjeveni podiznim ustavama, najčešće na hidraulički pogon. Jezera kod nižih branu može nanos u kratkom periodu od nekoliko godina potpuno zapuniti ako se ne ispiru i ako se ne pristupi uređenju bujičnih tokova u sливном području.

Ako iznad brane postoji dovoljna raspoloživa visina, mogu se evakuirati vode slobodnim preljevanjem preko njene krune. *Kruna brane*, odnosno prag ispod ustave pri slobodnom preljevu, mora imati odgovarajući hidraulički oblik koji osigura priljubljenost mlaza prilikom preljevanja. U suprotnom slučaju došlo bi do oštećenja nizvodnog dijela tijela brane zbog djelovanja vakuuma. Creager je utvrdio profil koji zadovoljava taj uslov i daje dobar koeficijent preljevanja.

Preljevna količina vode (volumen u jedinici vremena) utvrđuje se po obrascu

$$Q = mlh \cdot \sqrt{2gh},$$

gdje je l dužina preljeva, h visina mlaza uzvodno od brane, na mjestu gdje se još ne osjeća kontrakcija, m koeficijent preljevanja. Vrijednost tog koeficijenta varira od 0,45 do 0,54, ovisno o visini



mlaza, a iznosi 0,47 za oblik krunе koji odgovara visini mlaza. Vrijednost 0,54 može se postići visinom mlaza jednakom 1,65 visine za koju je izabrat oblik krunе, kako je to utvrdio Goljevšček. Navedena formula važi ako se maksimalna visina vodostaja nizvodno od brane nalazi na nižoj koti od krunе preljeva, tj. ako je preljev slobodan. Ako je preljev djelomično potopljen, tj. ako je nivo donje vode viši od krunе praga, kao što je obično u slučaju niskih brana, količina se smanjuje te važe drugi obrasci.

Voda koja se prelije preko praga ili preko krunе brane ima veću potencijalnu energiju nego što je potrebno za njeno ravnomjerno kretanje prilikom silaza u slapište. Usljed toga dolazi do silovitog kretanja i do vodnog skoka na prelazu mlaza u korito rijeke. Ako je brzina u bazenu v_0 , brzina na dnu preljeva će biti $v_1 = \sqrt{2g(d+h)}$. Kako je visina mlaza zavisna od jediničnog proticaja po dužini krunе q , bit će $h_1 = \frac{q}{\sqrt{2g(d+h)}}$.

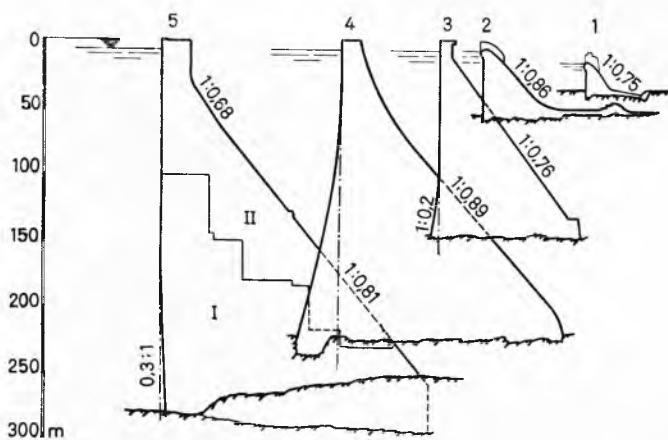
Spregnuta dubina u koritu iza slapišta, potrebna da bi se stvorio hidraulički skok, treba da iznosi

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + \frac{2}{g} \cdot h_1 \cdot v_1^2}$$

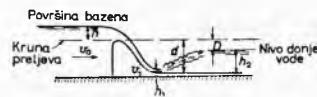
(sl. 12). Ako to nije slučaj, treba osigurati rasipanje viška energije kako bi se postiglo potapanje vodnog skoka, odnosno njegovo približavanje nožici brane. Osiguranjem mirnog kretanja sprečava se podlokavanje korita iza pražnog zida slapišta. Ovo rasipanje energije može se postići produbljenjem korita u slapištu i stvaranjem bučnice ili izradom prepake u koritu koje smanjuju brzinu (kamenje koje strši, pragovi, zubi i sl.). Dužina bučnice treba da je jednaka najmanje četverostrukoj vrijednosti dubine vode h_2 nizvodno od slapišta.

S obzirom na to da spregnute dubine h_1 i h_2 ovise o lokalnim uvjetima, njihova stvarna vrijednost, kao i oblik i dužina slapišta, mogu se tačno odrediti jedino na hidrauličkim modelima. U SFRJ postoje hidrauličke laboratorije u Beogradu, Ljubljani, Zagrebu i Sarajevu. U njima se ispituju modeli naših brana.

Voda se obično ne evakuira preko krunе visokih brana, bilo zbog toga što se ispod brane nalazi centrala ili što se žele izbjegći dinamički udari u blizini temelja i skupo osiguranje korita protiv erozije. U takvim slučajevima može se kruni dati specijalan oblik koji je u Francuskoj ostvario Coyne. Pomoću tzv. skijaškog skoka (v. sl. 22) mlaz se odbacuje dalje od nožice brane (Jablanica), ili sprovodi iznad centrale; simetričnim smještajem takvih preljeva može se postići koncentracija mlaza u sredini korita. Produženjem putanja mlaza povećava se miješanje uzduha sa vodom, što je povoljno u pogledu rasipanja energije prilikom pada, jer se zbog veće zapremine postiže veća dubina vodostaja.



Sl. 13. Karakteristični presjeci nekih savremenih gravitacionih brana: 1 Gorica na Trebišnjici (visina 26 m), 2 Moste na Savi kod Jezenica (51,5 m), 3 Fontana na rijeci Tennessee u USA (146 m), 4 Hoover (Boulder) na rijeci Colorado u USA (221 m), 5 Grande Dixence u Švicarsko (284 m)



Sl. 12. Hidraulički odnosi pri preljevanju vode preko krunе brane

O drugim načinima evakuacije voda mimo krunе visokih brana bit će govora kasnije.

U konstruktivnom smislu masivne brane mogu se podjeliti u 3 glavne grupe: a) *gravitacione brane*, koje se opterećenju od vode i drugih sila odupiru vlastitom težinom (sl. 13); b) *lučne brane*, koje u stvari predstavljaju zakrivljene ploče preko kojih se opterećenje raspodjeljuje na temelje u dnu i na bokovima; ako imaju i neke elemente gravitacionih brana, zovu se lučno-gravitacione brane, a ako su dio rotacionih tijela raznog oblika, zovu se ljkaste ili kupolne brane; c) *raščlanjene brane*, koje se sastoje od više elemenata. Obično su to stupovi ili potpore na koje se oslanjaju ploče ili svodovi. Svaki od stupova mora da prenosi na tlo opterećenje jednog polja. Protočna polja niskih brana su u stvari također brane sličnog tipa, gdje ustave zatvaraju jedno polje.

Proračun masivnih brana. a) *Gravitacione brane*. Na svaku branu djeluju vanjske sile: pritisak vode na uzvodnoj strani, pritisak vode od filtracije (uzgon) na spojnici između temelja i tla, u visokim predjelima pritisak leda u nivou jezera, pritisak zemlje i pritisak eventualno istaloženog nanosa. Unutarnje sile su: vlastita težina, pritisak porne vode, sile koje nastaju uslijed promjene temperature betona i sile uslijed skupljanja betona. Pritisak leda, ovisno o klimatskim uslovima, uzima se, gdje je to potrebno, od 7 do 70 megaponda po linearnom metru krunе, što odgovara debljini leda između 0,5 i 2,0 m. Veličina uzgona iznosi, također na jedinicu dužine,

$$U = 0,5 \cdot a \cdot \gamma_a b(h_1 + h_2),$$

gdje a ovisi o visini brane, karakteru tla, efektu injektiranja nepropusne zavjesa sa uzvodne strane i drugim faktorima, a kreće se od 0,3 do 1,0; γ_a je specifična težina vode, a b širina osnove brane. Smanjenje uzgona se može postići i uspješnim dreniranjem temeljne spojnice u kontrolni hodnik, ali tu drenažu treba stalno održavati. Da bi se smanjio uticaj sile uslijed temperaturnih promjena i skupljanja betona, brane se obično priličkom izgradnje u vertikalni dijele na lamele širine 10...20 m (v. sl. 3). Spojnice (fuge) treba posebno osigurati i injektirati nakon što se beton ohladio. Uticaj seizmičkih pokreta osnove izaziva sile inercije koje su proporcionalne masi brane i seizmičkom ubrzanjem, a ovise o intenzitetu potresa. Zbog toga se ovi uticaji moraju uzeti u obzir u intenzivno trusnim zonama.

S obzirom na važnost pojedinih gore navedenih uticajnih sila, gravitacionu branu treba dimenzionirati tako da uglavnom postoji ravnoteža između pritiska vode i stvarne težine brane, uzimajući u obzir uzgon. Problem se tretira dvodimenzionalno, na vertikalnom elementu brane širine 1,0 m.

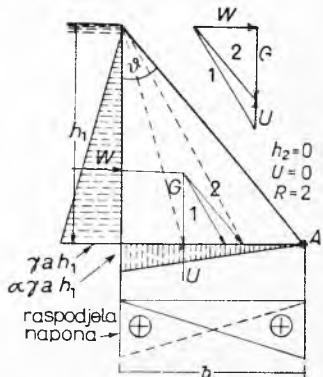
Za stabilnost brane treba da budu ispunjena slijedeća tri uslova: sigurnost protiv prevrtanja, sigurnost protiv klizanja i dokaz da u brani i na kontaktu sa stijenom, odn. tlom, nisu prekoraćeni dopušteni naponi. Vlačni naponi se izbjegavaju jer izazivaju pukotine kroz koje može da prodire voda.

Potprični presjek brane u principu je pravokutan trokut, čiji se vrh nalazi u visini maksimalnog uspora vode a horizontalna baza mu je kontakt brane i tla. Pri određivanju vlastite težine brane G (na jedinicu dužine) treba uzeti u obzir da li je brana preljevna ili nepreljevna, sa mostom ili drugim objektima.

Sigurnost protiv prevrtanja treba ispitati za pun bazen. Da bi se zadovoljio taj uslov, suma momenata obrtanja oko tačke A ,

$$(G - U) \cdot \frac{2}{3} b - W \cdot \frac{h_1}{3},$$

mora biti veća od nule (sl. 14). To se automatski postiže određivanjem dovoljne širine osnove b , koju određuje drugi uslov, sigurnost protiv klizanja. Ona postoji ako je $Wk_s = \Sigma Vf$, gdje je k_s koeficijent sigurnosti, koji u graničnom slučaju mora biti bar 1, a obično se ovisno o visini brane traži do 1,3; f je koeficijent trenja između betona i podloge, koji se kreće od 0,2 do 0,8, zavisno



Sl. 14. Shema osnovnih opterećenja gravitacione brane

od toga da li je podloga glinoviti materijal, šljunak ili stijena određenog kvaliteta. Kako je ΣV ukupna vertikalna sila, predstavlja $\Sigma V \cdot f$ silu trenja. Iz toga proizlazi u idealnom slučaju, kada nema uzgona, da je $\Sigma V = G$, pa je

$$k_s = \frac{f \cdot G}{W} = \frac{f \cdot \frac{1}{2} b h_1 \gamma_m}{\frac{1}{2} h_1^2 \cdot \gamma_a} = f \frac{b}{h_1} \frac{\gamma_m}{\gamma_a},$$

gdje je γ_m zapreminska težina materijala brane, obično 2,3...2,4 Mp/m^3 ; γ_a je specifična težina vode = 1,0 Mp/m^3 ; $f = 0,65$ u slučaju dobre stjenovite podloge. U tom slučaju treba dakle, za $k_s = 1$, da minimalna širina osnove brane iznosi $0,67 h_1$, jer je $a = 0$. Time je ujedno određen nagib nizvodnog lica brane, jer je $0,67 = \tan \theta$. Ako postoji uzgon, što je gotovo uvijek slučaj, širina osnove treba da se proširi i pri $a = 0,8$ iznosi $b = 0,82 h_1$.

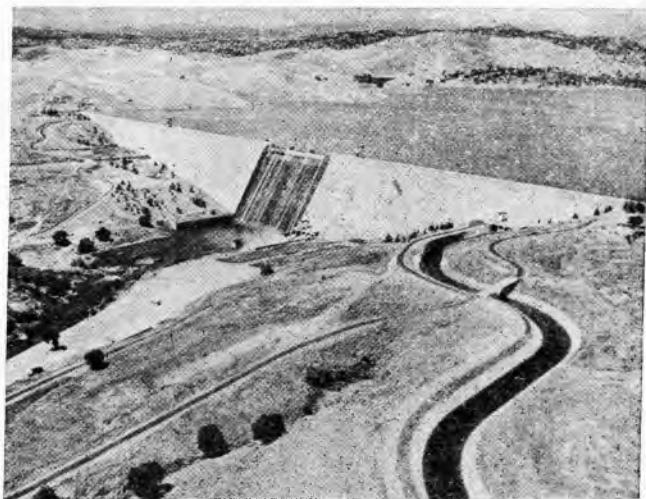
Uslov da ne smije biti vlačnih napona zadovoljen je time što se ne dopušta da rezultanta R svih sila prolazi izvan srednje trećine osnove. Kad je brana neopterećena, sila G mora isto tako da prolazi kroz uzvodnu tačku jezgre. Ispitivanje se vrši za više presjeka na karakterističnim mjestima, a svakako na svakih 5 ili 10 m. Napon u horizontalnim spojnicama raspodjeljuje se po zakonu trokuta, pa je u slučaju punog bazena normalni vlačni napon jednak nuli na uzvodnoj strani, a u slučaju praznog bazena na nizvodnoj strani (sl. 14). Dimenzioniranje se može provesti grafičkim putem ili analitički, po pravilima statike. Osim normalnih tlačnih napona treba proračunati glavne napone koji se javljaju na vanjskim stranama brane. Oni su najveći na nizvodnoj strani, u najnižem horizontalnom presjeku, a njihove veličine mogu se dobiti analitički ili pomoću Mohrova kruga, kad su proračunati i tangencijalni naponi.

Danas se gravitacione brane dimenzioniraju približno, zatim se jedan element može ispitati pomoću metode fotoelastičnosti ili na drugi način, i na osnovu toga izvršiti korekcija profila. Za betonske gravitacione brane maksimalni dopušteni tlačni naponi obično ne prelaze $45 kp/cm^2$; maksimalni tangencijalni naponi mogu doseći vrijednosti od $22 kp/cm^2$, što daleko prelazi normalne dopuštene tangencijalne napone na betonu, tj. $4 kp/cm^2$. To se međutim može dopustiti jer pri velikim tlačnim naponima raste i otpornost materijala na smicanje. Prema tome je za dimenzioniranje mjerodavna isključivo veličina glavnih normalnih napona.

Danas se uglavnom grade betonske gravitacione brane (sl. 15), a rijetko kada gravitacione brane od kamena u cementnom malteru. Na slabom tlu grade se gravitacione brane zidane od kamena ili betonskih blokova u suhu. Sve vrste ovih brana mogu biti građene u pravcu ili zakriviljene. Brane od kamena zidana u suho grade se ako je nabavka cementa skupa, a nema dovoljno materijala za nasute brane. Mada karakteristike zida u suho isključuju primjenu istih kriterija kao za gravitacione brane od betona, koje se mogu smatrati čvrstim homogenim elastičnim tijelom, ipak se pri orientacionom dimenzioniranju pribegava primjeni istog postupka. Da bi se održao jednolik raspored napona u svakom slučaju opterećenja, rezultanta mora da pada u sredinu horizontalnog presjeka. Taj uslov zahtijeva oblik brane sa simetrično nagnutim kosinama $1:0,7$. U praksi nagibi iznose obično $1:1$ do $1:1,7$. Na taj način se postiže i dovoljna sigurnost, koja ne smije da bude manja od $1,5$. Taj nagib strana zavisi u stvari od stepena zbijenosti zida, odnosno od njegove prostorne težine (v. sl. 16). Izgradnja takvih brana je skupa jer ne dopušta primjenu mehanizacije. Kosine se oblažu krupnim kamenjem (200...300 kg) ili lomljениm kamenom u cementnom malteru, ili pak blokovima. Slijeganje ovih brana je manje nego slijeganje brana od kamenog nabačaja. One su povoljne u zonama zemljotresa. Zbog toga su gradene u Italiji, Alžiru, Meksiku, USA. Da se kamen ne bi morao slagati, danas se rade ispunje u rinfuznom stanju, koje se zbijaju mamut-pervibratorima. Ne-propusnost za vodu, sa uzvodne strane, postiže se stavljanjem pokrova od armiranog betona, drveta ili asfalta. U Italiji se grade brane ovog tipa od betonskih blokova $4 \times 5 \times 3$ m, a reške između njih, debljine 12 cm, ispunjavaju se pijeskom. Počeo ih je primjenjivati Marcello (sl. 17). Uzvodni pokrov izrađen je od linjenih ploča debljine 6 mm, koje su elastično spojene.

b) *Lučne brane* nastale su zbog težnje da se štedi na troškovima i vremenu građenja. Statički djeluju na principu da se teret

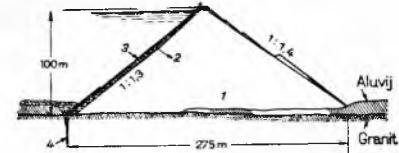
raspodjeljuje na temelje i na bokove brane. Zbog smanjenih dimenzija imaju mnogo veće deformacije, pa je za njih od velikog značaja i pitanje čvrstoće betona. Ekonomija u dimenzijama u



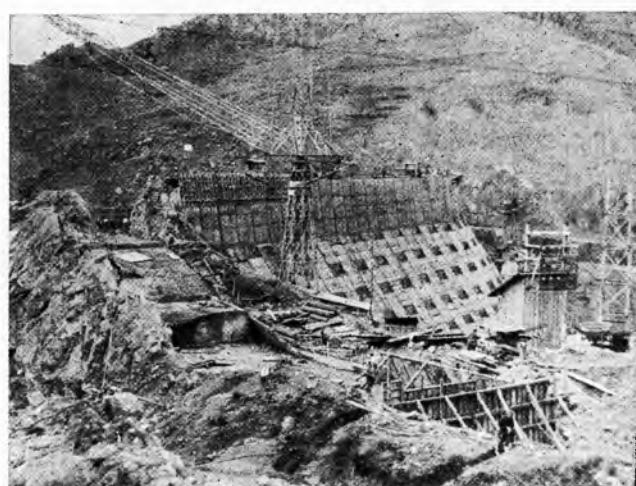
Sl. 15. Betonska gravitaciona brana Friant u Kaliforniji, visine 97 m, izgrađena 1942. Dužina u kruni iznosi 1047 m, zapremina betona 1,6 miliona m^3 . Služi za navodnjavanje i sprečavanje poplava

odnosu na gravitacione brane iznosi 30...75%, zavisno od topografskih i geoloških uslova profila u kojemu se grade. Izrađuju se od betona, armiranog betona, a i od kamena. Mogu se primijeniti veoma vitke konstrukcije, do odnosa širine profila prema visini brane $L/h = 2$. Normalni odnos za deblje konstrukcije

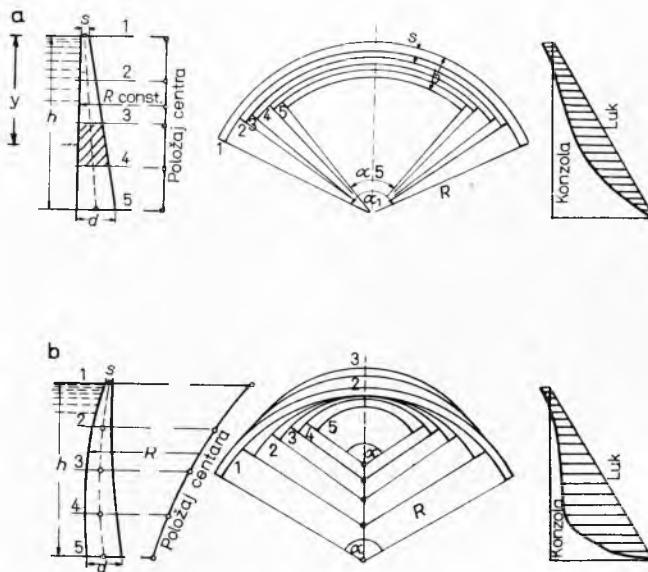
Sl. 16. Gravitaciona brana Salt Springs izgrađena u Kaliforniji 1931 na granitu. 1 kamen u suho, u rinfuzi, 2 zid od kamenih blokova (u suho) veličine do 15 t, 3 pokrov od armiranog betona, 4 injekciona zavjesa. Zapreminom od 2,4 miliona m^3 najveća je brana ovog tipa



iznosi 3...4. U USA je lučna brana primjenjena i do odnosa $L/h = 9$. Izgradnja takvih brana je najpogodnija u dolinama profila »V«, jer se na taj način sa povećanjem opterećenja smanjuje dužina lukova od krune prema temelju. Dolaze u obzir i drugi oblici doline, ali se teži simetriji oblika, da bi se postigla što jednoličnija raspodjela napona. Ako ne postoji simetrija, primjenjuju



Sl. 17. Brana Pozzillo na Siciliji, u izgradnji, sagradena od betonskih blokova na podlozi od kvarcnih pješčara s proslojcima laporja. Visina 56 m, širina u osnovi 73 m. Poprečni presjek simetričan trokut. Blokovi radeni od betona sa pucolanskim cementom ($150 kg/m^3$ betona, osim u temeljnoj ploči, gdje je koncentrična cementa veća). Zapremina brane 280 hiljada m^3



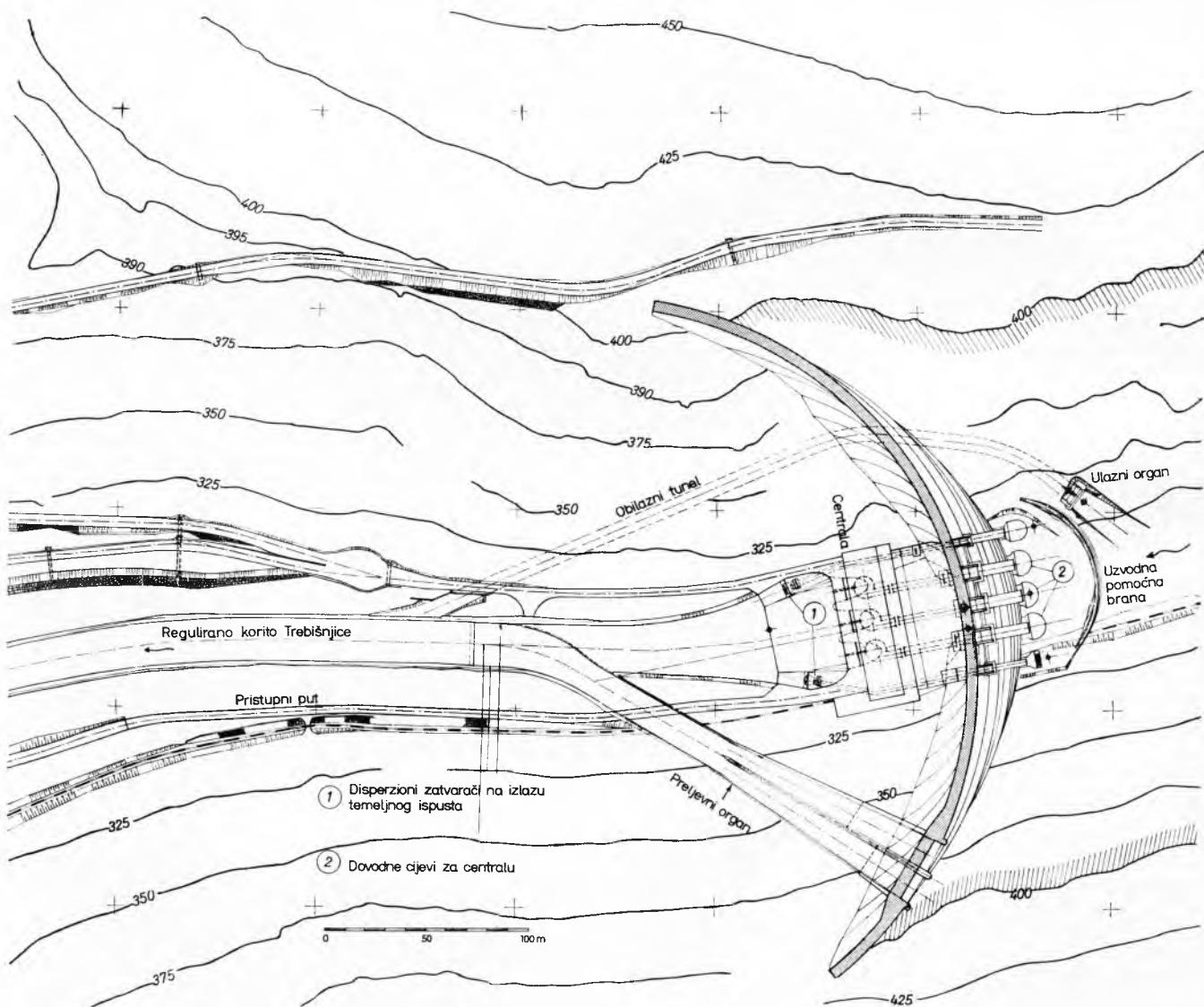
Sl. 18. Karakteristični tipovi lučnih brana. a s konstantnim radijusom i promjenljivim centralnim kutom; uzvodna je ivica vertikalna, b s konstantnim centralnim kutom i promjenljivim radijusom zakrivljenosti; uzvodna ivica zakrivljena. Raspored opterećenja između luka i kôzole

se druga rješenja. Tako je npr. u Italiji Semenza razvio poseban tip sa spojnicom i jastukom po perimetru brane; na taj način eliminiraju se svi loši uticaji nejednolikosti podloge, bilo u profilu bilo sa gledišta geotehničkih osobina.

Da bi lučno djelovanje u brani bilo što veće, da bi dimenzije bile što manje a iskorištenje napona što bolje, mora radijus zakrivljenosti biti malen a centralni kut što veći. Optimalno djelovanje postiže se ako je odnos radijusa R i debljine luka S veći od 4...5, a centralni kut veći od 90° . Pri manjem kutu smanjuje se navedeni odnos, pa konstrukcija počinje sve više da se ponaša kao greda.

Sve lučne brane mogu se svrstati u dva osnovna tipa: lučne brane sa konstantnim radijusom zakrivljenosti i lučne brane sa konstantnim centralnim kutom, kako to pokazuje sl. 18. Prvoimenovani tip odgovara bolje dolini profila »U«, a drugi dolini profila »V«. Ako je kruna brane sa konstantnim kutom izbačena prema nožici, brana postaje kupolna. U cilju povoljnog prenosa sile moraju oslonci biti na čvrstoj stijeni. Pri tom treba težiti za tim da tangenta na luk pri osloncu zatvara sa izohipsom što veći kut (preko 25°). Nepovoljni odnosi u osloncima zahtijevaju duboko ukopavanje, da bi se brana osigurala protiv smicanja. Najstarija lučna brana izgrađena je u XVI v. u Italiji (Ponte Alto u dolini Trente), a u Italiji je i najviša lučna brana, na rijeci Vaint, izgrađena 1960.

Lučna brana bilo kojeg tipa reagira na sile koje je napadaju u višek kao prostorno tijelo. U stvari, radi se o zakrivljenoj



Sl. 19. Situacija objekata brane Grančarevo na rijeci Trebišnjici

ploči promjenljive debljine, fiksiranoj po obodu a sa slobodnim gornjim rubom, dakle o vrlo kompleksnom slučaju elastičnosti, pa teorijska analiza statičkog ponašanja nailazi i uz najjednostavnije moguće hipoteze na velike analitičke poteškoće. Strog

svođ se reducira na kruto zakrivljeno tijelo, određeno trokutastim profilom sa visinom y i horizontalnom stranom proporcionalnom y .

Debljina svoda d izračunava se po cilindarskoj formuli $d = \frac{\rho R}{\sigma_d}$,

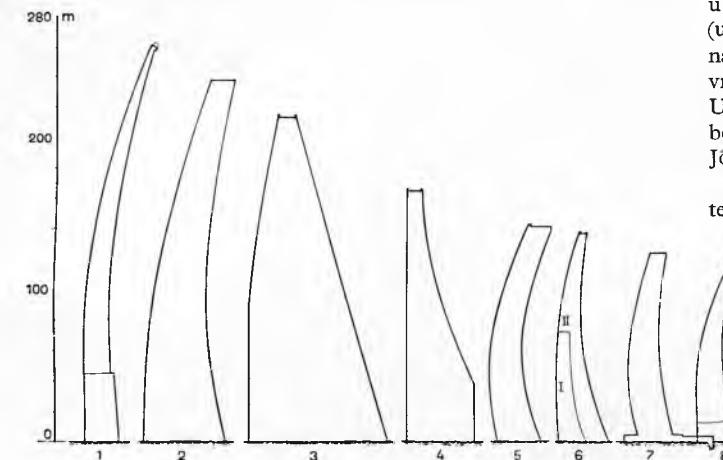
u kojoj znači $\rho = \gamma_a y$, R vanjski radijus, σ_d dopušteni napon (uzima se najviše 250 MPa/m² zbog faktora sigurnosti, a s obzirom na pojednostavljene pretpostavke) (sl. 18). Dimenzioniranje se vrši za pojedine prstenove visine 1,0 m, na svakih 10 m visine. U praksi se postiže najbolja ekonomika sa gledišta zapremine betona ako se centralni kut kreće oko 130°, kako je to utvrdio Jørgensen.

Za manje visine brana može se primijeniti i proračun po teoriji luka. On uzima u obzir i promjene temperature i upetost u osloncima, no kako se ni ovdje ne uzima u obzir saradnja lukova među sobom, koja u svakom slučaju postoji, ne mogu se ni na taj način proračunati naponi vertikalnih elemenata (konzola). Dopušteni tlačni naponi pri primjeni ove metode idu do 60 kp na cm² a vlačni do 16 kp/cm². Naponi u luku izračunati za razna opterećenja sumiraju se, a zbirni naponi ne smiju preći dopuštene napone za određenu marku betona. Obično se uzima da dopušteni naponi ne prelaze 25%

čvrstoće na pritisak betonskih probnih tijela. Brz postupak za određivanje napona u tjemenu i u osloncu svoda razradio je Guidi.

U monolitnoj zasvedenoj brani postoji uvijek otpornost u uzdužnom smislu (u luku) i otpornost u poprečnom smislu (u konzoli); one su jedna od druge zavisne. Stoga se više približuje stvarnosti metoda koja pretpostavlja strukturu brane složenu od sistema prstenova uklještenih među sobom i sistema čistih konzola nezavisnih među sobom, ali na takav način da postoji podudaranje u pomacima za oba noseća sistema. Proračun po metodi luk-konzola, koju je razradio Ritter, sastoji se u određivanju ove statičke veze elemenata oslonjenih jedan na drugi.

Bureau of Reclamation u USA razradio je drugu indirektnu metodu, koja se osniva na suksesivnoj raspodjeli hidrostatičkog opterećenja između luka i konzole, pri čemu se postepeno probno proračunava ugib sve dok se za nj ne dobije približno ista vrijednost. U proračun se uvođi i uticaj deformacija temelja u dnu i u bokovima. Ovaj način afirmirao se pod imenom *trial load method*. Tačan je ali dugotrajan, pa se u Evropi mnogo ne primjenjuje. Osim spomenutih postoje i druge metode, kao npr. Tölkeova i u nas uvedena metoda dr Hajdina iz Beograda. Kada se pomoću jedne od njih dobije slika deformacija odnosno ugiba brane pod uticajem svih sila, ona se, kao i naponi, obično provjerava na prostornom modelu. Najveći svjetski glas na tome polju rada postigao je institut profesora Obertija u Bergamu, Italija. U nas na ovom polju najviše radi Zavod za vodoprivredu »Jaroslav Černi« u Beogradu i zavod za geotehniku i fundiranje u Sarajevu.



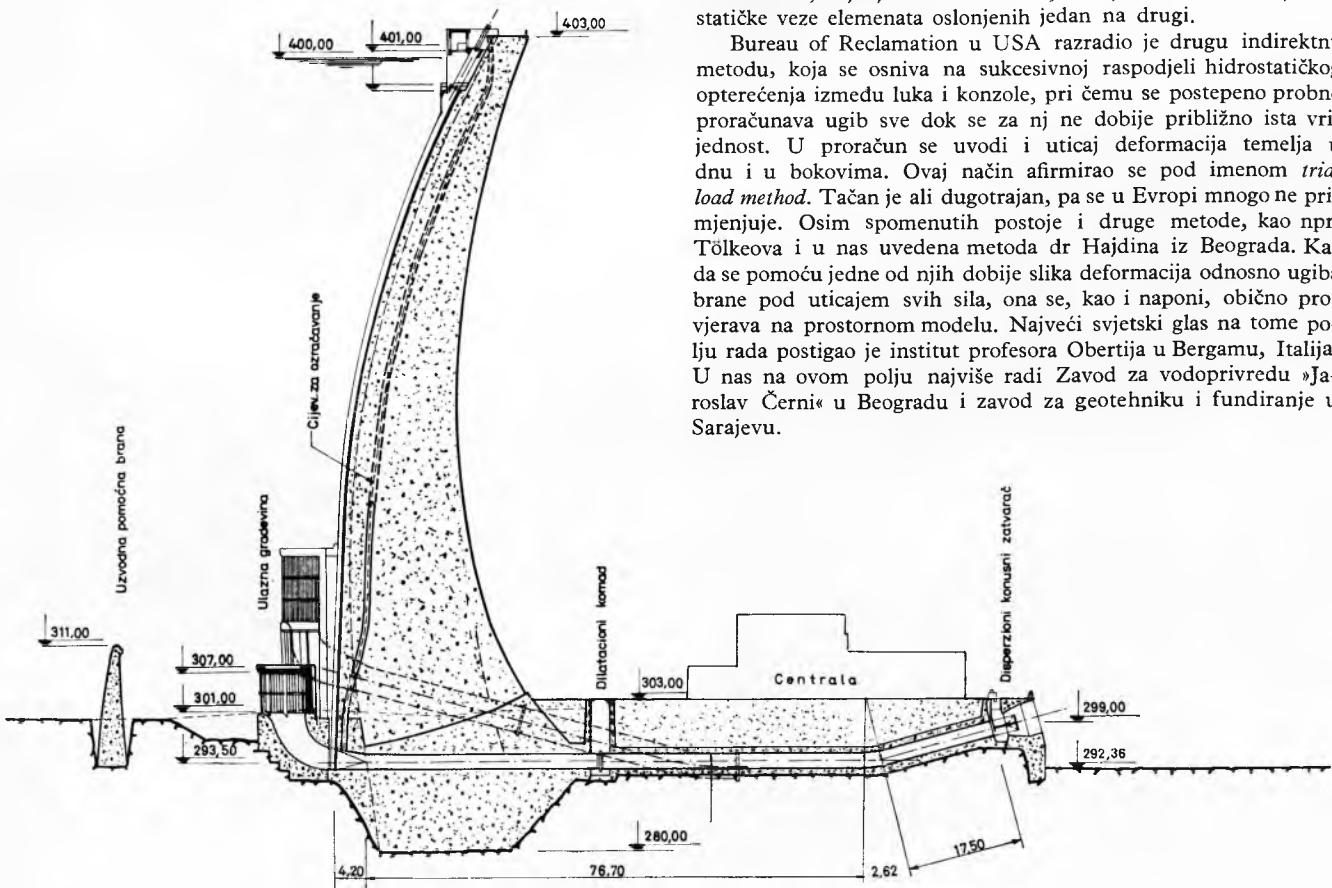
Sl. 20. Karakteristični presjeci nekih lučnih brana. 1 Vaiont (Italija), 2 Mauvoisin (Švicarska), 3 Glen Canyon (USA), 4 Tignes (Francuska), 5 Valle di Lei (Italija), 6 Frera (Italija), 7 Kariba (Južna Rodezija), 8 Grančarevo na Trebišnjici, 9 Castillon (Francuska), 10 Jablanica na Neretvi, II Enchanet (Francuska), 12 Bočac na Vrbasu, 13 Gage (Francuska), 14 Idbar, Bosna

proračun nije moguć, te su metode manje ili više približne. Poznati naučnici na tom polju su Tölke, Stucky, Tonini, Coyne i dr. Najjednostavniji proračun je po cilindarskoj metodi. Ona je gruba, jer smatra da je svod brane sastavljen od horizontalnih neovisnih prstenova — lukova — koji se pod opterećenjem neovisno deformiraju. Ne uzima se, dakle, u obzir međusobna veza lukova, odupiranje o oslonce, uticaj promjene temperature, vlastita težina itd. Osim toga, ta metoda važi samo za lukove konstantne debljine i, u principu, za vertikalne svodove. Uz date uslove

čvrstoće na pritisak betonskih probnih tijela. Brz postupak za određivanje napona u tjemenu i u osloncu svoda razradio je Guidi.

U monolitnoj zasvedenoj brani postoji uvijek otpornost u uzdužnom smislu (u luku) i otpornost u poprečnom smislu (u konzoli); one su jedna od druge zavisne. Stoga se više približuje stvarnosti metoda koja pretpostavlja strukturu brane složenu od sistema prstenova uklještenih među sobom i sistema čistih konzola nezavisnih među sobom, ali na takav način da postoji podudaranje u pomacima za oba noseća sistema. Proračun po metodi luk-konzola, koju je razradio Ritter, sastoji se u određivanju ove statičke veze elemenata oslonjenih jedan na drugi.

Bureau of Reclamation u USA razradio je drugu indirektnu metodu, koja se osniva na suksesivnoj raspodjeli hidrostatičkog opterećenja između luka i konzole, pri čemu se postepeno probno proračunava ugib sve dok se za nj ne dobije približno ista vrijednost. U proračun se uvođi i uticaj deformacija temelja u dnu i u bokovima. Ovaj način afirmirao se pod imenom *trial load method*. Tačan je ali dugotrajan, pa se u Evropi mnogo ne primjenjuje. Osim spomenutih postoje i druge metode, kao npr. Tölkeova i u nas uvedena metoda dr Hajdina iz Beograda. Kada se pomoću jedne od njih dobije slika deformacija odnosno ugiba brane pod uticajem svih sila, ona se, kao i naponi, obično provjerava na prostornom modelu. Najveći svjetski glas na tome polju rada postigao je institut profesora Obertija u Bergamu, Italija. U nas na ovom polju najviše radi Zavod za vodoprivredu »Jaroslav Černi« u Beogradu i zavod za geotehniku i fundiranje u Sarajevu.



Sl. 21. Presjek kroz branu Grančarevo lučno-kupolnog tipa na mjestu desnog temeljnog ispusta. Zapremina betona 370 000 m³

Na sl. 19..22 prikazani su neki karakteristični crteži i slike lučnih brana.

U grupu lučno-gravitacionih brana spadaju lučne brane s odnosom debljine osnove u tjemenu brane prema visini $d/h > 0,35 \dots 0,65$. Zbog relativno velike debljine tih brana, dio opterećenja prenosi se na temelje u dnu doline, a ostali dio na bokove. Proračunavaju se na isti način kao i lučne brane. Brana u Jablanici je toga tipa, s promjenljivim radijusom zakrivljenosti. Najveća je Hungry Horse Dam, visine 172 m, na rijeci Kolumbiji u USA.

c) Raščlanjene brane. Težnja za ekonomikom u gradenju dovela je, kad su profili široki te ne dolaze u obzir lučne brane, do razrade raznih tipova raščlanjenih i olakšanih brana. Time se eliminira uzgon, beton se bolje iskorištava, a vrijeme gradnje se smanjuje. Uglavnom se razlikuju tri tipa brana sa medusobno

Sl. 22. Presjek kroz centralnu konzolu 155 m visoke lučne brane Monteynard na rijeci Drac u Francuskoj, s centralom ugrađenom u samoj brani. Velike vode od 2500 m^3 evakuiraju se preko krune brane pomoću "skijskog skoka"



Sl. 23. Ispitivanje modela brane Grančarevo u institutu prof. Obertija u Bergamu. Model u mjerilu 1 : 80. Ispitivanja su ukazala na mogućnost smanjenja dimenzija za $\sim 7\%$

odijeljenim elementima: olakšane gravitacione, nagnute ploče oslonjene na potpore ili kontrafore i lukovi oslonjeni na isti način. Ako je S razmak između dvije vertikalne ravnine koji omedju svaki element, a L udaljenost između dva susjedna elementa, odnos L/S može se smatrati karakteristikom pojedinih vrsta brana. Za gravitacione brane on iznosi 1, za olakšane gravitacione 1,7, a za brane sa kontraformama 5 (sl. 24). Stabilnost se postiže time što se uzvodna strana zakosi, pa se dobije povećanje vertikalnog opterećenja za težinu vode koja djeluje na tu površinu. Otpor protiv klizanja postiže se dubljim ukopavanjem



Sl. 24. Olakšana gravitaciona brana Ben-Metir u Tunisu, visine 60 m. Razmak kontrafora iznosi 14 m a spojeni su deformabilnim spojnicama (sl. 27). Uzvodni nagib 1 : 0,45. Dovršena 1955

kontrafora u stijenu. Olakšane brane imaju svaki element proširen sa uzvodne strane (sl. 24). Oni mogu biti neovisni ili su po dva među sobom vezani. Zbog medusobne neovisnosti elemenata, olakšane brane su pogodne za izgradnju u potresnim zonama. Pri ovom načinu izrade mogu se postići uštede u betonu do 40%. Marcello je razvio potpuno simetričan profil, čiji je najviši predstavnik brana Ancipa na Siciliji, visine 102 m.

Višelučne brane ili brane sa pločama (Amburseen) daju prednost da se npr. podešavanjem razmaka potpora mogu izbjegći loša mjesta u profilu. Svodovi su uvijek uklješteni u glave stupova, a kod ploča moraju se stavljati spojnice, jer se dužina mijenja uslijed temperaturnih promjena ili bubrenja. Osjetljive su na miraz, oplata je skuplja, ali uštede u betonu i cementu mogu biti i veće od 40%. Najviša višelučna brana je brana Grandval u Francuskoj, visine 88 m, a najviša brana tipa Amburseen brana Escaba u Argentini, visine 87 m. Kod Posušja u Hercegovini izgrađena je 15,5 m visoka višelučna brana Rastovača, a na Spreči kraj Tuzle brana Modrac visine 25 m. Brana tipa Amburseen predstavljaju često zagati koji zatvaraju građevinske jame prilikom izgradnje brana. Korito rijeke Plive u Jajcu također je uredeno pomoću niza niskih brana takvoga tipa, isto tako i sam vodopad.

Gradjenje masivnih brana. Masivne brane manje visine obično se izgrađuju u dvije ili više faza. Korito rijeke pregradi se najprije posebnim zagatom na onoj strani gdje su predviđeni ispusti, a kada se ovi izgrade i opreme, pušta se voda preko njih, a novim zagatom se pregradi preostali dio rijeke. Visina zagata ovisi o trajanju izgradnje i o hidrološkim karakteristikama rijeke. Ona se izabire obično tako da se za vrijeme građevinske sezone ne dopušta preplavljuvanje jame. Pri tom treba ekonomskim analizama utvrditi da li je cijelishodniji zastoj u radovima ili, pak, povišenje zagata. Optimalni položaj najčešće se danas iznalaže na modelima u hidrauličkim laboratorijima.

Za visoke brane takav postupak nije moguć na većim rijeckama, nego se problem rješava tako da se cijelo korito pregradi s pomoću uzvodne i nizvodne pomoćne brane, na dovoljnoj udaljenosti od građevinske jame, a voda se posebnim obilaznim tunelima sproveđe mimo rječnog korita. Za njihove dimenzije važe uslovi koji su navedeni ranije. Tuneli mogu se kasnije potpuno zazidati ili pregraditi čepom koji se može lako minirati u slučaju potrebe. Oni se često pretvore u stalne organe ako se na njih vežu bočni preljevi brane preko kojih se

evakuiraju velike vode u pogonu, ili ako se pretvore u temeljne ispustne (slučaj Jablanice).

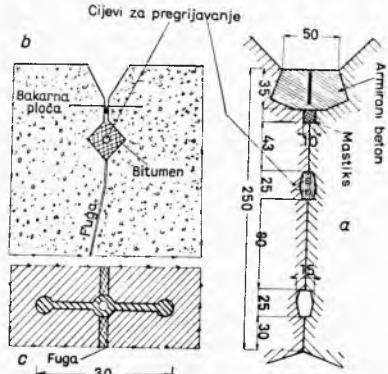
Agregat za betoniranje brana može biti bilo od riječnog šljunka ili od drobljenca određene granulacije, koji mora biti prethodno dobro ispitani. Cement treba da ima što nižu hidratacionu topotu,

betona naglo povećavaju. Beton se ugrađuje pomoću kabel-kranova, toranjskih kranova, derik-kranova ili na drugi pogodan način. Beton se spušta na mjesto ugradnje u posudama koje danas imaju zapreminu i preko 6 m^3 (sl. 26).

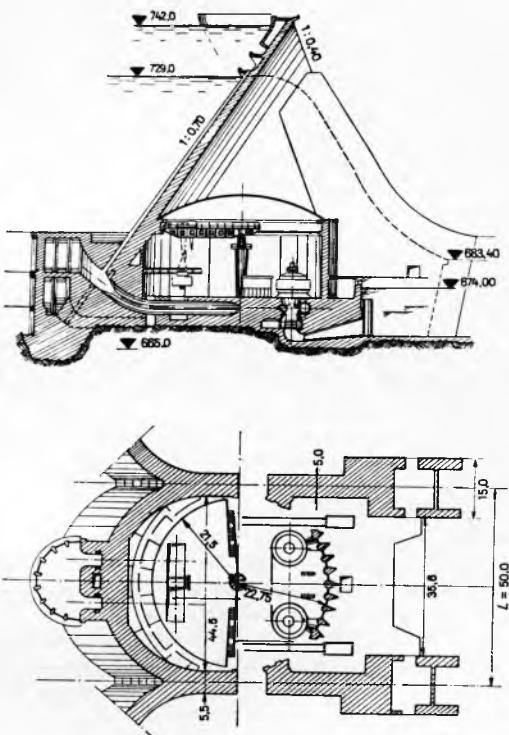
Dnevno napredovanje ugradnje betona danas dostiže nekoliko hiljada kubnih metara. Pri ugradivanju pojavljuje se i ter-

mički problem, jer temperature dostižu 40°C pa i znatno više; ovo se kontrolira sa centralnog mjesto specijalnim ugrađenim termoelementima.

Da bi se spriječilo prskanje betona na površini uslijed širenja mase u sredini, brane se grade, kako je već spomenuto, u blokovima, vertikalnim lamelama, a između njih ostaju dilatacione fuge. Na gravitacionim brana-ma one su paralelne, a na lučnim radikalne. Ranije su imale širinu do 1,0 m, ali se prešlo na betoniranje na stik, tj. blok se stavlja direktno uz blok. Spojnice (fuge, reške) lučnih brana se uvijek moraju dobro zapuniti injektiranjem, da bi se osiguralo lučno djelovanje, i u tu svrhu mora se predvidjeti poseban sistem cijevnih vodova i drugih uredaja. Injektiranje spojnica se provodi nakon što su se betonski blokovi dovoljno skupili. Injektiranje omo-

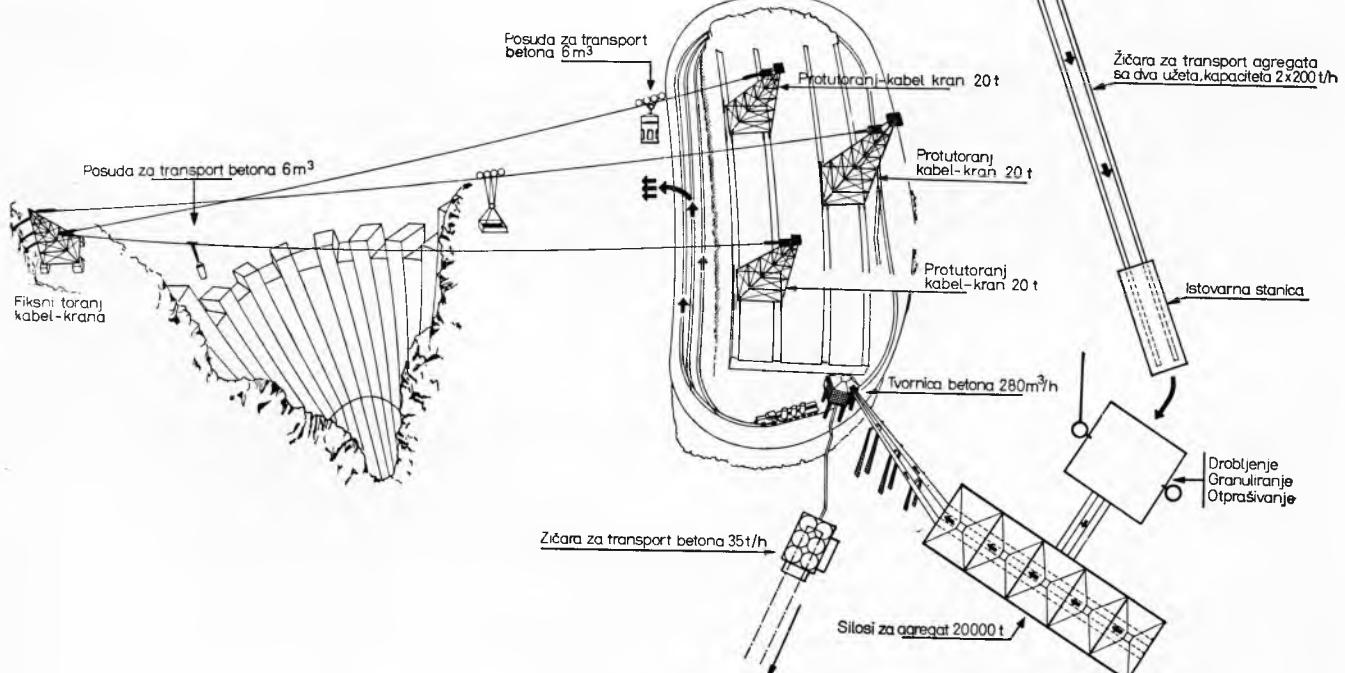


Sl. 27. Nekoliko vrsta brtvenja blokova. a: spoj s topnjivim mastikom na brani Ben-Metir, b: spoj s bakarnim limom i čepom od bitumena, c: spoj s brtvom od sintetičkog materijala



Sl. 25. Višelučna brana Grandval visine 85 m na rijeci Truyère u Francuskoj. Evakuacija voda vrši se preko dva »skijaška skoka« koji prelaze preko kontrafora. Brana je karakteristična po tome što se centrala nalazi unutar jednog polja. Ukupno, brana ima šest polja.

pa se portland-cementu često dodaje zgura visokih peći. Organizacija radova na betoniranju predstavlja složen problem koji treba dobro prostudirati, naročito za visoke brane, gdje se količine



Sl. 26. Organizacija radova na brani Tignes u Francuskoj, gdje je $632\,000 \text{ m}^3$ betona bilo ugrađeno za 196 radnih dana. Maksimalna dnevna ugrađena količina iznosila je 4500 m^3 a prosječna dnevna količina 2280 m^3 . Brana je izbetonirana u toku dviju ljetnih sezona 1951 i 1952

gućavaju brtve koje se stavljuju kod svih brana da bi se spriječilo propuštanje vode. Mogu se izvesti na različite načine (sl. 27).

Betoniranje blokova brane vrši se naizmjenično po slojevima visine 1,5 do 2,0 m. Beton istresen iz posuda danas se pri gradnji velikih brana razgrće buldozerima, a onda zbiju per-vibratorima s velikim brojem titraja (oko 10 000/min). Između horizontalnih slojeva nastaju radni prekidi jer se novi sloj može betonirati tek nakon 3...5 dana, da bi se mogao ohladiti raniji sloj. Kad se radovi forsiraju, suvišna toploplota mora se odvoditi pomoću cijevnih vodova koji se polazu na svaki sloj i u kojima cirkulira hladna voda, ili se mogu hladiti voda i agregat prije spravljanja betona, što svakako poskupljuje rade. Beton treba da bude slabo plastičan; vodocementni faktor rijetko prelazi 0,5...0,6. Često se betonu dodaju plastifikatori da bi se postigla bolja obradljivost. Teži se za tim da dodatak cementa bude što manji; on obično ne prelazi 275 kg/m³ betona. Zahtijeva se velika gustoća betona, zbog bolje nepropusnosti, a za lučne brane traži se i velika čvrstoća. Na izgradnji brane u Jablanici dostizala je prosječna čvrstoća betona nakon 28 dana 400 kp/cm².

Priprema, kontrola i ugradnja betona danas je potpuno automatsirana. Na svakom gradilištu postoje terenski laboratoriji. Oplata je obično pokretna, drvena ili češće čelična. Red betoniranja blokova i horizontalnih slojeva, s obzirom na tražene uvjete, mora se unaprijed detaljno odrediti, kako bi se napredak rada odvijao bez zastoja duž cijele brane po određenom redu.

Nasute brane

Ove brane mogu se podijeliti u dvije grupe: *zemljane brane od homogenog materijala* i *zemljane i kamene brane od nehomogenog materijala*. Grade se ili na stijeni ili na zemljanim tlu. Preporučuju se u profilima u kojima su nepropusni slojevi na većoj dubini, a ne sadrže materijale koje voda rastvara. Nisu jako osjetljive na nejednolika slijeganja, kao ni na potrese. Materijal od kojeg se grade uvijek u izvjesnoj mjeri propušta vodu, pa postoji procjedivanje iz gornje u donju vodu. Zbog toga je brana do depresione linije zasićena vodom, a iznad te linije diže se još kapilarna voda.



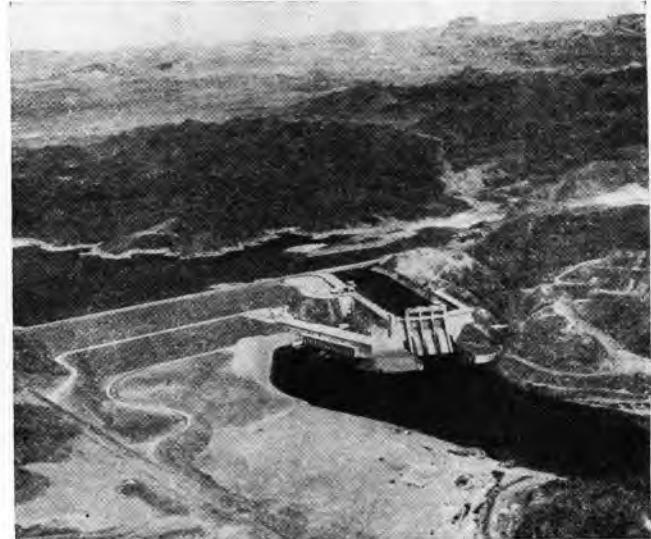
Sl. 28. Procjedivanje kroz nasutu branu. 1 filtrski sloj, 2 drenažni sloj, 3 depresiona linija

drenažu prema sl. 28. Problem filtracije takvih brana obradivali su Forchheimer, Pavlovskij, Creager i dr.

Nakon terenskih i laboratorijskih istraživanja materijala i definitivnog izbora na osnovu tehničkih i ekonomskih kriterija, treba ispitati stabilnost brane protiv klizanja, kao i stabilnost pokosa i tla na kojem se brana nalazi. Bitan problem pri dimenzioniranju predstavlja stabilnost kosina, odnosno njihov maksimalni nagib.

Stabilnost kosine zavisi od otpora unutar materijala uslijed trenja i kohezije čestica. Urušavanje nastaje uslijed klizanja mase nasipa prema dolje. Oblik urušene mase može se proračunati po švedskoj metodi (Fellenius, Petterson) za homogene nasipe ili po Nonveillerovoj metodi za nehomogene nasipe. Opasnost od klizanja može se spriječiti odvodnjavanjem, tj. stavljanjem filtarskih slojeva i drenaže. Minimalni profil nasute brane je trapez sa pokosima ne strmijim od 1 : 1,4, čime je osigurana postojanost pokosa sa faktorom sigurnosti 1,5. Dimenzioniranje se vrši na temelju obrazaca iz geomehanike. Visina krune brane treba da je najmanje 1,5 m iznad najvišeg vodostaja; kruna ima širinu zavisnu od namjene, ali na višim branama ne manju od 6 m.

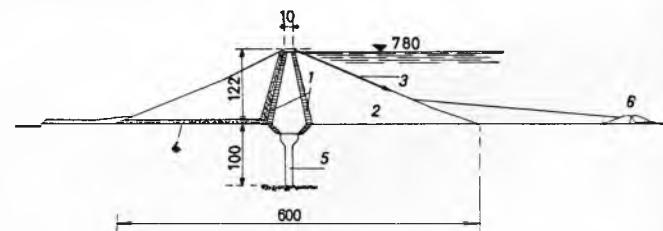
U *homogene materijale* za izradu nasutih brana spada laporovita zemlja i pijesak sa 15...25% gline. Mora se ispitati njihova stišljivost, čvrstoća za smicanje i optimalna vlažnost pri ugradivanju. Ugradivanje zahtijeva pogodne vremenske uslove, koji se ponekad teško postižu kroz duži period, pa se vrijeme građenja produžuje. Maksimalni nagib kosina je 1 : 2. Uzvodne se kosine popločavaju da bi se zaštitile od djelovanja vode, a nizvodne se oblažu busenom. Materijal se nasipava u slojevima



Sl. 29. Pogled na zemljano branu Davis na rijeci Colorado u USA. Visina 61 m, dužina u kruni 488 m, volumen nasipa 2,24 miliona m³. Vode se evakuiraju preko posebnog betonskog preljevnog dijela brane

15...20 cm debljine i nabija valjcima (ježevima) i nabijačima. Materijal koji bi zadovoljio naprijed spomenute uslove, kao i uslov da procjedivanje bude minimalno, rijetko kada se može naći u blizini mjesta pregradivanja, pa se zbog toga brane od ovog materijala rijetko kada i grade (sl. 29).

Danas se češće grade brane od *nehomogenog materijala*. Da bi se spriječilo procjedivanje, nepropusni se materijal ugraduje sa uzvodne strane ili kao jezgra. Ako je podloga propusna, izvodi se brtveni sloj koji siže do nepropusnog materijala; ovaj sloj radi se od gline, betona, žmurja ili u vidu injekcione zavjese. Poznat je slučaj brane Serre-Ponçon na r. Durance u Francuskoj, gdje je zavjesa duboka 100 m a prolazi kroz aluvijalni nanos (sl. 30). Ako se zaštiti sloj nalazi na uzvodnoj strani, mora biti zaštićen od oštećenja i rušenja. Takvo rješenje odgovara bolje i sa statičke strane, jer je noseći dio brane veći a put procjednoj vodi duži. Takvog je tipa brana Lokvarka u Gorskom Kotaru. Zapitivanje jezgrom bolje je iz izvedbenih razloga, jer nabijanje glinenog sloja obično zaostaje, zbog nepovoljnih vremenskih uslova. Jezgra se radi i kad je materijal slabog kvaliteta. Nagib kosina kreće se od 1 : 1,5 do 1 : 2,5. Predstavnik ovog tipa u našoj zemlji je brana Vlasina, visine 33 m.



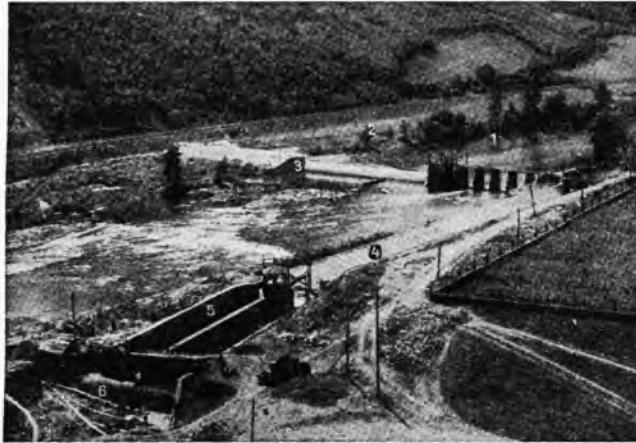
Sl. 30. Poprečni presjek nasute brane Serre-Ponçon. 1 filterske prelazne zone, 2 nasip od aluvijalnog materijala, 3 krupni blokovi, 4 drenažni sloj, 5 zaptivna injekcionalna zavjesa, 6 uzvodna pomoćna brana. Vertikalna jezgra ima zapreminu 2 miliona m³ a nasip ~ 14 miliona m³

Brane od kamenog nabačaja spadaju također u ovu grupu. Grade se kad je prevoz cementa otežan i na mjestima na kojim ima dobrog kamena. Nagib kosina kreće se do 1 : 2. Osim jezgre, kao gore, one mogu imati sa uzvodne strane i ekran, koji može biti od armiranog ili asfaltnog betona. Vrlo su porozne; može se ugrađivati i kamenje teško nekoliko tona. Kameni materijal istresa se sa visine od nekoliko metara i zbiju se ili vodenim mlazom koji se izbacuje iz vodenih topova (hidromonitora) pod pritiskom od 5...7 atm (troši se po m³ nasipa 2...4 m³ vode) ili vibrovaljcima. Najviša je takva brana u nas brana Globočica na Drimu (102 m). Najpoznatija je, zbog specifičnih terenskih uslova, brana Peruća na Cetini. Obje imaju vertikalnu glinenu

jezgru. Uzvodni ekran od asfaltnog betona ima brana Radojinja na Uvcu, visine 35 m; ona navraća vodu u tunel za centralu Bistricu na Limu. Armiranobetonskim ekranom bit će zaštićena brana Rama u sливу Neretve, visine 100 m.

Organzi za evakuaciju velikih voda i ostali objekti uz brane

Djelomično ili potpuno pražnjenje umjetnih jezera potrebno je zbog nadolaženja velikih voda u momentu kada je jezero puno ili zbog remonta pojedinih građevina ispod minimalnog radnog



Sl. 31. Brana na rijeци Bosni podignuta radi opskrbe vodom termoelektrane Kakanj (u izgradnji). 1 protočna polja, 2 preljevni dio brane, 3 riblja staza, 4 dovodni kanal za termoelektranu, 5 komore za taloženje mulja, 6 položaj pumpne stanice. Brana je dovršena 1954.

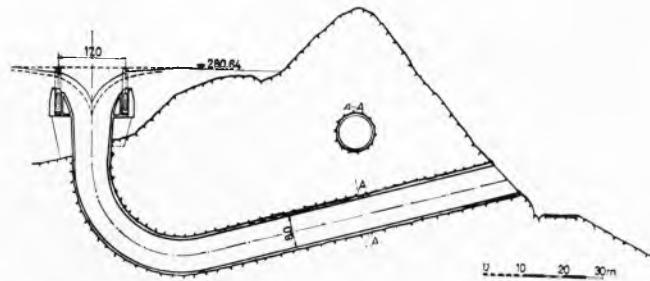


Sl. 32. Pogled na bočne preljeve brane Hoover vezane za tunelski odvod

nivoa. U tu svrhu služe *preljevi i ispusti*. Osim toga, treba voditi računa o mogućnosti propuštanja transporta drveta i prelaza riba, a na plovnim rijekama i o propuštanju brodova. U tu svrhu grade se, gdje je to potrebno, posebni objekti.

Preljevi i ispusti visokih brana mogu biti na samoj brani ili izvan nje. Nasute brane ne dopuštaju preljevanje, pa su organi za evakuaciju uvijek izvan brane. Preko masivnih brana je preljevanje moguće ako nisu veoma visoke i ako se tome ne protive specijalni argumenti, kao npr. kada se centrale nalaze pored nožice brane. Preljevi omogućuju i propuštanje leda, plivajućih predmeta, lebdećeg nanosa itd. Osim za propuštanje voda, ispusti služe i za propuštanje suspendovanog nanosa (sl. 31). Mogu biti donji (temeljni) ili srednji. Kapaciteti svih organa proračunavaju se prema obrascima iz hidraulike.

U otvorene preljeve mimo brane spadaju bočni preljevi sa brzotokom (brana Grančarevo i Genissiat), a u zatvorene, bočni preljevi vezani na tunel (brana Hoover, sl. 32). Na tunel su vezani i preljevi kroz okno (brana Bočac, sl. 33). Preljevi masivnih brana mogu biti i sifonski, kroz tijelo brane, ali se ovi rijetko primjenjuju. Svi preljevi, osim sifonskih, mogu biti slobodni ili sa usta-



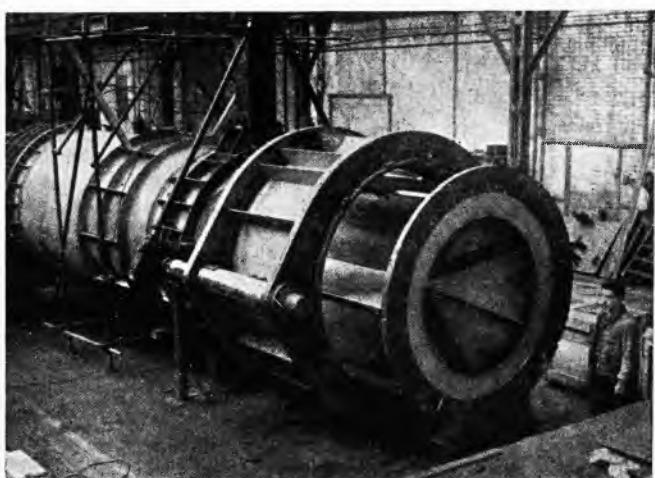
Sl. 33. Uzdženi presjek preljeva kroz okno za branu Bočac kapaciteta 900 m^3 s prstenastom ustavom na hidraulički pogon. Takav oblik tunela izabran je da bi se i kod manjih voda iskoristio cijeli presjek tunela i da bi se mlaz prebacio preko postojećeg puta, koji će služiti kao prilaz brani

vama; obično su sa ustawama. Dimenzioniraju se za veliku vodu koja bi se mogla javiti jednom u 1000 godina, a za nasute brane uzima se još i stroži kriterij (10000 godina).

Ispusti masivnih brana prolaze obično kroz tijelo brane (sl. 21), a ispusti nasutih brana vezani su za obilazne tunele. Njihov kapacitet obično ne prelazi trećinu količine koju ukupno treba evakuirati, a redovno je u skladu sa kapacitetom turbina slijedeće nizvodne centrale ili sa drugim potrebama. Ako se pored brane nalazi centrala, redovno se postavlja pitanje takvog načina ispuštanja vode da ne nastanu smetnje za pogon ili opasnosti za pristupne saobraćajnice, pa se na izlazu stavljaju regulacioni zatvarači tipa koji mlaz pri odbacivanju raspršava (Johnson — igličasti ili Howel Banger — disperzioni, sl. 34). Ispusti redovno imaju i uzvodno postavljene sigurnosne zatvarače. Optimalan položaj i način disipacije energije najbolje se može riješiti na hidrauličkim modelima. Zbog velikih brzina koje se pojavljuju pri tečenju, ispusti su u tunelima i kroz tijelo brane obloženi čeličnim cijevima dimenzioniranim redovno na puni pritisak.

Korita za propuštanje drveta, riblje staze i brodarske splavnice. Za propuštanje drveta služe, normalno, posebna korita, koja se mogu izvesti onako kao što se vidi na sl. 6. Dimenzije ribljih staza ovisne su o veličini riba koje treba da njima prolaze. Te se staze sastoje od niza malih bazena čiji se nivo postepeno snižava iz gornje u donju vodu. Ako je brana viša, treba nakon svakih 4 m postaviti odmarališta u obliku većih bazenčića. Na vrlo visokim branama postavljaju se i posebni liftovi za transport riba, ukoliko je to potrebno iz ekonomskih ili drugih razloga. Riblje staze najvećeg obima i u najvećem broju ima brana Bonneville na r. Kolumbijsi u USA. Da bi se omogućilo svladavanje jedne 20 m visoke stepenice, izgrađene su tamo četiri staze i nekoliko liftova. Za njihovo funkciranje troši se $2 \text{ m}^3/\text{s}$ vode.

Objekti za propuštanje brodova na plovnim rijekama nazivaju se brodarskim splavnicama; ove se sastoje od jedne ili dvije brodske komore, što ovisi od intenziteta saobraćaja (v. sl. 5).



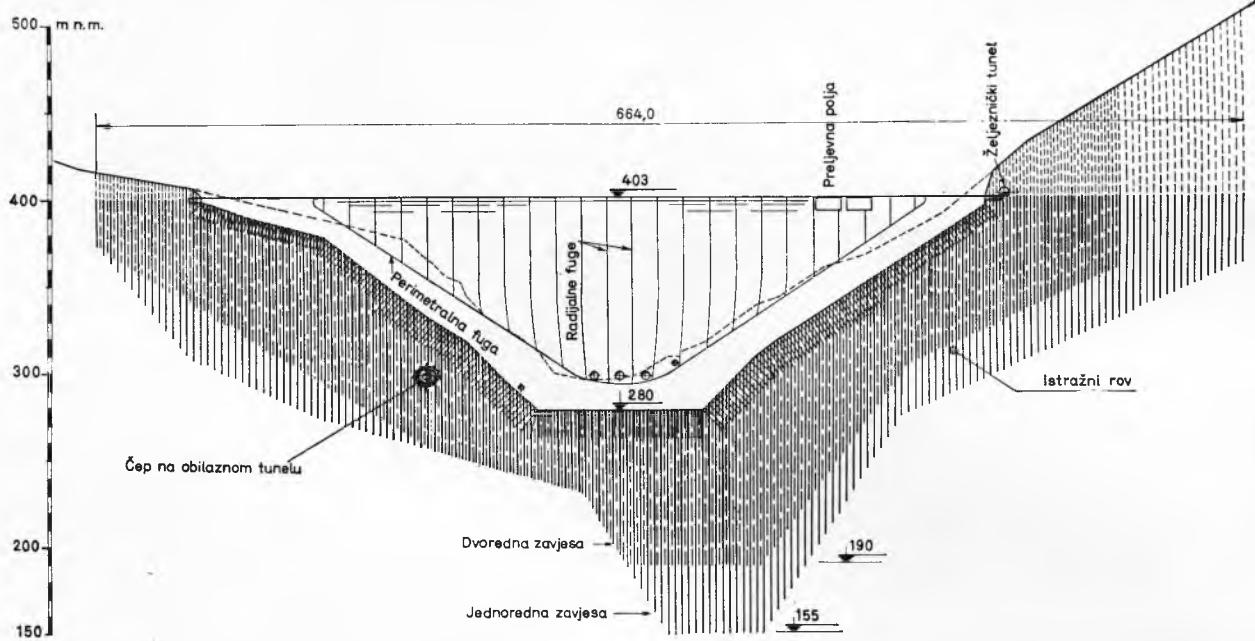
Sl. 34. Disperzioni zatvarač brane Baran u Pakistanu s leptirastim pomoćnim zatvaračem, promjera 2,27 m

Njihove dimenzije odgovaraju veličini brodova kojima treba da služe za prelaz iz donje vode u gornju i obratno. To su, obično, skupi objekti; na brani Aschach na Dunavu bilo je potrebno da se u njih ugradи $\sim 700\ 000\ m^3$ betona, što je iznosilo više nego polovinu svih betonskih radova na njoj (v. *Plovne komore*).

Injekcione zavjesa i konsolidacioni radovi

Zavjesa se sastoji od dubokih injekcija ispod temelja brane i njenih bokova, ubrizganih sa ciljem da se spriječi procjedivanje i odilazak vode iz akumulacionog bazena. Zavjesa se obično produžuje do nepropusnih slojeva, ukoliko se ovi nalaze na dohvratnoj dubini, ali može biti i lebdeća, kao npr. na brani Peruča. Dubina zavjesa redovno ne prelazi visinu brane, ali u propustljivim terenskim uslovima može dostići i trostruku visinu. Dužina zavjesa utvrđuje se prethodnim sondažnim bušenjem terena i ispitivanjem

se ujedno smanjuje uzgon, što je za gravitacione brane veoma važno. Nakon završetka izrade zavjesa i betoniranja donjih dijelova brane vrši se vezno injektiranje po cijeloj površini temelja, da bi se brana sa stijenom povezala u monolit; dubina ovih injekcija obično ne prelazi 2..5 m. Injektiranje se sprovodi bilo iz kontrolnog hodnika ili sa nizvodnog lica brane. Prema dosadašnjem iskustvu potrebna je na svakih 4...7 m² površine temelja jedna bušotina. Ove injekcije ujedno služe za poboljšanje kvaliteta stijene koja je miniranjem bila oštećena pri iskopu. Lučne brane zahtijevaju injektiranje duž cijelog perimetra brane; normalno je potrebno da se obavi i konsolidaciono injektiranje ispod cijele širine njihova temelja, da bi se poboljšao kvalitet i smanjile deformacije podloge. Dubina ovih injekcija iznosi najmanje polovinu širine temelja. Ako se u stijeni nalaze slabo nosivi prosljoci, treba ih prije toga isprati posebnim postupkom. Ovaj postupak je pri-



S1. 35. Uzdužni presjek kroz injekcionu zavjesu i branu u Grančarevu na Trebišnjici

njegove propustljivosti. Tereni u kojima gubitak vode po linearnom metru bušotine ne prelazi 1 l/s m, na 10 atm pritiska, smatraju se praktično nepropusnim za vodu. Za brane visine manje od 30 m, ovaj kriterij, koji je postavio Lugeon, ublažuje se do 3 l/s m na 10 atm. Potrebeni utrošak injekcione smjese utvrđuje se se probnim injekcionim poljem na mjestu brane. Isto tako i potreblji razmak bušotina, koji se kreće od 2 do 5 m (sl. 35).

Injektiranje se danas izvodi pod pritiskom do 60 atm; pritisak se mora za svaki slučaj posebno utvrditi prema lokalnim uvjetima. Zavjesa može biti jednoredna, dvoredna ili troredna. Danas se teži za tim da bude najviše dvoredna, kako bi se ubrzao postupak. Efekt zavjesе kontrolira se posebnim buštinama u kojima se ispituje propusnost nakon injektiranja. Za manje propusne stijene iznosi utrošak suhe tvari za injektiranje svega nekoliko kg, a za vrlo propusne krečnjačke stijene penje se do nekoliko stotina kg. U Jablanici, u magmatskoj stijeni, on je iznosio 22 kg/m bušotine, a na Peruči 300 kg/m. Upotrebljavaju se čiste cementne smjese, cement sa pijeskom, cement sa glinom, sa bentonitom, vodeno staklo i drugi kemijski spojevi, zavisno o stepenu naprslosti sredine i karakteru prslina. Bentonit i vodeno staklo sprečavaju da u vrlo kaveroznim stijenama smjesa nepotrebno odilazi u širinu, što bi poskupilo radove. Po položaju, injekcije mogu biti vertikalne ili kose, što ovisi o uslojenosti terena. Zavjesa se može injektirati ili prije početka radova na iskopu temelja, što zahtijeva veliku dužinu jalova bušenja, ili nakon dovršenja radova na iskopu, ili pak nakon betoniranja najdonjih slojeva brane, kada se stvori potreban nadsloj, što sprečava odizanje pojedinih slojeva. Zavjesa se obično nalazi sa uzvodne strane ispod temelja. Time

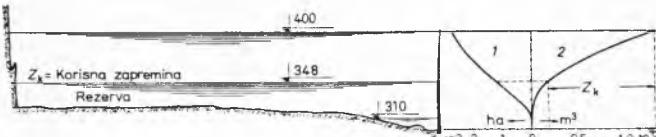
lično težak. Najbolje je da se konsolidaciono injektiranje izvrši prije iskopa temelja za branu, ali se ovo može obaviti i kasnije, nakon betoniranja donjih slojeva brane.

Istražni radovi i studije u vezi sa izgradnjom brana

Osnovni uslov za sigurnost brane jeste prikladno i savjesno izvođenje fundiranja, na mjestu koje je po morfološkim, litološkim i strukturalnim uvjetima podesno da primi konstrukciju. Ovisno, dakle, o tipu brane, teren treba da ima određena potrebna svojstva sa gledišta stabilnosti, postojanosti i nepropusnosti, i to utočno bolja ukoliko su veća opterećenja koja će na nj djelovati. Pretходna istraživanja moraju da obuhvate detaljna geološka snimanja, bušenja, istraživanja geotehničkih osobina stijena, stepena karstifikacije, hidrologije terena itd., te zahtijevaju angažovanje stručnjaka nekoliko specijalnosti. U te svrhe primjenjuju se razne metode, koje su danas toliko usavršene da svaki konstruktor zaista može dobiti jasan uvid u prilike na određenom profilu. Naravno, sa razvojem saznanja proširio se i obim potrebnih istražnih radova, a time i troškovi za njihovo izvršenje. Studije ne smiju da se vrše na brzinu, a za sagledavanje svih potrebnih elemenata redovno je potrebno nekoliko godina. Prethodnim analizama treba obuhvatiti više mogućih profila, a zatim nekoliko najpodesnijih (dva ili više) detaljno istražiti.

Studije i istraživanja moraju da obuhvate i cijelo područje budućeg akumulacionog bazena (sl. 36). Ova ispitivanja važna su, prije svega, radi pravilnog određivanja potrebne visine brane, u vezi sa hidrološkim karakteristikama i namjenom objekta, a zatim radi utvrđivanja nepropusnosti područja i eventualnih

potrebnih tehničkih mjera osiguranja. Ta istraživanja moraju biti naročito obimna u kraskim terenima, gdje treba primijeniti odgovarajuće geofizičke metode, da bi se sa što manjim sred-



Sl. 36. Uzdužni presjek po uzdužnoj osi akumulacionog bazena na Trebišnjici. 1 linija potopljenih površina, 2 linija zapremine akumulacije. Korisni prostor između kota 348 i 400 iznosi 1100 miliona m³. Moguće je pražnjenje bazena do kota 310 kroz desni temeljni ispust. Rezerva koja se može iskoristiti u nizvodnoj stepenici »Dubrovnik« u vrlo sušnoj godini iznosi 160 miliona m³.

stvima mogla obuhvatiti što šira prostranstva. Studije treba također da obuhvate svu ekonomsku problematiku u vezi sa potapanjem područja i preseljenjem stanovništva, kulturnih spomenika itd.

Rušenje brana

U proteklih 150 godina srušilo se u Americi oko 110 brana, od čega je 65% bilo nasutih. U Evropi i Sjevernoj Africi ova je broj manji i iznosi 12. Sva rušenja obično prate veće ili manje katastrofe. Zemljane brane mogu se srušiti uslijed prelivovanja vode preko brane, zbog filtracije, deformacije tla ili grešaka pri građenju, a gravitacione brane uticajem uzgona, erozijom temelja uslijed filtracije, zbog pomicanja tla, loma u tlu ili uslijed grešaka pri građenju. Neke brane rušile su se uslijed prelivovanja ili grešaka u fundiranju. U našoj blizini poznata su rušenja brane Gleno u Italiji (višelučna brana), 1923, zatim 1935 brane Molare, također u Italiji, 1959 brane Vega de Tera u Španiji (višelučna i olakšana) i brane Malpasset u Francuskoj krajem iste godine. Prema jednoj statistici (Gruner) uzrok rušenja je u 40% slučajeva lom u temelju, u 23% slučajeva nedovoljan kapacitet preljevnih organa, u 12% slučajeva nedovoljne dimenzije brane, a u 10% slučajeva neravnomerno slijeganje. Drugi uzroci doveli su do rušenja brane u 15% slučajeva.

Rušenje brane se može sprječiti ako se pravovremeno osmatranjem (auskultacijom) utvrde poremećaji. Naime, ako se pravovremeno uoči opasnost, može se prisilno isprazniti jezero, kroz temeljni ispust ili na drugi način, i time ublažiti katastrofu, a eventualno i sačuvati objekt, s time da se kasnije otklone uzroci. O osmatranju brana v. *Brane, osmatranje*.

Katastrofe mogu izazvati i velika klizišta u jezeru, kao što se to dogodilo na brani Vajont 1963. g. Uslijed urušenja goleme mase brda, val istisnute vode prešao je preko brane i potpuno je uništil grad Longarone. Brana je ostala čitava.

LIT.: W. P. Creager, J. D. Justin i J. Hinds, Engineering for dams, 3 vol. New York 1945. — C. V. Davis, Handbook of applied hydraulics, New York 1952. — F. Contessini, Dighe e traverse, Milano 1953. — F. Tölke, Talsperren, Berlin, 1953. — M. M. Гришин, Гидротехнические сооружения, ч. I, Москва 1954.

S. Mikulec

BRANE, OSMATRANJE. Pod nazivom »osmatranje (auskultacija) branâ« razumijeva se skup svih mjeranja i opažanja koja služe za utvrđivanje ponašanja brana i stijena na koje se brane oslanjaju, tj. pomaka, deformacija i napona koji u njima nastaju za vrijeme gradnje i eksploracije brana.

Nagli razvoj izgradnje brana početkom XX stoljeća pratili su manje ili veće katastrofe, zбog nedostatka realnih teorijskih postavki pri proučavanju tih objekata. Za graditelje brana ranijih generacija brane su bile objekti bez života, nepomični. Napredak u primjeni materijala u građevinarstvu i težnja za sve smješljije konstrukcijama pokazali su, međutim, da brane žive životom koji treba da bude osmatrana i izučavana. Take je osmatranje brana počelo redom u zemljama gdje su se brane najviše gradile: u Njemačkoj (1914), Švajcarskoj (1916), USA (1916), Italiji (1927), SSSR (1930) itd.

Svrha je osmatranju brana osiguranje od iznenadnih opasnih pojava na objektu i zaštita nizvodnog područja od katastrofe. Dobijanje potrebnih podataka omogućuje racionalno održavanje brana u toku eksploracije i pridonosi prikupljanju iskustva u cilju unapredjenja izgradnje brana. Sistematska kontrola ponašanja brana omogućuje da se pravovremeno preduzmu mjere radi izbjegavanja eventualnih neugodnosti i da se izbjegne mogućnost većih oštećenja.

Ponašanje brana posljedica je djelovanja mnogostruktih uzroka, koji mogu biti nezavisni ili jedni od drugih zavisni. Njihovo

istovremeno djelovanje otežava utvrđivanje izravnih odnosa između uzroka i posljedica.

Da bi se riješili zadaci koji se postavljaju, osmatranje brane mora biti sistematsko i opširno. Ukoliko se promjene zbivaju unutar projektom predviđenih granica, može se osmatranje s vremenom sve više sužavati.

Potrebni elementi za utvrđivanje realnog ponašanja brana i stijene na koju se oslanjaju mogu se obuhvatiti trima grupama mjerena. Prvu grupu čine mjerena i opažanja veličina koje predstavljaju uzroke: meteorološke prilike, hidrostatičko opterećenje, uzgon, vodne toplotne struje, temperatura vezanja betona, seizmološka djelovanja (makro- i mikro-potresi), geološke i geotehničke karakteristike terena. Drugu grupu čine mjerena veličina koje predstavljaju posljedice (učinke): pomaci, deformacije i naponi. Treću grupu čini kontinuirana kontrola fizičkih i kemijskih osobina materijala od kojih je izradena konstrukcija i teren u temeljima. Ta klasifikacija je uslovna jer, npr., neka mjerena prve grupe mogla bi se razvrstati i u drugu grupu, kao ponašanje terena, ili u treću grupu, kao temperatura vezanja betona.

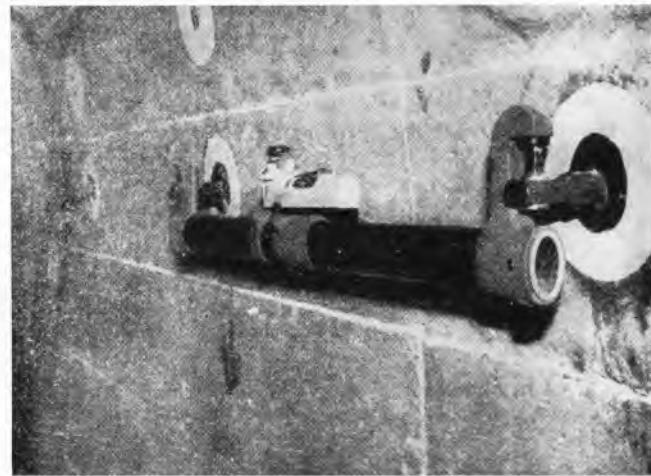
Metode osmatranja mogu se podijeliti u pet velikih grupa:

1. mehaničke i optičke,
2. električne i elektroakustičke,
3. geofizičke,
4. specijalne fizičke i
5. geodetske metode osmatranja.

MEHANIČKE I OPTIČKE METODE OSMATRANJA

Mehaničke i optičke metode osmatranja obuhvačaju mjerena sa direktnim očitanjem vrijednosti pomaka, deformacija i uzgona na pristupačnim tačkama. Gradilišne prilike nameću potrebu stalnog usavršavanja i razvoja instrumenata kojima se ta mjerena obavljaju; ovdje se prikazuju samo oni koji danas imaju najširu upotrebu.

Klinometar je instrument koji služi za precizno mjerjenje kutnih promjena nagiba, a osniva se na jako osjetljivoj libeli čijim se pomjeranjima upravlja s pomoću mikrometrijskog vijka. Postavlja se na čvrsto uzidane fiksne baze, pojedinačne ili u obliku lanaca (sl. 1). Mjerena se izvode na pristupačnim tačkama brane,



Sl. 1. Klinometar

a upotpunjaju se mjerjenjima alineatorom i koordinatnim viskom. Ukupni pomak u krui brane dobija se kao suma pomaka mjerjenih na različitim kotama.

Deformatometar. Za mjerjenje deformacija i relativnih pomaka izrađuje se specijalni prenosni deformatometar, koji mjeri promjenu udaljenosti između dva odvojena metalna trajno ugrađena ležaja. Tim instrumentom mogu se mjeriti pojedinačne — lokalne ili grupne — i ukupne deformacije duž određenog pravca na brani (sl. 2). Posredstvom modula elastičnosti betona brane mogu se izračunati vrijednosti površinskih naponi. Usljed uticaja dnevних temperaturnih promjena, površinski naponi mogu biti osjetno različiti od napona u masi. Mjerena se obavljaju u posebnim kontrolnim hodnicima i na pristupačnim tačkama na tijelu brane.

Deformatometrom se može mjeriti naponsko stanje u stijeni i odrediti Poissonov koeficijent, a on služi i za kontrolu otvaranja spojnica (fuga).