

## O deformacijama velikih brana\*

Među problemima modernog inženjerstva zauzimaju veliku važnost oni, koji se odnose na konstrukcije brana i studije u vezi sa pojedinim deformacijama. Tome je razlog i činjenica, što u mnogim državama ne postoje još službeni propisi, koji se odnose na projekte, konstrukcije i t. d. velikih brana. Obzirom na ovo u Švicarskoj je unatrag tridesetak godina ustanovljena jedna specijalna tehnička komisija, s glavnim zadatkom da sjedini, uredi, podvrgne kritici i objelodani sve rezultate mjerenja, opažanja i iskustva o velikim švicarskim branama, kojih do danas ima ukupno 26, s volumenom zadržane vode od 771 miliona kubičnih metara. Komisija je 1946 g. publicirala knjigu oko 400 strana u izdanju Federalnog inspektora javnih radova pod naslovom »Messungen Beobachtungen und Versuche an Schweizerischen Talsperren 1919—1945.«

Ova knjiga sadrži uređenu zbirku novih interesantnih monografija o studijama u vezi s branama, koje su izgrađene u Švicarskoj od 1919 do 1945, i općeniti izvod svih osnovnih problema, a u redakciji prof. Dr. M. Roša. Monografije i izvodi su snabdjeveni mnogobrojnim interesantnim fotografijama, slikama, i dijagramima od kojih su šest (br. 3, 4, 5, 6, 7, 8) preuzeti u ovom članku.

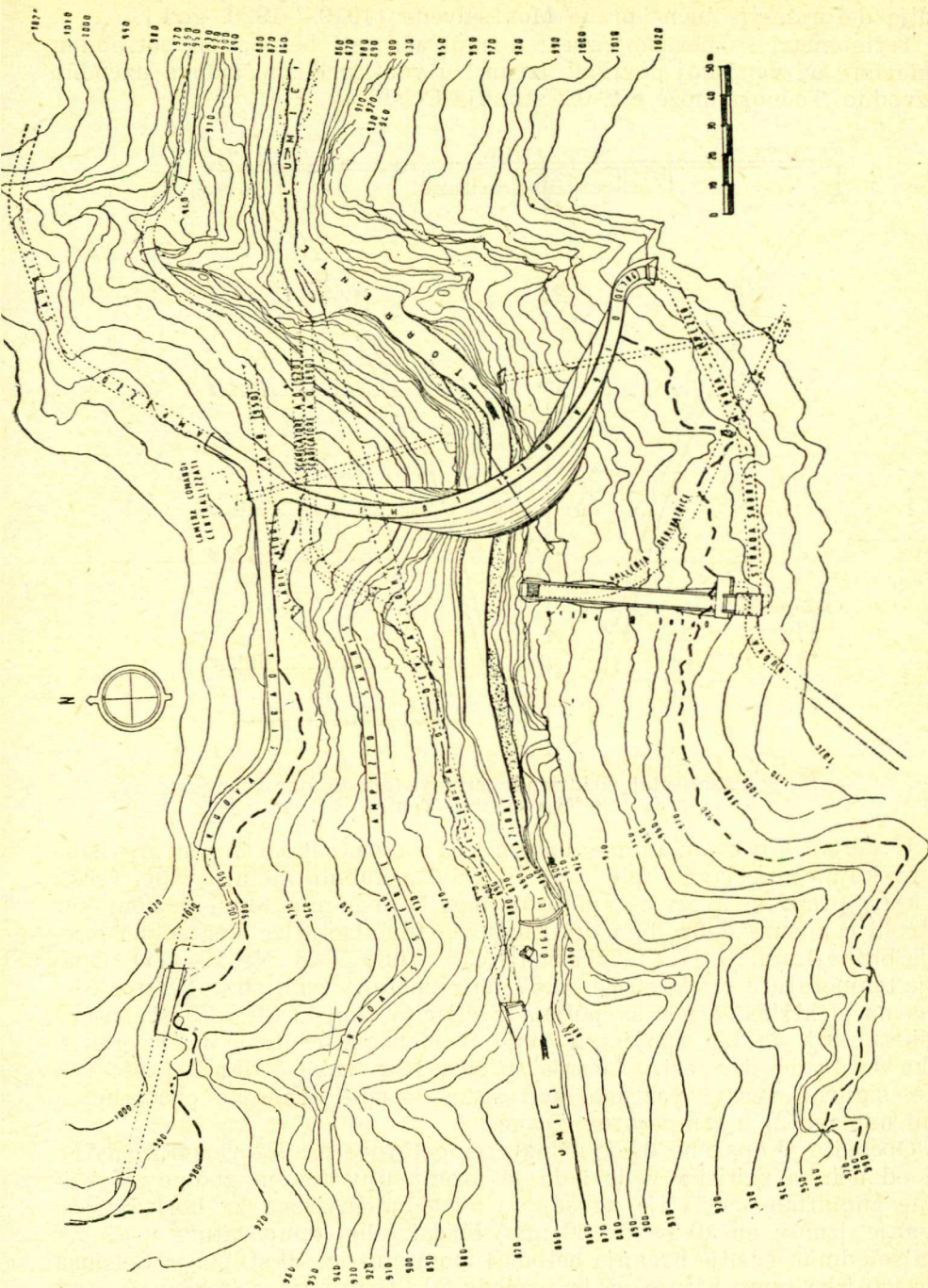
Za vrijeme gradnje brane i do njenog završetka izvode se serije vrlo dugih i delikatnih mjerenja da bi se razvijetile eventualne deformacije, koje mogu biti integralne i parcijalne kao: pomjeranje, savijanje, torzija i t. d. Ova mjerenja moraju naravno biti izvršena instrumentima i metodama koje odgovaraju svrsi, koja se želi postići. Rezultati mjerenja moraju biti uvijek razrađeni prema zakonima, koje daju klasične teorije kombinacija direktnih opažanja osnovane na principu »najmanjih kvadrata«.

Mjerenja mogu biti izvršena metodama i instrumentima, koje spadaju u Fiziku, i metodama i instrumentima, koje spadaju Geodeziji. Kod prvih vrlo važnu ulogu imaju mjerenja promjerna temperature i promjene vertikale.

Ove se promjene odnose na razvoj topline u procesu spajanja i vezivanja cementa, promjene temperature zraka i u manjoj mjeri vode. Ove pojave stvaraju jedno termičko polje sasvim različito i kompleksno, tako da sve do danas ne postoji jedna matematska formula, pa i empirička, koja bi ga potpuno predstavljala u svojim različitim fazama. Hvalevrijedne pokušaje, u koliko nam je poznato, izvršio je neprežaljeni profesor Puppini na Univerzitetu u Bologni i novije studije profesora Arredi na Tehničkom fakultetu u Rimu.

Mjerenja temperature mogu se vršiti na razne načine, na primjer, upotrebom termometra s otporom od 180 Ohma na 15 stupnjeva Celsija,

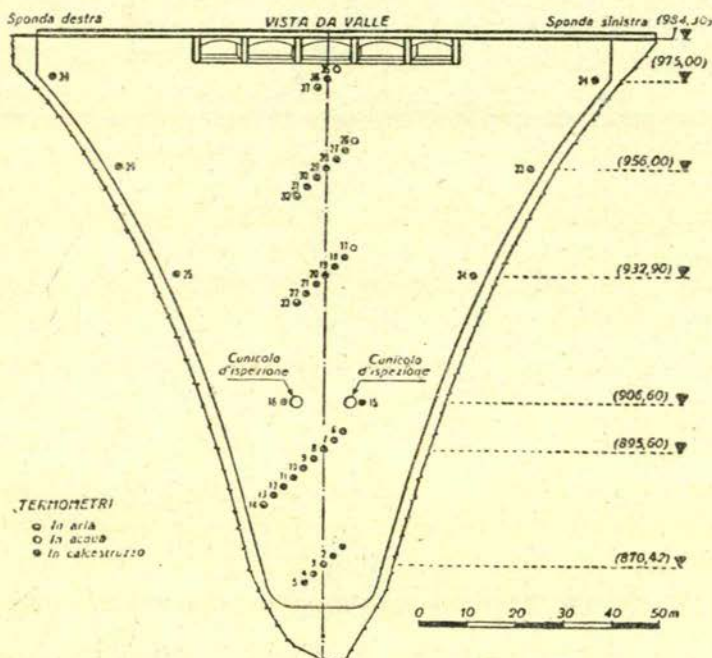
\* Dozvolom redakcije preuzeto iz »Rivista del Catastro e dei servizi tecnici erariali« br. 1—1949. Preveo Ing. M. Janković.



Sl. 1 — Položajni nacrt brane di Lumiei (visina 136 m, debljina u ravlini temelja cca 14 m, kubatura betona 102.318 m<sup>3</sup>)  
uzet iz sveske »Impianti Lumiei, alto Tagliamento«, izdanje Società di Eletticità, Venezia 1948.

profesora D. P. Toy-a iz Friburga, a koji su primijenjeni prvi puta kod studija deformacije lučne brane Montsalvens (1919.—1920. god.).

Termometri se porazmještaju u unutrašnjosti betona na potrebnim razmacima na vanjskoj površini, izvan i u vodi, u blizini zidova uzvodno i nizvodno. Točnost može biti 0,2 stupnja Celsiusa.



Sl. 2: Razmještaj električnih termometara unutar brane di Lumiei (Dr. ing. Tonini)

U talijanskoj brani Lumiei lučnog tipa s dvostrukom krivinom, visine 136 m, koja dozvoljava naplavu od 70 miliona kubnih metara vode, (slika 1.) kako proizlazi iz izvještaja prof. ing. D. Tonini-a »Installazioni per controlli e misure della diga del Lumiei« (Instalacije za kontrolu i mjerenje brane Lumiei) (L'energia elettrica«, Anno 1948. No 10—11). Opažanje temperature vršila su se na 37 termometara (vidi sliku 2) tipa Siemens na električni otpor sa poljem varijacija između 30 i 70 stupnjeva Celsiusa, koji su bili spojeni u dvije Siemensove centrale za mjerenje, svaka sa dvadeset mjesta. Čitanja su se vršila svaka 3 dana, u isto vrijeme, sigurno veoma pažljivo, kad su nadolazile značajne promjene u visini naplave ili u temperaturi zraka.

Općenito je opaženo da je učinak temperature na deformaciju znatno veći od učinka pritiska vode i da je promjenljiv tokom godine. Maksimalne amplitude oscilacije uzvodno i nizvodno mjerene za horizontalno izvijanje, iznose od 10 pa do 20 mm. Maksimalne temperature ustanovljuju se odmah poslije bacanja betona i mogu dostići 40 stupanja Celsiusa kada vanjska temperatura varira između 20 i 0 stupnjeva Celsiusa.

Porast topline vezivanja cementa opada praktički poslije od prilike 8 god. i postiže tako stanje ravnoteže. Za ovo vrijeme mogu se lako razlikovati tri faze: a) zagrijavanje središnje zone i vanjske zone neposredno poslije bacanja betona; b) brzo ohlađivanje vanjskih zona; c) polagano ohlađivanje središnje zone (sl. 3 i 4).

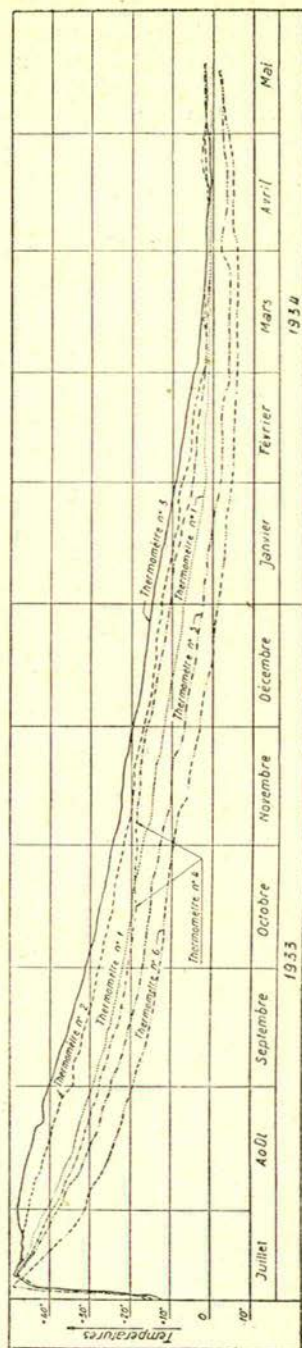
U gravitacionoj brani Barberine, sa lagano zavijenim tlocrtom opazilo se da porast temperature po kg cementa sadržanom u 1 m<sup>3</sup> betona u radu iznosi oko 13 stotina stupnja Celsiusa.

Opazanja su stalno pokazivala da su lučne brane a također i one gravitacione u stalnom pokretu uslijede utjecaja promjena temperature. Iza ovih djelovanja slijede ona, koja prouzrokuje mraz, a koja mogu izazvati znatne štete.

Varijacije vertikale, koje prouzrokuju horizontalno savijanje i deformacije temelja u dva pravca, kosom i normalnom, mogu se opažati pomoću viska. U unutrašnjosti brane prave se maleni bumari, koji se nastavljaju u malene ćelije u kojima se postavljaju metalne žice na čijim krajevima su obješeni utezi. Položajne koordinate centra gravitacije mase, koja se njiše u dva smjera, mogu se odrediti s točnošću do desetine milimetra, na horizontalnom planu, koji se nalazi ispod same mase u odnosu na neki index. Ako se uteg (mase) lagano zamijeni u dva koordinatna smjera, i čitaju se više puta krajnje točke amplitude, može se odrediti srednji položaj njihala. Na taj način mogu se dobiti tražene koordinate sa točnošću mnogo većom (0,05 mm cca) od one ranije spomenute.

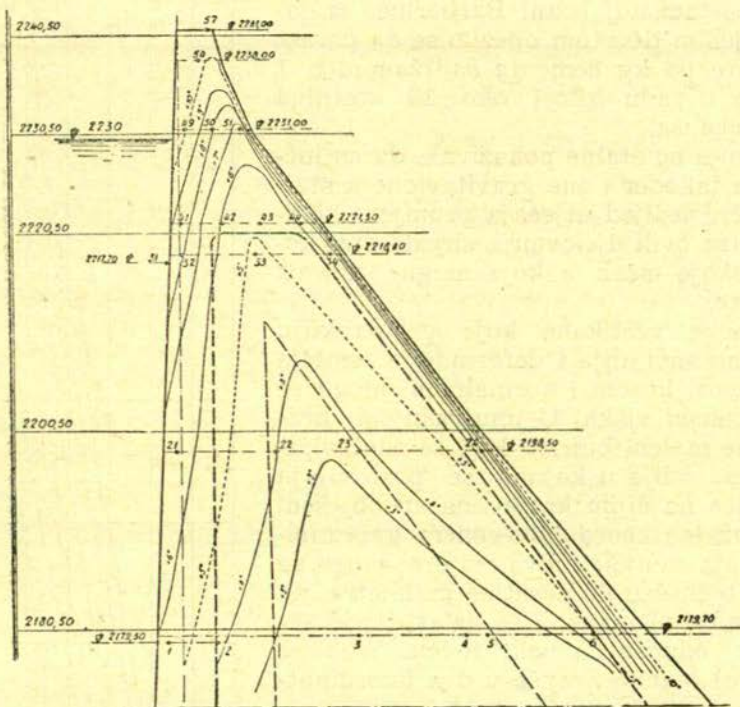
Za ovo određivanje se može također upotrebiti koordinatometar Huggenberger-ov, koji je upotrebljen prvi put kod mjerenja na brani Schlagen. Točnost, koja se mogla postići s ovim aparatom je 0,05 mm.

Jedna metoda, koja bez sumnje daje veću točnost, je optička metoda, u kojem se čitanje položaja njihala u momentu mjerenja efektuiru s jednim mikroskopom, koji ima potrebnu građuiranu skalu. Ovaj postupak (Norris Dann — U. S. A.) primijenje je i sada se mnogo primjenjuje u Americi.



Sl. 3: Temperature opažane na stupu br. 13, brane Dlycens, za vrijeme faze prvog ohlađivanja betona (M. Roš.)

Može se k tome postaviti jedan fotografski uređaj za automatsku registraciju, i određivati položaj žice viska u jednakim vremenskim intervalima, obično u dva pravca međusobno kosa ili normalna i uostalom bilo koja. Na taj način se mogu odrediti krajnje točke dvaju konjugiranih dijametara elipse, i prema tome koordinate centra gravitiranja u položaju ravnoteže sistema njihaja, u momentu opservacije.



Slika 4. Isoterme u osovjinskoj ravнини stupa br. 19. brane Dixense (M. Roš).

Ponavljajući uzastopno mjerenja dobivat će se druge koordinate centra gravitiranja sistema njihanja, koje omogućuje određivanje uzastopnih položaja ovog centra.

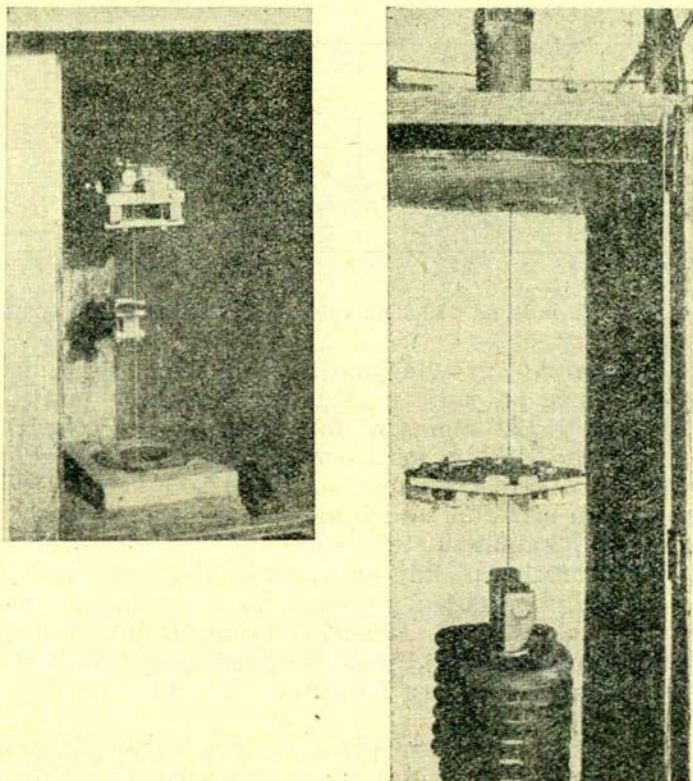
Ako spojimo s neprekidnom crtom točke koje određuju ove položaje, nakon njihovog označivanja na kartezianskom planu, dobit ćemo putanju izazvanu pomakom. Na sl. 5 su kao primjer predstavljeni viskovi upotrebljeni za studij otklona vertikalne za branu Spitallammsperre i na sl. 6 opisana putanja indeksa jednog viska u istoj brani.

Geodetska metoda može rasvijetliti prostorne deformacije jedne brane, odnosno vertikalne i horizontalne pomake i rotacije ravnine temelja

(gravitacione brane) odnosno nasipa (lučne brane) i dalje deformacije uslijed vlastite težine, hidrostatičkog pritiska, temperature, stezanja, bujanja betona i plastične deformacije.

Instrumenti koji se mogu upotrebiti u ovom slučaju jesu:

a) klinometri; b) alineatori; c) tensometri; d) libele; e) teodoliti.



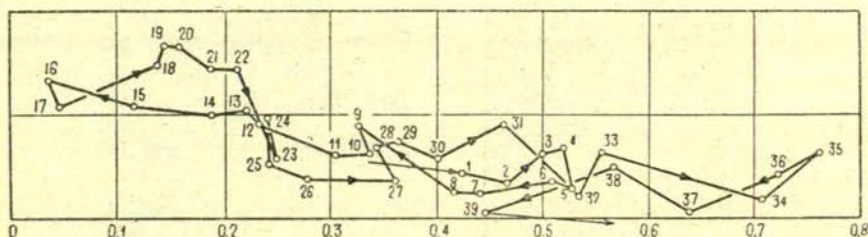
Sl. 5. Viskovi postavljeni za studij otklona vertikalne brane Spittalammisperre (M. Roš).

Instrumenti kategorije a) preporučuju se samo za deformaciju rotacije plohe temelja i uopće za mjerenje savijanja gdje se zahtijeva točnost od 3" što odgovara  $\frac{1}{10}$  mm. Kod instalacije ovih instrumenata treba voditi računa o tome da se što je moguće više eliminiraju čisto lokalni i površinski utjecaji. Radi toga tanjuri za učvršćivanje ovih instrumenata ne smiju biti postavljeni neposredno na beton nego moraju biti osigurani u trupu profila ugrađeni u betonu do stanovite dubine.

Obično se upotrebljavaju klinometri s libelom. Nedavno je Nacionalni Institut za Geofiziku s kojim upravlja prof. A. Lo Surdo predložio za kutno određivanje specijalne klinografe s fotografskom registracijom velike osjetljivosti, koji su u stanju da stalno snimaju promjene. Ovi naro-

čiti instrumenti bili su ranije instalirani na brani u gradnji Pieve di Cadore tipa lučno-gravitacionog, sa slijedećim karakteristikama: visina 108 m, tetiva 308 m, kapacitet rezervoara 64 miliona kubnih metara.

Rezultati, koji su postignuti sa svim ovim instrumentima pokazali su se veoma dobro upotrebljivi i interesantni u usporedbi s onim koji su postignuti sa viskovima i s teodolitnim mjerenjima koje ćemo kasnije spomenuti.



Sl. 6 — Putanja indeksa viska na brani Spitallammsperre (M. Roš).

U najvećoj švicarskoj gravitacionoj brani Schrach maksimalni otklon (freccia) horizontalnog izvijanja u kruni, poslije prvog punjenja basena (oktobra 1926.) bilo je 12,9 mm nizvodno. Kasnije se to povećalo do 1932. za daljnih 4,7 mm i do 1937. g. još 1,7 mm, tako da je postiglo vrijednost 19,3 mm. Povećanje otklona izvijanja smanjuje se s vremenom i pada na nulu. Klinometri nisu prikladni za određivanje deformacije uslijed njihove velike osjetljivosti i lokalnih smetnja.

Sa instrumentima tipa b) koji su uvijek snabdjeveni durbinom, općenito  $50\times$  povećanja, i opremljeni s pokretnim značkama, moguće je slijediti savijanje pojedinih stupova (tronchi) brane. Dobro je unaprijed odrediti na obim obalama (desno i lijevo) u blizini nasipa na ivici brane dva stajališta za smještaj alineatora i opažati uglavnom tri točke, tjeme i uporišta, luka krune brane.

Aparati kategorije c) tensometri sa vibrirajućom žicom dužine cca 15 cm, spojeni su s jednom centralom za mjerenje, i zgodno instalirani na brani u blizini zidova uzvodno i nizvodno, u tjemenu i uporištima. Sa njima se vrše mjerenja radi ispitivanja ponašanja dilatacionih reški (spojeva) brane (gravitacione) i pukotina, sa točnošću barem 5 mikrona, zatim mjerenja za određivanje lokalnih produženja betona i mjerenja promjene dužine cijelog jednog bloka betona. Uslijed promjena volumena betona prouzrokovanog promjenama temperature, stupnjem vlažnosti i vezivanja, proizlazi da je nemoguće odvojiti određivanje produljenja izazvanih hidrostatičkim pritiskom. Drugi instrument koji bi se mogao upotrebiti za snimanja procentualnih produljenja je t. zv. deformometar. Kako deformometar (sa bazom 80 cm, osjetljivosti 4 mikrona po podjeli) tako se i tensometar konstruirao danas u Italiji (Off. Galileo).

Ustanovilo se ipak da se predjeli oko brane deformiraju. Zato je potrebno i na brani i na okolnom terenu učvrstiti stabilno stalne položajne točke tako, da se stvori jedan prsten, koji polazi od brane u okolni teren,

dopire do terena izvan utjecaja, i vraća se na samu branu, Polazeći zatim od stalnih točaka instaliranih na okolnom terenu s desna i lijeva od brane, moći će se ostvariti jedan drugi pravac, koji dopire do temelja. Ako izvršimo precizni geometrijski nivelman, upotrebivši za ovaj slučaj nivelire s plan paralelnim pločama, smještenim pred objektiv, a koje se mogu okretati pomoću odgovarajućeg dugmeta s podjelom, i invarne letve s polucentimetarskom podjelom možemo odrediti eventualne pokrete u visini brane i temelja sa veoma velikom točnošću: 1 mm za svaki km. dužine niveliranja, kao slučajne pogreške i 0,8 mm kao sistematske, dok sa srednjom pogreškom  $\pm 0,2$  ili  $\pm 0,3$  mm za svaku pojedinačnu nivelmansku razliku.

Reper za upoređenje (nepokretan) treba da bude izabran sa najvećom pažnjom, na stijeni, i na udaljenosti većoj od 300 m od brane.

Pokreti terena u blizini brana velikih dimenzija, također kad se on sastoji od otporne stijene, koja se malo deformira mogu dostići nekoliko milimetara. Kod brane Schlaferegg ustanovile su se veće deformacije na terenu okolo brane, nego na samoj brani. Također se ustanovilo da se stijena u spoju s branom ponaša na isti način elastično kao beton i pokazuje potpuno iste deformacije.

Kako ćemo dalje vidjeti za mjerenje kutova s teodolitima potrebno je izgraditi dva stupa za opažanje u neposrednoj blizini temelja brane. Budući da teren blizu brane nije stabilan, tako ova dva stupa ne će sačuvati nepromijenjenu njihovu udaljenost, zato će biti potrebno izgraditi daljnja dva stupa na udaljenijem i stabilnijem položaju, na kojem će se moći vezati osnovni stupovi i kontrolirati njihova udaljenost za vrijeme opažanja (uporedi sl. 7., gdje se jasno vidi između ostalog smještaj trigonometrijskih stupova III. i IV. prema stupovima V. i VI. utvrđeni na stabilnom terenu i reperi I. i II. na brani)

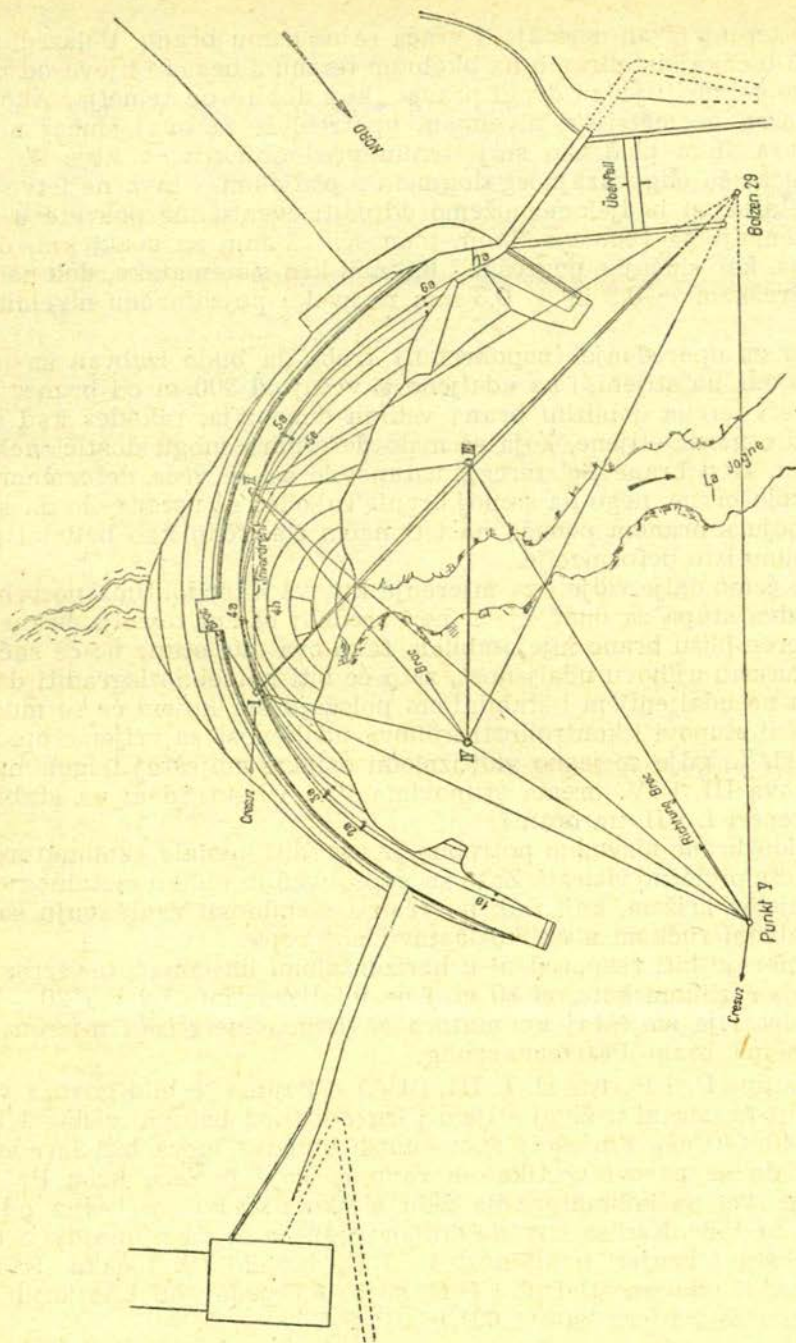
Na zidu brane nizvodno potrebno je ugraditi signale (kolimatore) na koje se može precizno vizirati. Zato su napravljeni u obliku metalnog crnog diska s bijelim križem, koji radi povećanja stabilnosti završavaju sa jednom metalnom ručkom u obliku lastavičinog repa.

Oni moraju biti raspoređeni u horizontalnim linijama i u vertikalnim kolonama s razlikom kota od 10 m, i na udaljenostima od cca 20—40 m. Sl. 8 predstavlja smještaj kolimatora za trigonometrijska mjerenja raspodjeljeni na brani Pfaffensprung.

Dva stupa  $P_1$  i  $P_2$  (na sl. 7. III. i IV.) o kojima je bilo govora ranije moraju biti fundirani u živoj stijeni i izgrađeni od betona, visine 1,10 m, presjeka  $40 \times 40$  cm. Smještaj spomenutih stupova mora biti izveden na taj način da se parovi vertikalnih ravnina koje prolaze kroz  $P_1$  i  $P_2$ , odnosno pravci na kolimatore na zidu sijeku pod kutom većim od  $90^\circ$ , a manjim od  $130^\circ$ . Kad se izgrade stupovi, označe se na njima dvije točke kao stajališta i izmjeri udaljenost  $P_1$  i  $P_2$  između tih točaka. Sada se mogu odrediti udaljenosti  $P_1C$  i  $P_2C$ , gdje je  $C$  jedan od bilo kojih kolimatora, ako se izmjere kutovi  $CP_1P_2$ ,  $P_1P_2C$ .

Za mjerenje kutova neophodno je nužno upotrebiti teodolite prve veličine i ponoviti mjerenje kutova barem 4 puta (potpuno) s vertikalnim krugom desno i lijevo, zatim sredinom eliminirati preostale pogreške rekti-

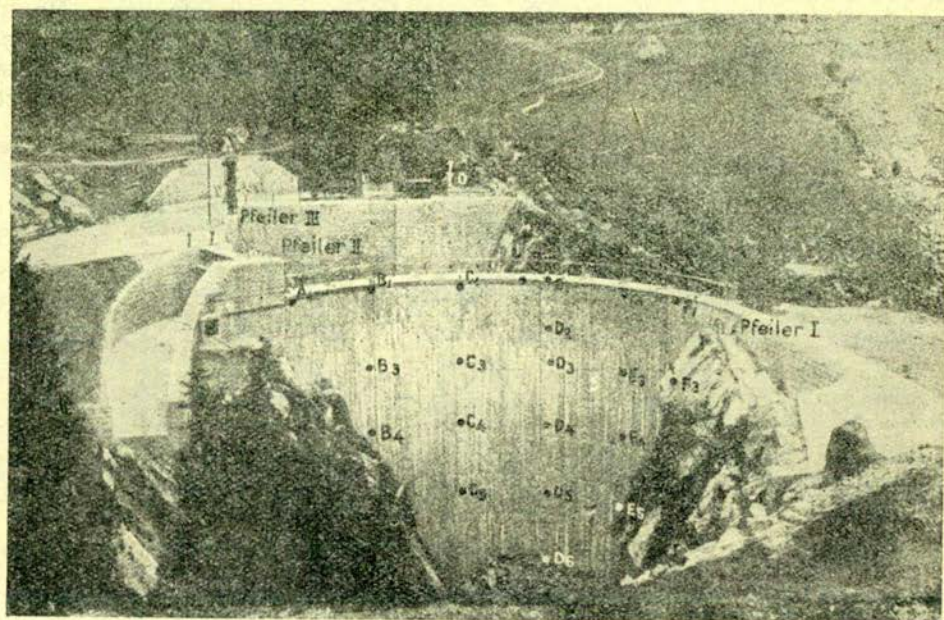




Sl. 7. Snimak trigonometrijski brane Montsalvens (M. Roš).

fikacije instrumenta. Kao najvjerojatniju vrijednost mjenog kuta uzima se srednja vrijednost koja proizlazi iz četiri opažane vrijednosti. Dobro je

poslije odrediti za svaki kut pogreške mjerenja t. j. srednje pogreške jednog kuta i aritmetičke sredine. Ove pogreške mogu služiti kao mjerilo točnosti s kojima su određene koordinate (računate s presjekom naprijed) točaka C i prema tome ustanoviti ne samo stupanj njihove sigurnosti



Sl. 8. Raspored kolimatora za trigonometrijska mjerenja brane Pfaffen-sprung (M. Roš).

nego i nesigurnost eventualnih pomjeranja kolimatora C koji bi se razjasnili ako se ista mjerenja ponove u razmacima vremena, prema raznim uslovima punjenja i temperature (godišnje dobi).

Uključivši zajedno u mjerenja također kutne smjerove kontrolnih stupova  $P_6$  i  $P_4$  moći će se mjerenja na kolimatore C koristiti za eventualno određivanje uzajamnog pokreta stupova  $P_1$  i  $P_2$  prouzrokovani pokretom tla oko brane, uslijed djelovanja hidrostatičkog pritiska.

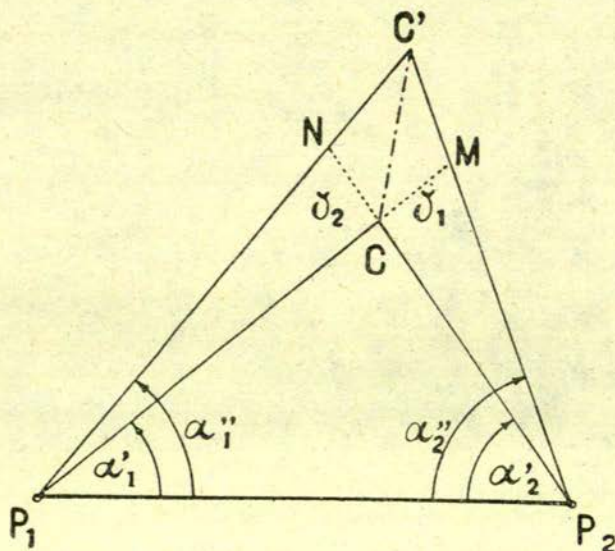
Ako su  $a'_1$  i  $a'_2$  sredine kutova dobiveni u prvoj seriji mjerenja, a  $a''_1$  i  $a''_2$  dobiveni poslije stanovitog vremena, u drugoj seriji opažanja, kolimator C premjestit će se iz C u  $C'$  (vidi sl. 9.) pomak C je predstavljen dužinom  $CC'$ . Uslijed male veličine pomaka  $CC'$  u odnosu na udaljenosti  $P_1P_2$ ,  $P_1C_1$ ,  $P_2C$  i ako se uzmu u obzir male difference između  $a'_1$  i  $a''_1$  te  $a'_2$  i  $a''_2$  može se smatrati četverokut  $CN'CM$  kao paralelogram u kojem pomak  $CC'$  proizlazi iz komponenta  $CN'=(NC')=\delta_1$  i  $CN=(M'C')=\delta_2$ , a koje se dobivaju primjenom sinusnog poučka u trokutima  $P_2CM$  i  $P_1CN$ . Pomak  $CC'$  se izvodi primjenom Carnotove teoreme iz trokuta  $MCC'$ .

Za branu Ceresole Reale (sравни G. Cicconetti Studio trigonometrico delle deformazioni della diga di Ceresole Reale »Ricerche di Ingegneria«

1923.) gravitacionog tipa, u središnjem dijelu visoka oko 50 m, duga 250 m, koja dozvoljava punjenje od 35 miliona kubnih metara vode, ovi su podaci varirali za 20 kolimatora u granicama između  $\frac{1}{2}$  mm do 10 mm.

Udaljenost stupova  $P_1P_2$  bila je za tu branu 239,960 m, a udaljenosti  $P_1C$  i  $P_2C$  od 56 do 220 m.

Opazanja, koja je izvršio Cicconetti izložene u spomenutom članku vršena su u periodu »brana se rastrećuje ljeti«, »brana se opterećuje zimi«. Horizontalni pomaci, većinom uslijed hidrostatsičkog pritiska, su u predviđenom smjeru (nizvodno) i rastu općenito odozdo gore, najveći su u sredini, a smanjuju se prema boku.



Slika 9.

Obzirom na prednje pogreške računate na svakoj stanici za svaki kut, zapažamo da su veće za odnosne kutove bliskih kolimatora prema onima na udaljenije kolimatore. Osciliraju između  $0'',78$  i  $1'',31$  (srednje  $1'',1$ ). Za ova mjerenja je upotrebljen solidni teodolit Starke prve veličine s horizontalnim repeticionim krugom dijametra 26 cm i mikroskopima s mikrometričkim vijkom s direktnim čitanjem  $2''$ . Pomjeranja su na ovaj način podvrgnuta pogreškama unutar intervala  $0,42$  mm —  $1,70$  mm.

Rezultati dobiveni geodetskim postupkom, uspoređeni međusobno i s rezultatima postignutim fizikalnom metodom, omogućuju interesantne studije i zaključke i kad se poznaju još produženja izražena u postocima i podaci laboratorijskih ispitivanja — omogućavaju također određivanje rastezanja. Može se uistinu reći da ovo zadnje određivanje sa naznačenim postupkom nema prigovora, sve do danas ono se na taj način vrši.

Druga određivanja na koncu odnose se na pritisak na teren, na pomake spojeva unutar brane i ispod pritiska (sottospinta).

Pomoću nivelmana moguće je zatim dobiti fizičke karakteristike otpora i deformacije betona i odrediti eventualne nedostatke nepromočivosti piezometričkog stanja u unutrašnjosti brane, kako je učinjeno na pr. za branu »Schlagen«.

U posljednoj analizi dodaju se poznati pokusi za određivanje ubrzanja reza u ravnini fundiranja i glavna rastezanja uslijed pritiska.

Tako se dobila ukratko potpuna slika svih delikatnih i dugih mjerenja koje inženjeri, koji se bave ovim radovima moraju vršiti i to vremenom slijediti. Iz toga moraju rasvijetliti niz činjenica, koje mogu biti sasvim različite od brane do brane, a koje se u svakom slučaju uvijek više kompliciraju s povećanjem visine na temeljima, uslijed čega ostaju u mnogom pogledu nejasne, a također i poslije dugog niza opažanja, kako se dogodilo na pr. za odmicanje pod pritiskom gravitacione brane Suviana (visina 92 m, raspon u kruni 220 m, volumen 290,000 kubnih metara) sa lagano zavijenim tlocrtom prvih 14 god. opažanja (1934—1947), kako proizlazi iz interesantnih studija ing. L. Mirone-a (L'energia Elettrica br. 10—11, 1948), koji se bavio ovim važnim problemom.

Konstrukcije novih i interesantnih brana u mnogim državama svijeta otvaraju dakle Fizici i Geodeziji nova polja istraživanja i iz dugih serija mjerenja, koja se ubrzo moraju staviti na raspolaganje naučnicima, može se nesumnjivo stvoriti sigurna slika o toku raznih pojava i njihovom izgledu; još će jedan put »broj« objasniti pojave proizašle od ovih impozantnih građevina, koje donose dobrobit ljudima i doprinose napretku tehnike.