

## Precizna geodetska mjerenja kao kontrola deformiranja građevinskih objekata

### Povodom puštanja u pogon hidrocentrale Vinodol

Izgradnja velikih industrijskih i drugih građevinskih objekata u našim poslijeratnim prilikama i mogućnostima postavila je velike zahtjeve na sve inženjere i tehničare, pa i na nas geodetske struke. Na tim velikim objektima polagali su se teški ispiti stručnosti i snalažljivosti, a treba priznati, da je za mnoga rješenja bila potrebna i velika smionost.

U osnovnim geodetskim radovima, za čisto geodetske i katastarske potrebe, stekli su naši stručnjaci još ranije velika iskustva. Međutim poslije oslobođenja našli smo se u situaciji da geodetska služba treba dati osnovu za raznovrsna projektiranja sa raznolikim sadržajem i točnošću, a do tada bez potrebnog iskustva, modernih sredstava i pribora, što bi sigurno pomoglo da se osnovni podaci t. j. karte i planovi za projektiranje a i svi ostali podaci daju mnogo brže, potpunije i jeftinije.

O tim radovima, poteškoćama i velikim iskustvima i rezultatima mogli bi se ispisati čitave knjige. Sticanje iskustava je za nama. Možemo slobodno odahnuti s punim uvjerenjem da smo u velikoj većini slučajeva pravilno i dobro radili. Dokaz tome su pravilno situirani i izgrađeni objekti. No treba priznati da sve to zaslužuje s naše strane mnogo veću pažnju, nego što smo do sada učinili.

Hidrocentrala »Vinodol« jedan je od najznačajnijih objekata u NR Hrvatskoj. U ovom prikazu ne želim ulaziti u opširnije iznošenje geodetskih radova, koji su se za projektiranje i izvođenje ovog postrojenja izvodili. Njih je bilo toliko, da se može reći da se ni u jednoj fazi radova od projektiranja pa do montiranja agregata u strojarnici nije moglo proći bez geodetske suradnje i asistencije. Nadam se da će o tome pisati drugovi, koji su na tim radovima radili. Opisat ću u glavnim crtama precizna geodetska mjerenja u podzemnoj strojarnici.

Ove su radove izvodili naši stručnjaci, kako sam spomenuo, bez iskustava bez uzora, literature i modernog pribora, što je sve u normalnim prilikama neophodno za uspješni stručni rad pogotovo, kad je u pitanju ovako odgovoran i osjetljiv zadatak. Radilo se priborom, koji smo imali na raspolaganju. Danas se možda ne bi složili sa stanovitim rješenjima i metodama rada, naročito u pogledu obrade opažakog materijala, ali ta tvrdnja je rezultat postignutog iskustva. Danas bi se ovakav ili slični posao radio s više stručnosti, onda je to bio pionirski rad, izveden pod vrlo nepovoljnim uslovima za precizna mjerenja, pa možemo biti zadovoljni, da su rezultati tadanjih geodetskih stručnih zahvata i naučnih ispitivanja pomogli na ostvarenju ove velike građevine — hidrocentrale »Vinodol«.



### Precizna geodetska mjerenja u strojarnici i razdjelnoj komori hidrocentrale »Vinodol«

Izvjesni dio građevinskih radova na podzemnoj strojarnici u Triblju bio je gotov još prije rata. Poslije oslobođenja nastavljeni su ovi radovi energično i s velikim elanom. Iz strojarnice vadila se zemljišna jezgra, projekat je izmijenjen, nastala su stanovita proširenja glavne hale, a time i nužni radovi na probijanju i rušenju stijena i krša unutar hale.

Iz neobjašnjenih razloga, u prvi mah, pojavile su se u spojnim tunelima između podzemne strojarnice i razdjelne komore pukotine u betonskim zido-

vima (vidi sl. 1). Postojala su razna mišljenja o razlogu pojava tih pukotina i prirodno, ne samo za naša nego i za inostrana iskustva, nisu manjkale bojazni. Objekat se gradio u našem kršu, čija se unutarnja struktura praktički ne može potpuno sigurno ispitati, i prema tome se lako mogao pretpostaviti čitav niz nepoznatih djelovanja.

Prije bilo kakovih gradjevinskih zahvata na saniranju tih pojava bilo je potrebno ispitati, ne samo kako će se ove pukotine ponašati, nego da li uopće na zidove strojarnice i razdjelne komore djeluju kakove sile, koje bi ih mogle nakon vadjenja unutarnje jezgre deformirati. Tu su se dakle trebala izvršiti takova precizna mjerenja, koja su trebala dati uvida u eventualne horizontalne i visinske pomake čitavog područja, unutar kojeg je strojarnica smještena; u plastičnu deformaciju zidova strojarnice i razdjelne komore, kao i o eventualnom prostom oku neprimjetljivom povećanju pukotina u spomenutim zidovima. Precizna geodetska mjerenja tu mogu dati najpotpuniju i najsigurniju sliku.

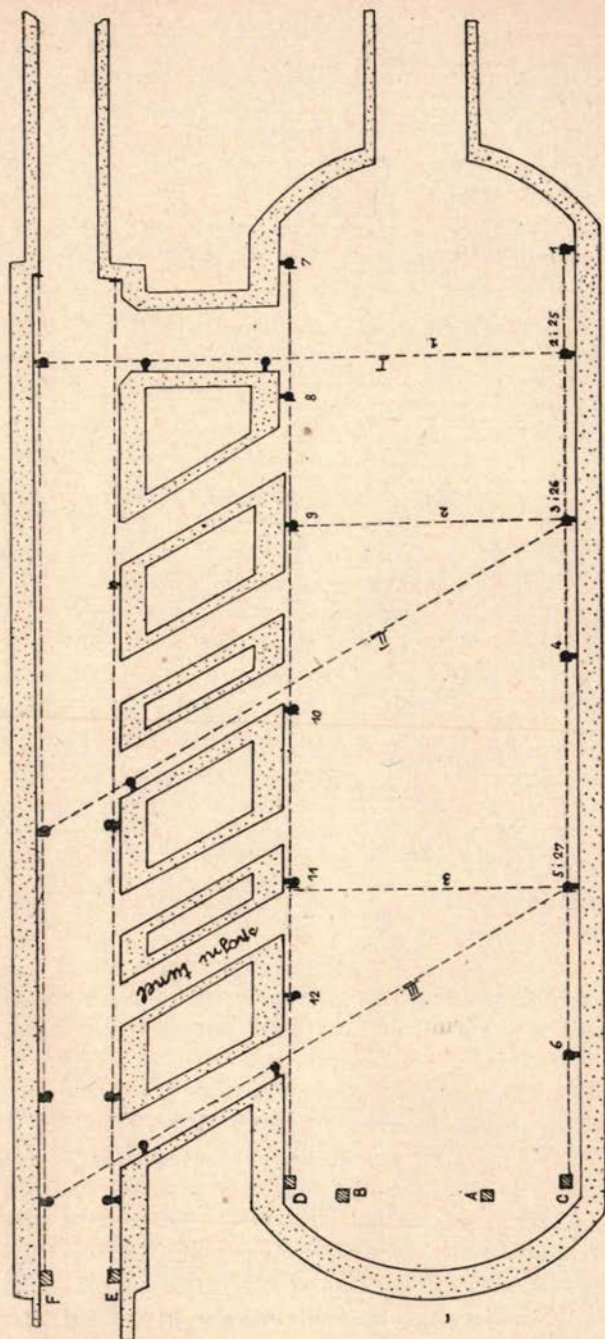
Inostrani specijalista ekspert za hidrotehničke radove pri tadanjem saveznom ministarstvu elektroprivrede Prof. Ludin savjetovao je, da se taj posao povjeri jednom njemačkom specijalisti za te radove. Ovaj je razradio detaljan projekat tih radova, na osnovu kojeg bi se postigli sigurni rezultati, samo je taj projekat imao takove nedostatke, da je za naše prilike bio neizvediv.

U prvom redu trebalo je prema njegovom zahtjevu prekinuti gradjevinske radove u strojarnici na šest mjeseci, za koje bi vrijeme on mogao na osnovu preciznih mjerenja na instaliranim komparatorima ispitivati proširenje pukotina. Trebalo je montirati ništa manje nego tri propisna komparatora s mikroskopima duž profila I II i III kako je prikazano na slici 1.

Sada je vrlo teško opisati i predstaviti kako je u to doba izgledalo u strojarnici: izrovano, zemlja još nepotpuno izvađena, vlažno, bez osvjtljenja, u spojnim tunelima se moralo hodati pognuto, tako da je teško prikazati neodrživost ovakovog projekta, da se i ne govori o milionskoj nabavci u devizama za instalaciju triju komparatora, čekanju dok stignu, a onda obustava radova na šest mjeseci.

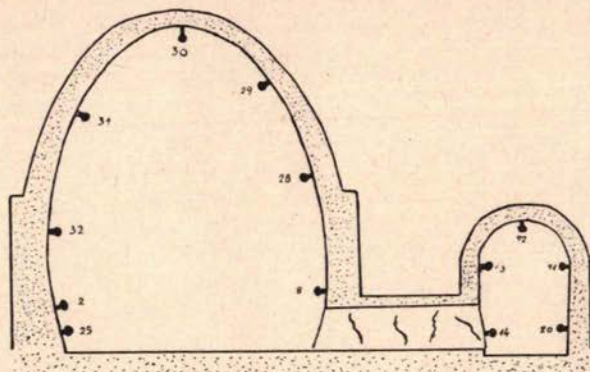
Na taj način ovaj projekat naravno nije usvojen, a time je otpala i suradnja inostranog specijaliste, pa su pozvani domaći stručnjaci da pomognu i da daju svoje mišljenje.

Na konferenciji održanoj u Fužinama 5. VII. 1948. prisustvovali su predstavnici Hidroelektre Ing. E. Nonveiller, projektant »Vinodola« Ing. M. Žugaj, geološki stručnjak specijalista za probleme krša prof. Dr. J. Poljak, od ministarstva elektroprivrede Prof. Adolf Ludin sa svojim asistentom, te ostali potrebni eksperti. Tadanji Geozavod, koji je trebao izvoditi geodetske radove predstavljali su Prof. N. Abakumov, Prof. Ing. M. Janković i geod. E. Adamik. Komisija je bila sastavljena »radi određivanja mjerenja, koja će se izvršiti u svrhu ustanovljenja pokreta, koji nastaju u području podzemnih prostora postrojenja HE Vinodola u Triblju.«



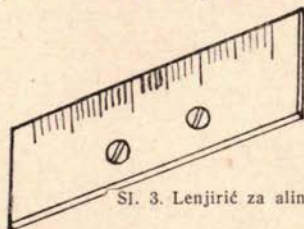
Sl. 1. Shematski prikaz strojarnice i razdjelne komore s glavnim profilima za mjerenje deformacija.

Ovdje smo saznali što se i kakova točnost od naših mjerenja traži, pa smo na osnovu toga dali svoje sugestije kako da se ta mjerenja izvedu s našim sredstvima.



Sl. 2. Shematski prikaz poprečnog profila strojarnice i razdjelne komore, sa označenim pukotinama na zidu dovodnog tunela.

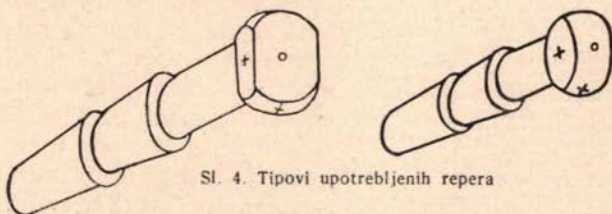
Projektantski dio geodetskih radova preuzeli su na sebe spomenuti stručnjaci, dok izradu i instalaciju potrebnih mjerачkih uređaja, kao i sama mjerenja stručnjaci tadanjeg Geozavoda u Zagrebu uz pomoć profesora sa geodetskog odsjeka tehničkog fakulteta u Zagrebu.



Sl. 3. Lenjirić za aliniranje

Da bi se mogla izvesti potrebna komparacija u mjerenjima, obzirom da je data pretpostavka da se okolno zemljište pokreće, trebalo je da geološki stručnjak označi mjesta unutar strojarnice, a i van nje koja su geološki najsigurnija. Takav je teren postojao i unutar strojarnice pa su na njemu bili smješteni dobro fundirani betonski stubovi, kao baza za opažanja deformacije čitave hale. Na tom dijelu su također na zidovima strojarnice bila smještene konzole za postavljenje instrumenta za kontrolu pomaka aliniranjem (kontrola i mjerenje na bazi utjerivanja u pravac).

Odlučeno je da se u nizu mjerenja, koji bi se opetovali svakih 14 dana mjere dužine između repera postavljenih u zidove hale strojarnice i razdjelne



Sl. 4. Tipovi upotrebljenih repera

komore. Dužine da se mjere invarnom vrpcom vlasništvo Geodetskog odjela Tehničkog fakulteta u Zagrebu.

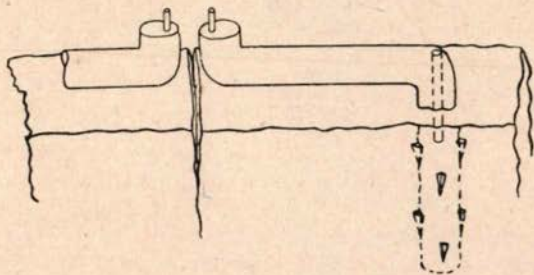
Kako su ovdje bile važne relativne promjene u dužini to se ova vrpca nije morala komparirati da bi se doznala njena točna dužina, ali se zato pažljivo bilježila temperatura i vlaga radi eventualnih promjena u dužini promjenom temperature.

Visinski kutovi da se opažaju sa spomenutih dobro fundiranih stupova (na slici A i B), na marke, koje će se u obliku repera ugraditi u zidove hale u profilima 1, 2 i 3 sl. 1 i 2. Kontrola pomaka aliniranjem vršila bi se također na marke ugrađene u zidove hale sa konzola C D E F (sl. 1), koje bi bile postavljene u zidove hale. Ovdje se moralo, u nedostatku drugih potpuno neovisnih mjesta, pretpostaviti da će zidovi u ovim mjestima biti nepomični i kontrolirati eventualne deformacije u odnosu na ova mjesta.

Visinska pomjeranja da se kontroliraju, gdje god je to moguće preciznim nivelmanom kroz dovodni tunel, vezivajući ova mjerenja za reper, koji je postavljen na sigurnom mjestu izvan ovog područja.

Za aliniranje predloženi su i izrađeni reperi, koji su nosili na sebi lenjiric s milimetarskom podjelom (sl. 3) dok su ostali reperi za položajno i visinsko mjerenje izgledali kako prikazuje slika 4.

Najteže je bilo odlučiti kako da se izvrši mjerenje i kontrola povećanja pukotina. U nedostatku drugih pomagala odlučeno je da se postave posebne željezne šipke, koje bi pukotinu obuhvatile, a na kraju su bile fino zašiljene, tako da bi se eventualna proširenja mogla jednostavno mjeriti mikrometrijskim vijkom (šuberom) mjereći razmake ovih šiljaka (sl. 5).



Sl. 5. Uređaj za mjerenje širine pukotina mikrometarskim vijkom (shematski prikaz)

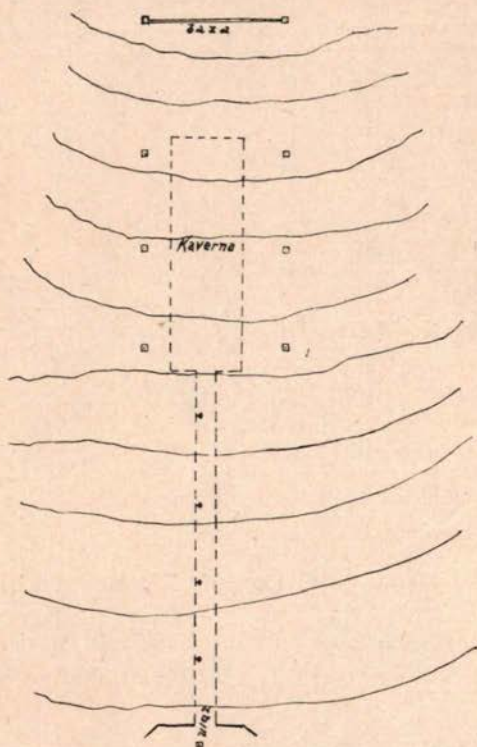
Za kontrolu pomaka terena iznad strojarnice odlučeno je da se postave četiri para dobro fundiranih stupova prema skici (sl. 6). Stupovi su na sebi nosili uređaje za prisilno centriranje, koji su omogućavali da se u svakoj fazi mjerenja instrument postavlja na isto mjesto. Uređaj je bio stalno ugrađen a protiv oštećenja je bio zaštićen metalnom kapom (sl. 7). Kako se ovdje trebalo kontrolirati ne samo pomicanje čitavog terena nego i pojedinih djelova međusobno, to je bilo potrebno pored kontroliranja njegovog apsolutnog položaja, kontrolirati i međusobne linearne odnose stupova. Zato je baza mjerena invarnim žicama, a ostali međusobni položaj stupova određen je trigonometrijski.

Prema tome se navedene operacije mogu sumarno prikazati:

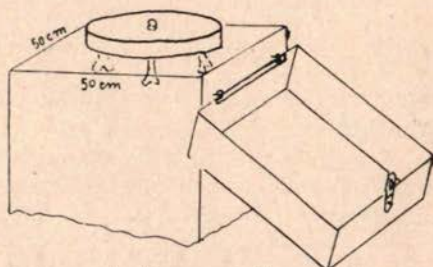
- 1) Opservacija horizontalnih i vertikalnih kutova u cilju položajnog i

visinskog određivanja repera u profilima strojarnice. Upotrebljen je Zeiss-ov teodolit Th II centezimalne podjele.

2) Niveliranje svih repera u pristupnom tunelu, strojarnici i razdjelnoj komori, spojnim tunelima i na vanjskim stupovima metodom preciznog nivelmana. Upotrebljen je Zeiss-ov nivelir NiB s plan-pločom i invarna letva s polucimetarskom podjelom.



Sl. 6. Položaj nadzemnih stupova za kontrolu pomaka čitavog područja  
Sl. 7. Stup za uredjenjem za prisilno centriranje i zaštitnom kapom



3) Mjerenje dužina u profilima I, II i III između krajnjih repera. Upotrebljena je inavrna vrpca 12 m dužine:

4) Snimanje pukotina u spojnim tunelima i kontrola njihovog ponašanja. Mjerilo se mikrometrijskim vijkom.

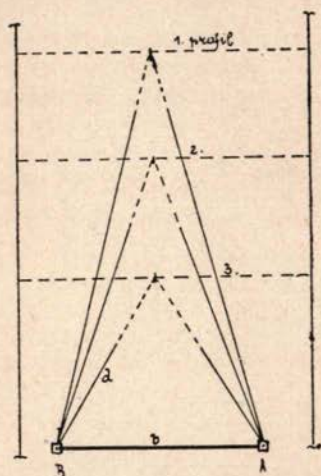
5) Kontrola eventualne deformacije zidova (vitoperenje) aliniranjem sa konsola ugrađenih u zidu. U nedostatku drugog instrumenta upotrebljen je teodolit, a opažanje vršeno u oba položaja durbina.

Mjerenja pod 1, 2 i 3 izvršena su 3 puta u mjesecu studenom i prosincu 1948. i siječnju 1949., dok pod 4 i 5 izvršena su 4 puta kad i ostala mjerenja i još jednom u svibnju 1949.

Kako je već napomenuto pomaci repera u profilima hale određivali su se na osnovu mjerenja horizontalnih i vertikalnih kutova. Svakako da točnost ovih određivanja nije onih veličina, koje bi mogle kontrolirati pomake veličine desetine milimetara. Ipak se na osnovu podataka nakon računjanja može prosuditi, da je postignuta visoka točnost.

Koordinate pojedinih točaka na profilima određivale su se presjekom naprijed sa točaka baze AB, odnosno polarnim načinom iz poznate dužine i smjernog kuta uzevši bazu AB kao apsisnu os X. Svakako da točnost ovisi o pravilnosti presjeka pravaca i prema tome je različita za pojedine profile.

Prema slici prostorne koordinate mogu se računati na osnovu ovih jednostavnih formula:



$$\begin{aligned}\Delta y &= d \sin \nu \\ \Delta x &= d \cos \nu \\ \Delta z &= d \operatorname{tg} \beta\end{aligned}$$

1.

Sl. 8.

gdje je  $d$  dužina od jedne točke baze,  $\nu$  smjerni (direkcionni) kut a  $\beta$  vertikalni kut

Pravci su mjereni u šest girusa i prema podnesenom izvještaju postignuta je prosječna točnost mjenenog pravca od  $\pm 3''$ . Srednja pogreška kuta je prema tome

$$m_a = m \sqrt{2} = \pm 3 \sqrt{2} = \pm 4,2$$

Srednja pogreška koordinata dobit će se iz totalnog diferencijala gornjih formula 1. t. j.

$$M^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial d}\right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 m_\alpha^2$$

U ovoj jednadžbi je  $f$  jedna od gornjih funkcija  $d$  mjerena odnosno sračunata dužina, a  $\alpha$  općenito kut.

U našem slučaju se  $d$  računa iz trokuta čija je osnovica dužina baze  $AB = 10$  m.

Ova se dužina može uzeti kao konstantna vrijednost, pa će srednja pogreška dužine  $d$  ovisiti isključivo o točnosti mjerenja kutova.

Formula za računanje dužine iz trokuta glasi:

$$d = \frac{b \sin \alpha}{\sin \gamma}$$

Srednja pogreška ove funkcije bit će:

$$m_d^2 = \left(\frac{\partial d}{\partial \alpha}\right)^2 m_\alpha^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \gamma}\right)^2 m_\gamma^2$$

odnosno za naš slučaj i smatrajući da je  $m\alpha = m\gamma = m$  bit će:

$$m_d = d \frac{m''}{\rho''} \sqrt{\cotg^2 \alpha + \cotg^2 \gamma}$$

Na osnovu ove formule, uvrstivši potrebne veličine određene su srednje pogreške dužina za pojedine profile. Tako je prosječna srednja pogreška u trećem profilu  $m\alpha = \pm 0,16$  mm, a u prvom  $\pm 0,50$  mm.

Na osnovu ranije navedene opće formule sračunate su srednje pogreške koordinata. Tako je njihova prosječna točnost izražena srednjom pogreškom u prvom profilu  $\pm 0,25$  mm, a u trećem  $\pm 0,08$  mm. Maksimalno odstupanje bila bi trostruka srednja pogreška od ovih t. j. 0,75 mm i 0,24 mm. Pojava većih odstupanja od ovih ukazala bi na eventualne grube pogreške ili eventualne deformacije. Međutim na osnovu tri serije opažanja nije se ustanovilo prekoračenje gornjih granica i prema tome se nisu mogla ustanoviti nikakva pomjeranja.

Nivelmanom su postignuti svakako bolji i pouzdaniji rezultati. Da bi se izbjegle sistematske pogreške, koje su vezane za letvu i njeno postavljanje, postavljene su u drugom i trećem mjerenju uvijek iste letve na iste repere.

Točnost ovih mjerenja mogu se vrlo lijepo prikazati na rezultatima iz tri zatvorena nivelmanska poligona

Poligon	odstupanje	dužina u km	$\frac{f^2}{p}$	$f^2$
I	+ 0,30	0,124	0,09	0,73
II	+ 0,20	0,126	0,04	0,33
III	- 0,10	0,170	0,01	0,16

$$\text{Srednja pogreška } m = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum \frac{f^2}{p}}$$

Srednja pogreška  $m = \pm 0,2$  mm

Uzevši opet trostruku srednju pogrešku kao maksimalnu granicu pogreška mjerenja, sve promjene u visinama iznad ovih mogu se pripisati eventualnim slijegavanjima i deformaciji. Mjerenja su ukazala na pojedinačna odstupanja do 0,5 mm, međutim na temelju toga se nije mogao stvoriti neki sigurni zaključak, jer su ova mjerenja izvedena u suviše malim vremenskim razmacima, a daljna se ispitivanja nisu mogla vršiti radi napredovanja građenja.

Dužine u profilima I, II i III mjerile su se invarnom vrpcom od 12 m u 8 ponavljanja. Postignuta je točnost od  $\pm 0,10$  mm. Ni kod ovih mjerenja nisu se pojavila takova odstupanja, na osnovu kojih bi se moglo zaključiti da postoje neka pomjeranja.

Najpreciznije i najsigurnije podatke dala su mjerenja širine pukotina, koja su se vršila mikrometarskim vijkom. Postignuta je točnost od  $\pm 0,03$  mm. Nakon izvršene četiri serije mjerenja nije se moglo, izuzev kod dva repera, ustanoviti proširenje pukotina (sl. 10.). I ova dva, gdje se ustanovilo proširenje od 0,10 mm nijesu mogla poslužiti kao siguran podatak iz kojih bi se mogla zaključiti neka zakonitost za proširenje pukotina u spojnim tunelima.



Kontrola aliniranjem također je dala vrlo sigurne i precizne podatke. Lenjirići koji su bili montirani na ugrađenim reperima imali su na sebi milimetarsku podjelu i točnost očitovanja je bila  $\pm 0,1$  mm.

I ovim se ispitivanjem ustanovilo da ni u jednom slučaju nije prekoračena granica trostruke srednje pogreške, na osnovu čega bi se moglo zaključiti da postoji neko deformiranje (vitoperenje) zidova hale strojarnice i razdjelne komore.

Kako se može vidjeti i na samom projektu mjernih uređaja, sve su metode mjerenja međusobno bile povezane preko identičnih repera i točaka. Zato su se rezultati mjerenja međusobno upotpunjavali tako da je jedna metoda mjerenja drugu kontrolirala, pa se na taj način postigla velika sigurnost i pravilnost rezultata, a prema tome i zaključaka koji su se na osnovu ovakvih rezultata mogli donijeti.

Tako na primjer da je postojalo djelovanje nekih sila, koje bi težile prema unutrašnjosti hale to bi se sigurno odrazilo na dužine u profilima I, II i III, na rezultate aliniranja, kao i na izgled profila cijele hale.

Rezultati mjerenja su grafički bili prikazani na taj način, što su se profili nacrtali prema prvom mjerenju, a ostale serije mjerenja su prikazane kao odstupanje od prvog u mjerilu 1:1. Mikrometarska mjerenja bolje rečeno odstupanje od prvobitnog mjerenja predstavljala su se grafički u mjerilu 100:1.

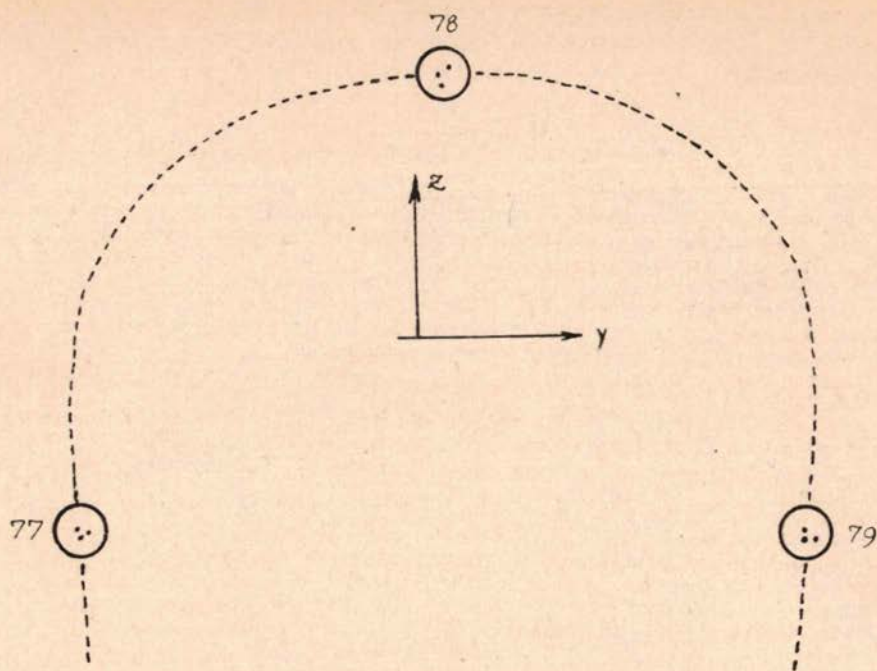
Radi pomanjkanja prostora donosimo samo neke grafičke prikaze, iz kojih se može vidjeti postupak u radu, a također i neka zakonitost u mjerenju. Slika 9 prikazuje grafički prikaz mjerenja na jednom profilu razdjelne komore, sl. 10 grafički prikaz mjerenja pukotina.

Mjerenja na površini dala su slične rezultate t. j. potvrdila rezultate mjerenja unutar strojarnice.

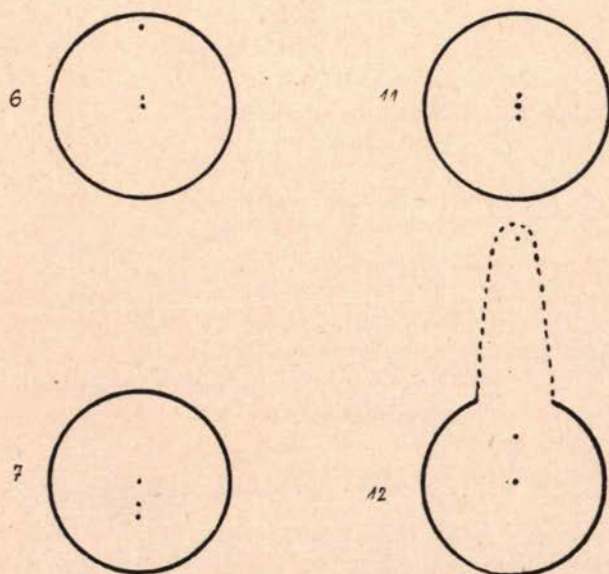
Na osnovu svega ovoga mogla je komisija, koja je ovim poslovima rukovodila dati konačno mišljenje, koje se može formulirati u nekoliko točaka:

- 1) da su sva mjerenja izvršena potrebnom i mogućom točnošću.
- 2) Da u periodu od studenog 1948. do siječnja 1949. nijesu se u geodetskim mjerenjima pojavila odstupanja veća od trostruke srednje pogreške mjerenja, koja se na osnovu teorije pogrešaka mogu u nizu opažanja jednake točnosti očekivati. Prema tome se može prosuditi da ne postoji niti pomicanja, a niti deformacije u bilo kojem smislu.
- 3) Da na osnovu ovakvih rezultata mjerenja nije potrebno nastaviti s mjerenjima u istom obimu, dok se ne bi u postrojenjima izvršili znatniji radovi, koji bi mogli eventualno poremetiti ravnotežu, kao vađenje jezgre, potkopavanje temelja glavne hale i slično, tim više što se kod ovih radova mora minirati.
- 4) Da se mjerenja pukotina mikrometarskim vijkom i aliniranje produži, jer daju veliku točnost s malim utroškom vremena i truda a neposredno kontroliraju promjene u pukotinama i eventualne plastične deformacije zidova.

U ovim preciznim mjerenjima učestvovali su iz tadanjeg Geozavoda geod. Emil Adamik, Ivan Krajciger, Ing. Branko Kres, Ing. Franjo Heschmer i drugi, a sa tehn. fakulteta asistent Ing. Ivan Reiser.



Sl. 9. Grafički prikaz odstupanja u jednom dijelu profila razdjelne komore u mjerilu 1 : 1



Sl. 10. Grafički prikaz odstupanja kod mjerenja pukotina u mjerilu 100 : 1

Nakon ovih mjerenja i mišljenja koje je dala komisija, građevinski su stručnjaci izvršili potrebne radove na saniranju ovih pojava sigurni da nema bojazni od deformacije odnosno pokreta okolnih masa.



Danas kad je već hirocentrala »Vinodol« gotova i djelomično puštena u pogon mogu se još samo na zidovima razdjelne komore vidjeti ostaci uređaja za ova mjerenja, naime reperi za aliniranje i visinski reperi. Sve je drugo ostalo sakriveno i zaboravljeno iza impozantne građevine ove električne centrale.

Naši su stručnjaci savjesno radili i dali sve što su mogli dati, zadovoljni da su pomogli izgradnji ovog velikog objekta. Koliko su kod toga doprinijeli to ja ne mogu ocijeniti, ali sam svakako uvjeren da taj udio ne može biti adekvatan priznanju, koje se često geodetskim stručnjacima poslije izgradnje ne možemo reći, ovog, nego niza drugih velikih objekata daje t. j. da ih se uopće ne spomene da su kod toga učestvovali.

Zato neka bude i ovaj članak pokušaj da se izađe iz tog kruga naše prevelike skromnosti, pa da bude poticaj da se slični radovi prikažu, ako ne kao ocjena rada i neki stručni doprinos, a ono barem zapis kroničara o radu geodetskih stručnjaka u fazi naše industrijske izgradnje.

U razdjelnoj komori mogli bi se primjetiti još uređaji, koji su poslužili u završnoj fazi ispitivanja probnim opterećenjem cjevovoda, za kontrolu položajnih i visinskih pomaka temelja cjevovoda nakon maksimalnog opterećenja vodom u kosom tlačnom cjevovodu. Tu su se opet koristila precizna geodetska mjerenja, koja su dala uvida u solidnost izvedbe ove građevine, kao i podatke i materijal za kontrolu pravilnosti statičkih proračuna i izvedbe građevinskih radova.