



HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA
Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva 2020.

Geotehnički aspekti projektiranja i građenja RHE Velebit

Ivan Vrkljan i Antun Szavits-Nossan

Prof. em. Ivan Vrkljan, dipl.ing.rud., Građevinski fakultet u Rijeci;

Dr. sc. Antun Szavits-Nossan, dipl.ing.građ., ASN-GEO d.o.o., Zagreb.

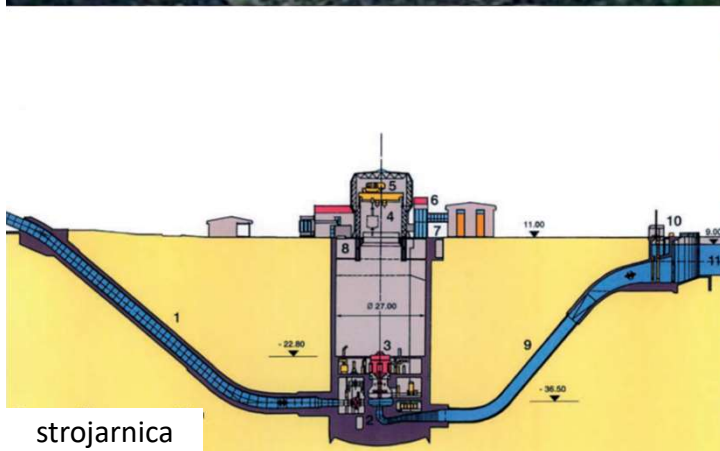
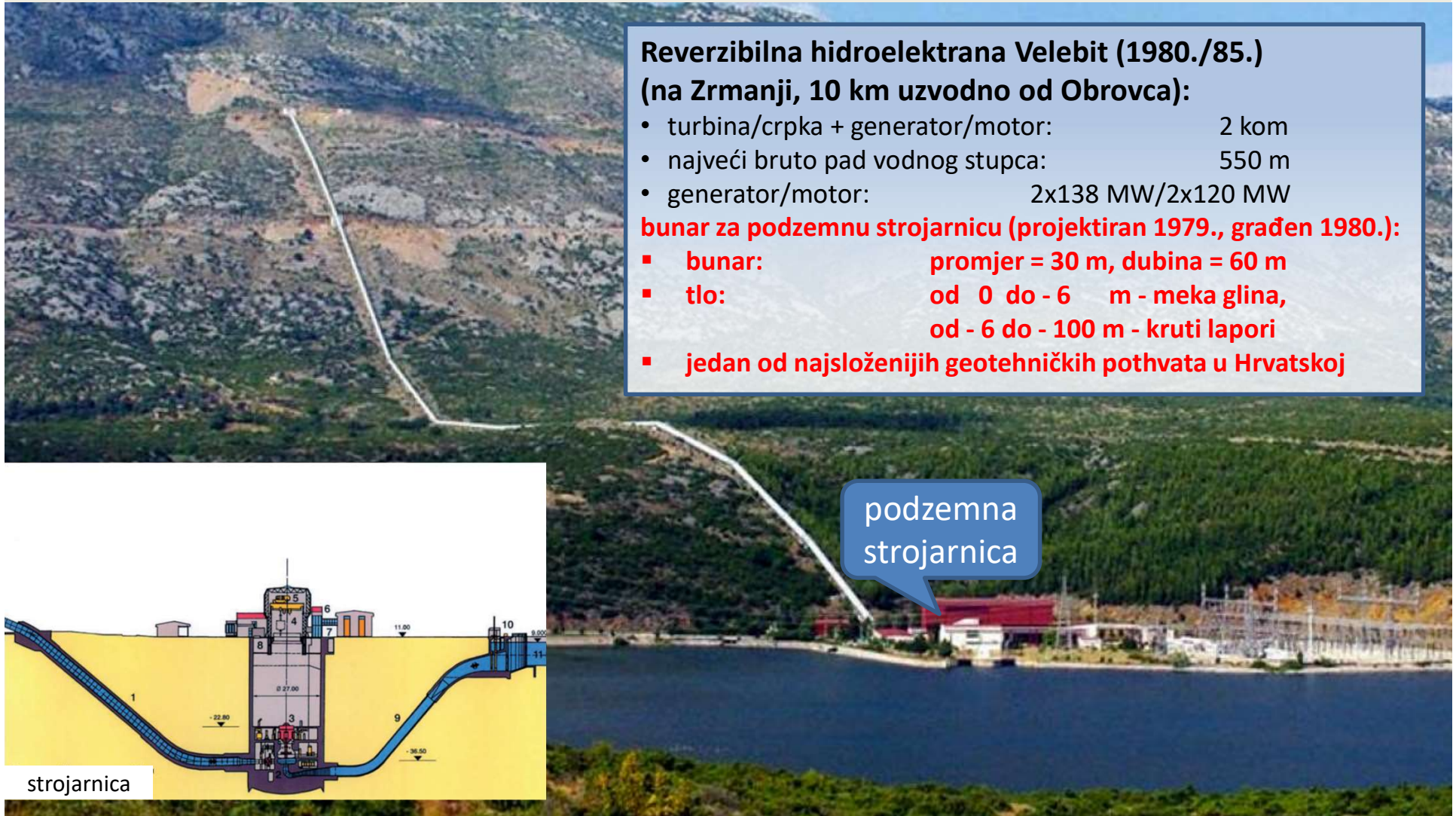
Uvod – 40 godina od uspješnog spuštanja bunara podzemne strojarnice RHE Velebit

Reverzibilna hidroelektrana Velebit (1980./85.) (na Zrmanji, 10 km uzvodno od Obrovca):

- turbina/crpka + generator/motor: 2 kom
- najveći bruto pad vodnog stupca: 550 m
- generator/motor: 2x138 MW/2x120 MW

bunar za podzemnu strojarnicu (projektiran 1979., građen 1980.):

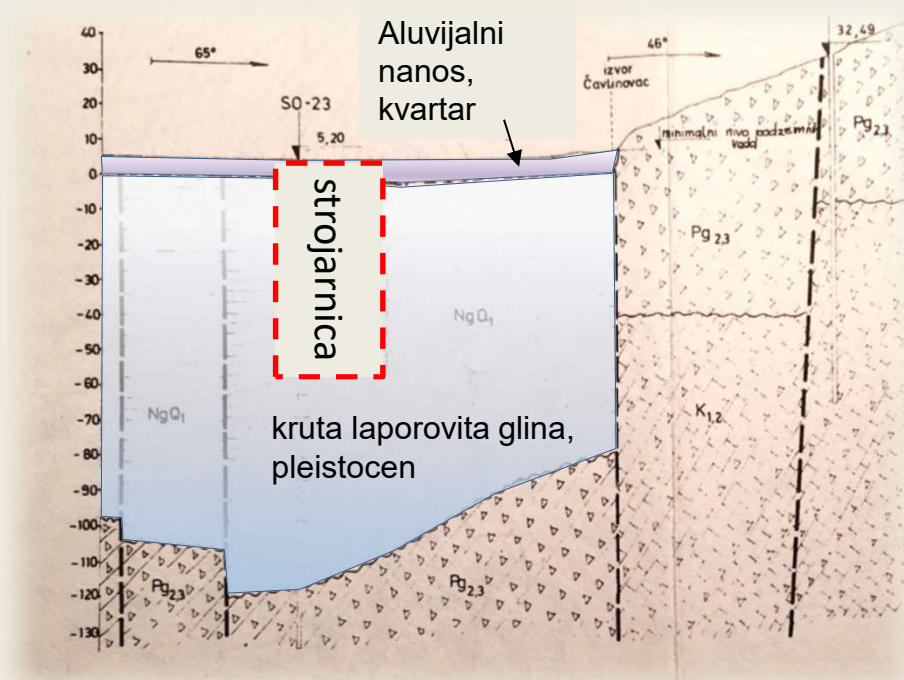
- bunar: promjer = 30 m, dubina = 60 m
- tlo: od 0 do - 6 m - meka glina, od - 6 do - 100 m - kruti lapori
- jedan od najsloženijih geotehničkih pothvata u Hrvatskoj



Projektiranje bunara



Geotehnički istražni radovi

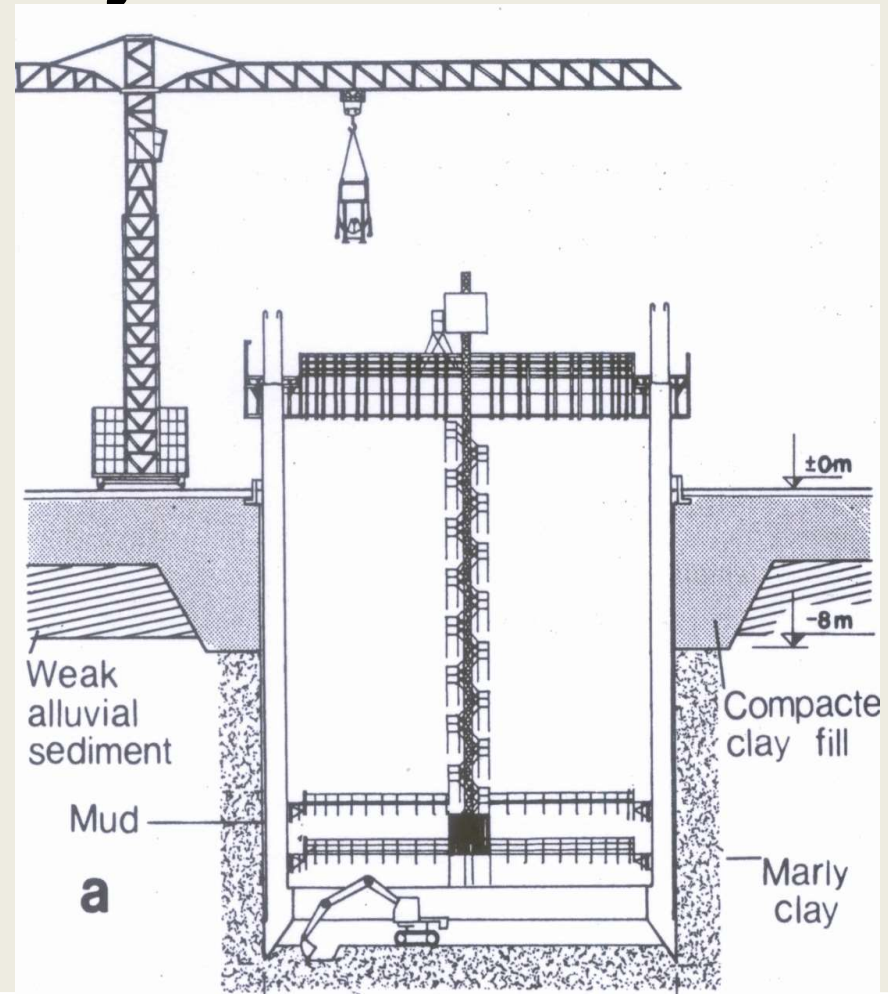


Provedena brojna i raznovrsna terenska i laboratorijska geološka i geotehnička istraživanja (dvije faze, preko 1 km bušotina, više stotina laboratorijskih pokusa, ...)

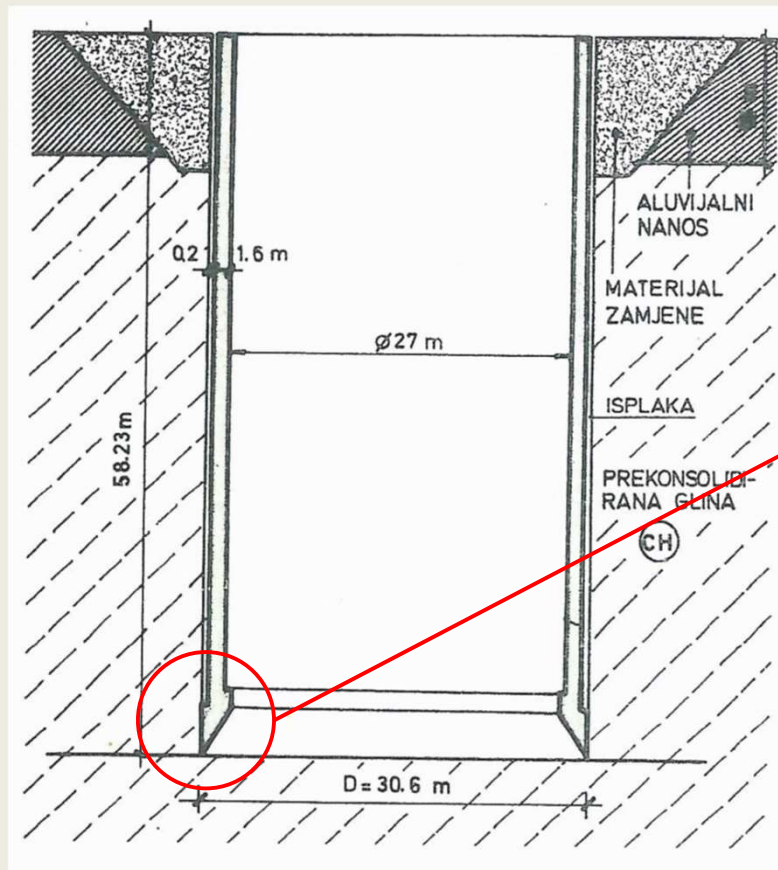
parametar krute laporovite gline	raspon
prirodna vlažnost	18-22 %
granica stezanja	20-25 %
granica plastičnosti	25-30 %
granica tečenja	48-55 %
koloidna aktivnost	1,1-1,5
gustoća mase tla	2,0-2,1 t/m ³
gustoća mase čestica	2,61-2,78
sadržaj CaCO ₃	23-28 %
jednoosna čvrstoća	240-2100 kPa
efektivna kohezija	14-88 kPa
efektivni kut trenja	22°-32°
tangentni edometarski modul (opterećenje)	13-35 Mpa
tangentni Youngov modul iz troosnog uređaja	27-65 MPa
tangentni Youngov modul iz Menardove sonde	220-375 MPa
brzina posmičnih valova (od 5 do 80 m dubine)	370-640 m/s
brzina uzdužnih valova (od 5 do 80 m dubine)	1670-1200 m/s
hipotetska visina nadsloja koji je izazvao prekonsolidaciju gline	oko 200 m
vodopropusnost	1-8x10 ⁻⁹ cm/s

Izbor načina izvedbe građevne jame za strojarnicu

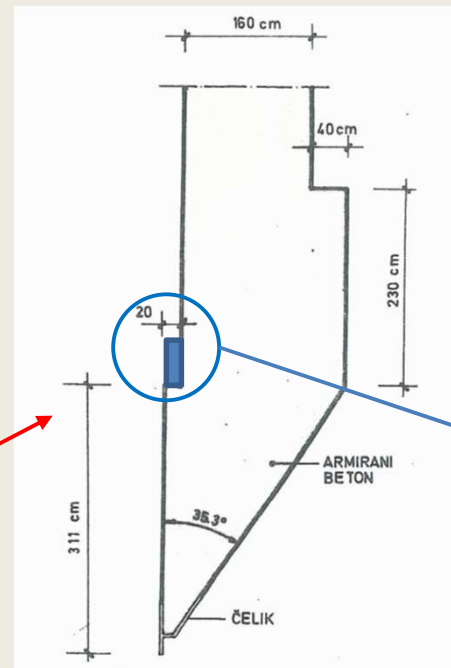
- Natječajna rješenja (1978.):
 - iskop kružne jame uz klasičnu tunelski zaštitu,
 - iskop kružne jame uz zaštitu armirano-betonske dijafragme,
 - armirano-betonski bunar koji se na vrhu gradi u visinu kliznom oplatom, a spušta istovremenim iskopom tla u dnu; trenje između plašta bunara i tla eliminira se zazorom kojeg čini prošireni nož bunara pri dnu, a ispunjen je posebnom tekućinom - isplakom (20 % jeftinije i 2 do 4 puta brže građenje – 5 mjeseci, druga polovina 1980.) – Prihvaćen prijedlog Industrogradnje prema rješenju Vladimira Despotovića, dipl.ing.građ.



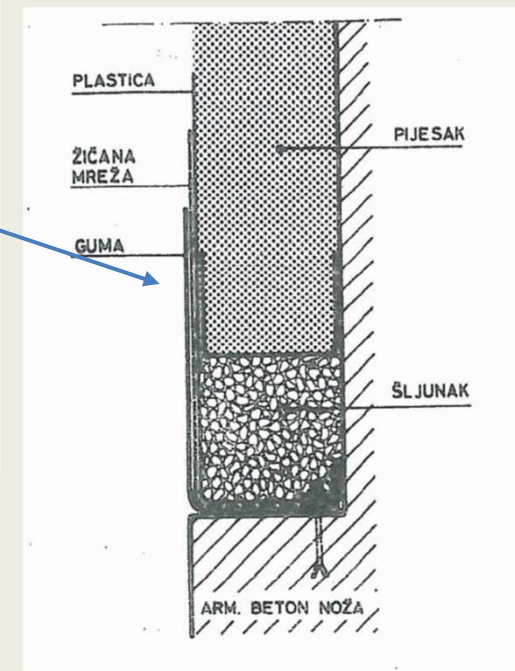
Izabrane dimenzije bunara, noža i zamjena mekog tla na površini



bunar na konačnoj dubini



detalj noža s brtvom



brtva

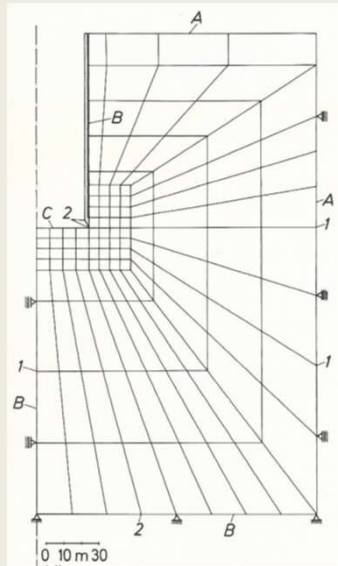
Nestandardni kritični elementi geotehničkog projektiranja prije izvođenja

1. Vodoravno naprezanje u tlu prije i tijekom spuštanja bunara radi dimenzioniranja konstrukcije noža i određivanje vertikalnog trenja između noža i tla – zbog spriječenog bočnog pomaka raste bočni pritisak tla na nož pri spuštanju bunara u odnosu na početno naprezanje u tlu;
2. trenje između noža i tla pri njegovu propadanju mora biti manje od trenutne težine bunara;
3. širina zazora između stijenke bunara i tla, a kojeg stvara prošireni nož pri spuštanju, mora biti veća od bočnog pomaka tla uslijed relaksacije vodoravnog naprezanja nakon prolaska noža - sve da bunar ne bi zaglavio zbog bočnog trenja;
4. utjecaj isplake u zazoru između stijenske bunara i tla na tlakove porne vode u okolnom tlu (hidrodinamičko strujanje vode u tlu), a time i na vodoravne pomake tla iznad noža prilikom spuštanja; sprečavanje prodiranja isplake uz stijenk u noža;
5. stabilnost dna građevne jame.

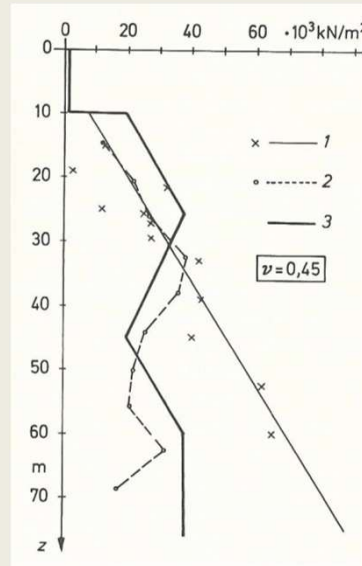
Geotehnički projekt bunara: E. Nonveiller i A. Szavits-Nossan (Građevinski fakultet, Zagreb), N. Grubić i D. Kovačić (Geoexpert, Zagreb).



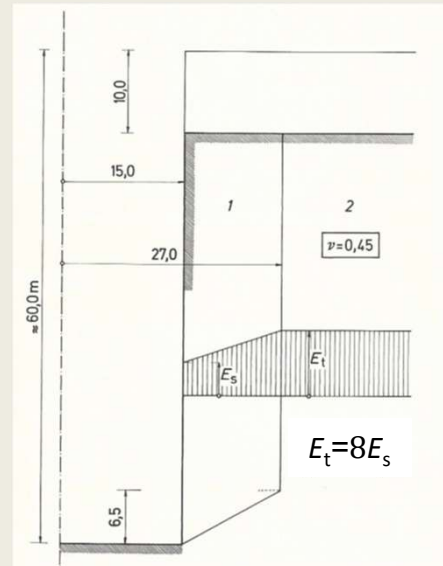
Geotehnički proračuni naprezanja i deformacija



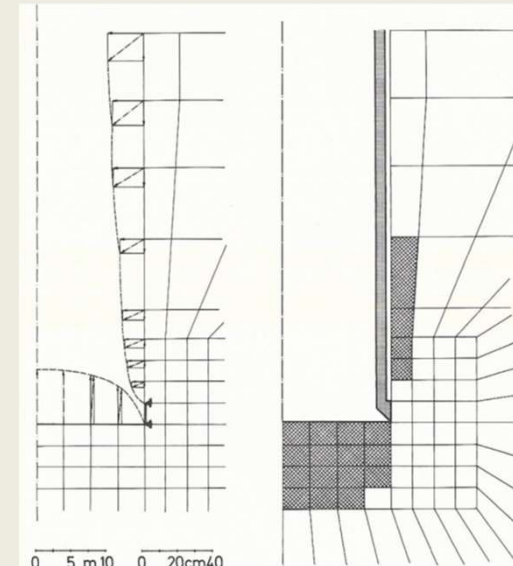
mreža konačnih elemenata (A/C – hidraulički potencijal 100%/0%; B – nepropusna granica)



Youngovi moduli E_t (1-trosni pokusi, 2 presio-
metar, 3 računski



vodoravna raspodjela računskih modula



računski pomaci i zone plastifikacije

- Prva primjena metode konačnih elemenata u rješavanju praktičnog geotehničkog problema u Hrvatskoj (1978./79.) – programi: GEOF sa Sveučilišta Swansea za deformacijske analize kojeg je u Zagreb donio Davorin Kovačić, te program FEDAR za procjeđivanje vode kroz tlo; Proračun proveden na računalu UNIVAC 1110 u Sveučilišnom Računskom Centru u Zagrebu (SRCE); podaci su se unosili preko bušenih kartica, a numerički rezultati dobivali iz debelih papirnatih „listinga”.

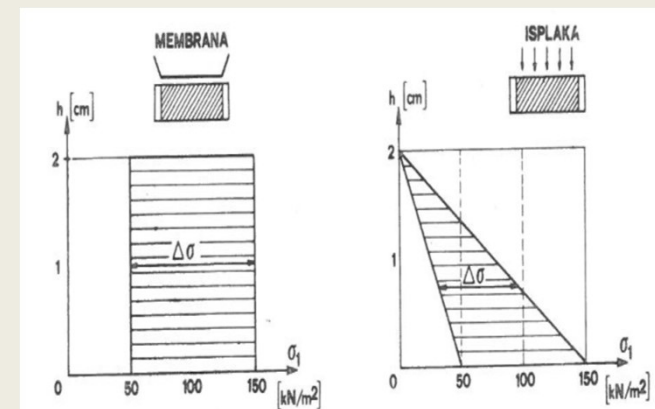
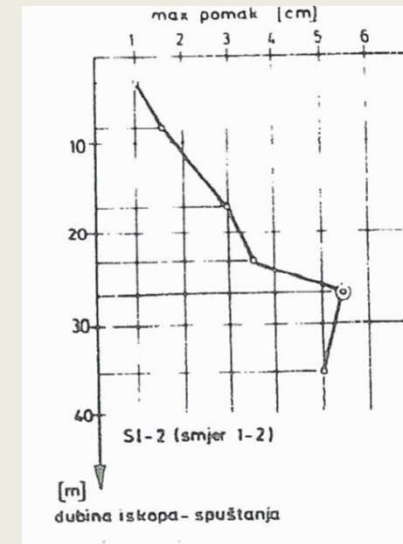
Postavke proračuna i rezultati

- **Linearno elastične karakteristike tla**; nelinearnost simulirana smanjenjem krutosti tla u okolini bunara;
- **uzeto u obzir strujanje podzemne vode** uz pretpostavku nepropusne granice tla prema isplaci i prema kontaktu s nožem te propusna granica u dnu iskopa;
- **Područje plastifikacije procijenjeno približno** usporedbom izračunatih efektivnih naprezanja s Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće ($\varphi' = 26^\circ$, $c' = 100$ kPa);
- **Proračunati najveći vodoravni pomak tla prema zazoru: 23 cm; najveći ukupni vodoravni pritisak tla** (efektivni + porni tlak vode) **na stjenku noža: 950 kPa** (nepropusna granica između isplake i tla), **odnosno 1250 kPa** (propusna granica između isplake i tla); (najveći pritisak na stjenku bunara iznad noža je hidrostatski pritisak isplake koji iznosi oko 600 kPa).
- **Zone plastifikacije su lokalne i ne izazivaju globalni slom tla.**



Ocjena glavnih elemenata proračuna u svjetlu iskustva tijekom spuštanja bunara

- **Oko bunara izvedene su tri inklinometarske bušotine**; samo jedna je davala pouzdane podatke koji su pokazali maksimalni horizontalni pomak tla od oko 5,4 cm i to za situaciju kada je isplaka prodrla u dno iskopa na dubini spuštanja bunara od oko 30 m; to su **oko 4 puta manji mjereni pomaci od računatih** što upućuje na isto toliko puta podcijenjenju krutost tla;
- **naknadni usporedni pokusi opterećenja krute gline isplakom u edometru preko nepropusne gumene membrane ili pak neposredno bez membrane pokazali su**, nakon konsolidacije uzorka tla, **da je deformacija uzorka bez membrane duplo manja od one sa membranom**; to je moguće samo ako su efektivna naprezanja u uzorku bez membrane prosječno manja od onih kad je gumena membrana postavljena; **to je slučaj kad je granica između isplake i tla propusna** (za razliku od pretpostavki iz proračuna!).



Izvođenje bunara



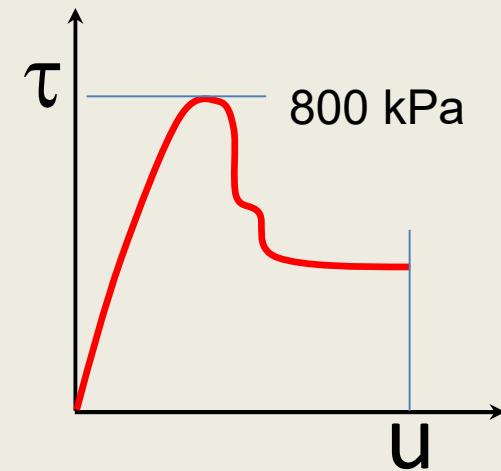
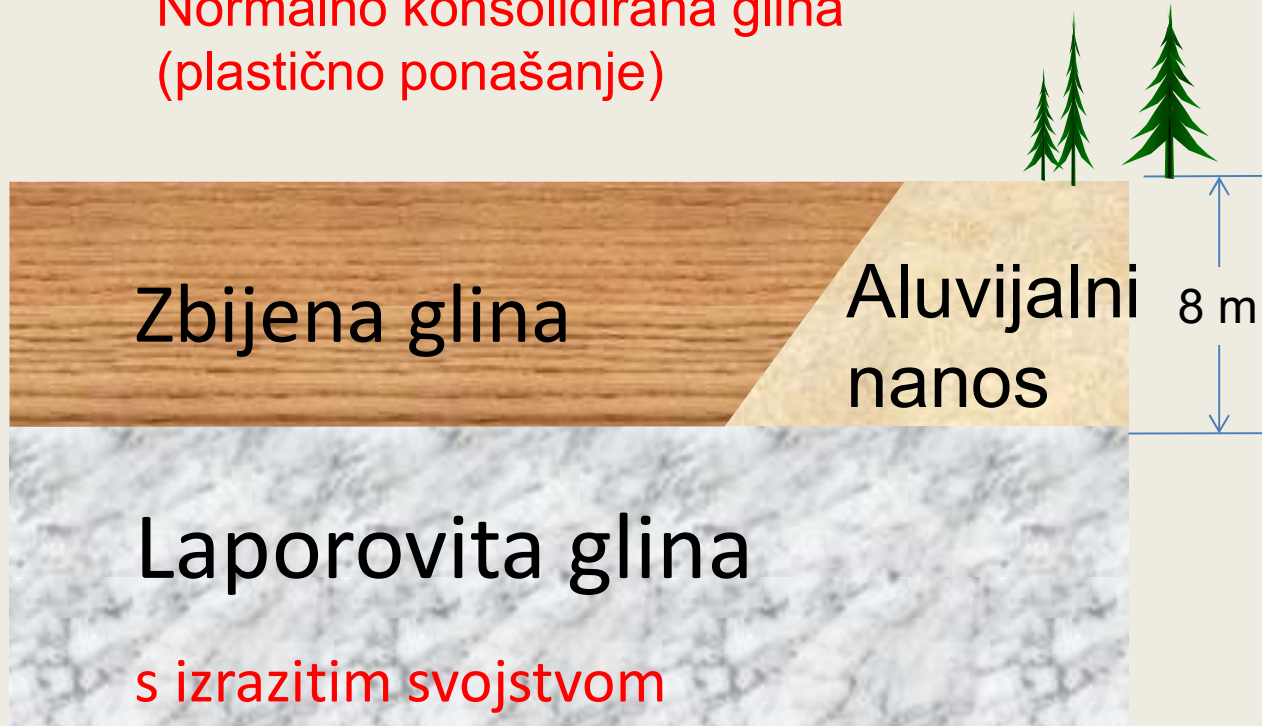
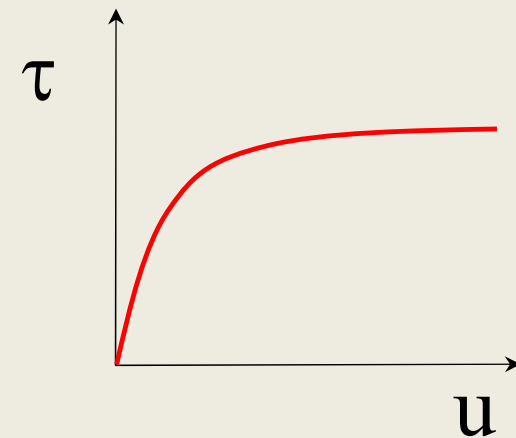
Aluvijalni nanos zamijenjen je zbijenom glinom.

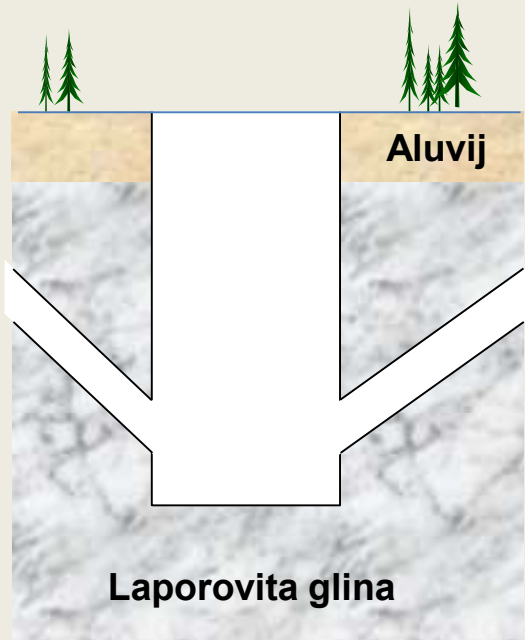
Svojstva zbijene gline:

$C=6-13 \text{ kPa}$

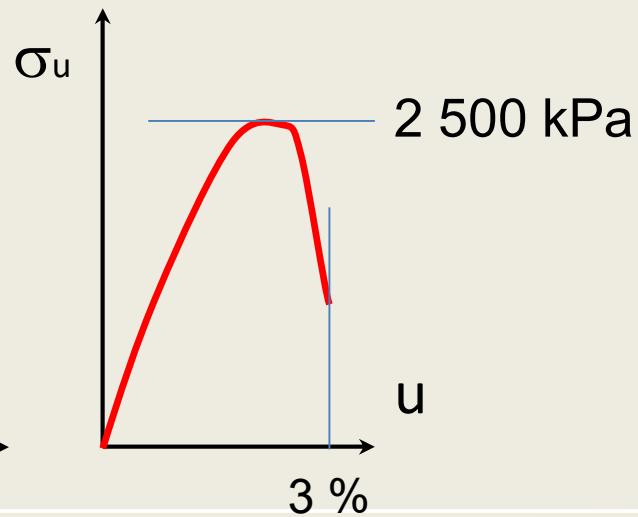
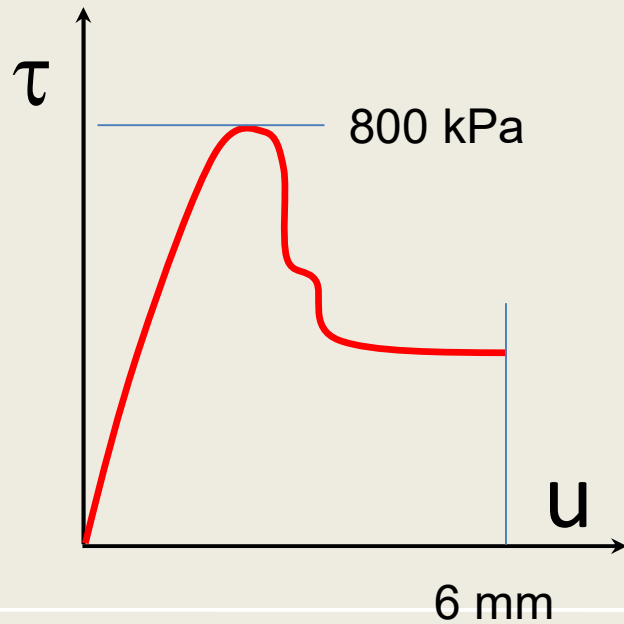
$\phi=26^{\circ}-29^{\circ}$

Normalno konsolidirana glina
(plastično ponašanje)

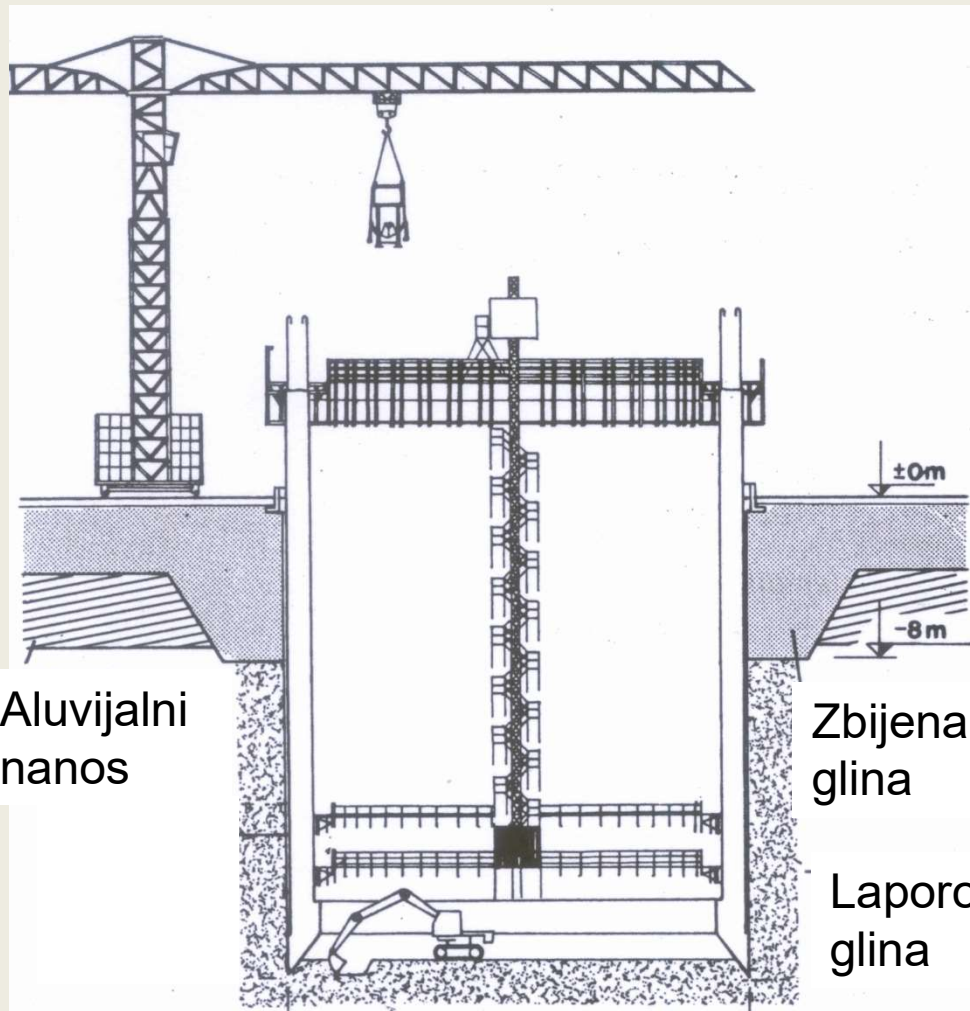




Laporovita
glina



Laporovita
glina s
izrazitim
svojstvom
omekšavanja

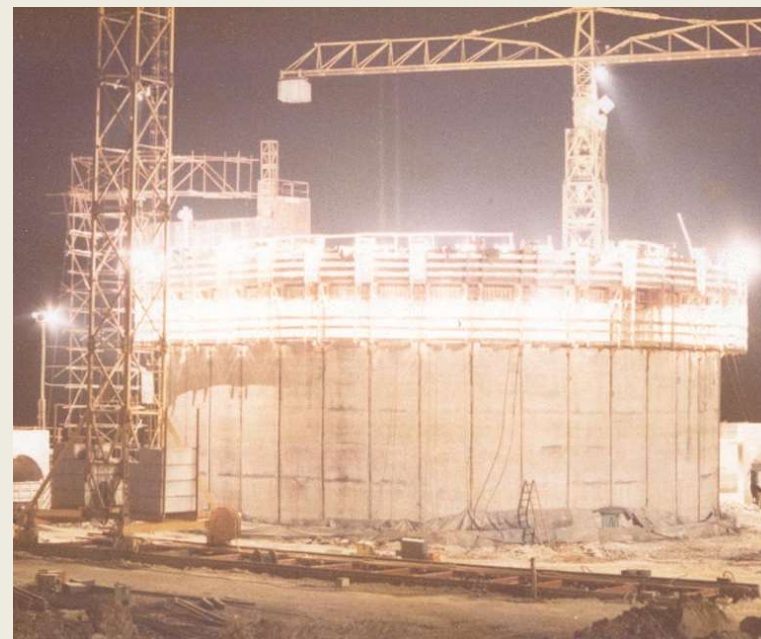


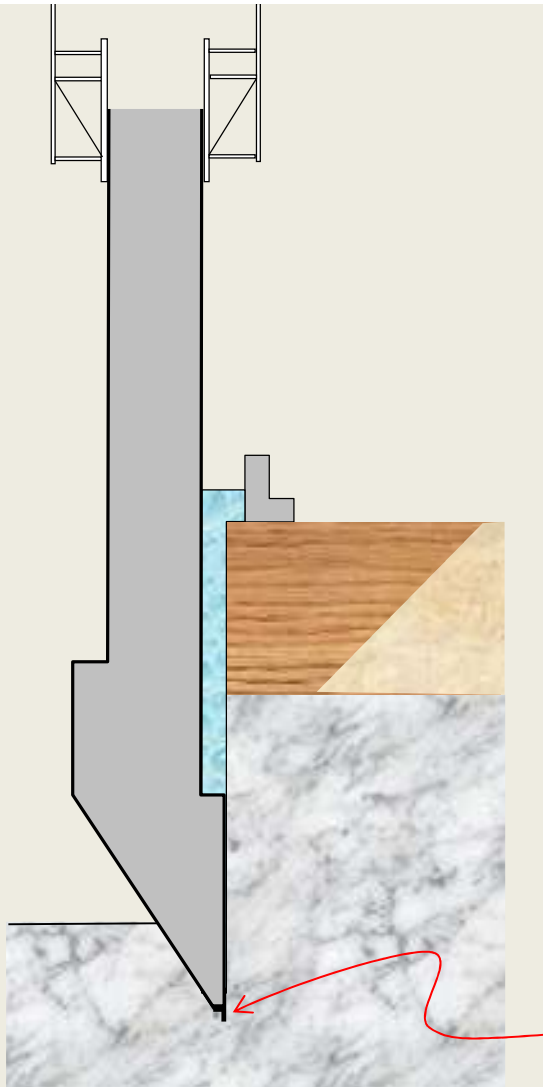
Aluvijalni nanos

Zbijena glina

Laporovita glina

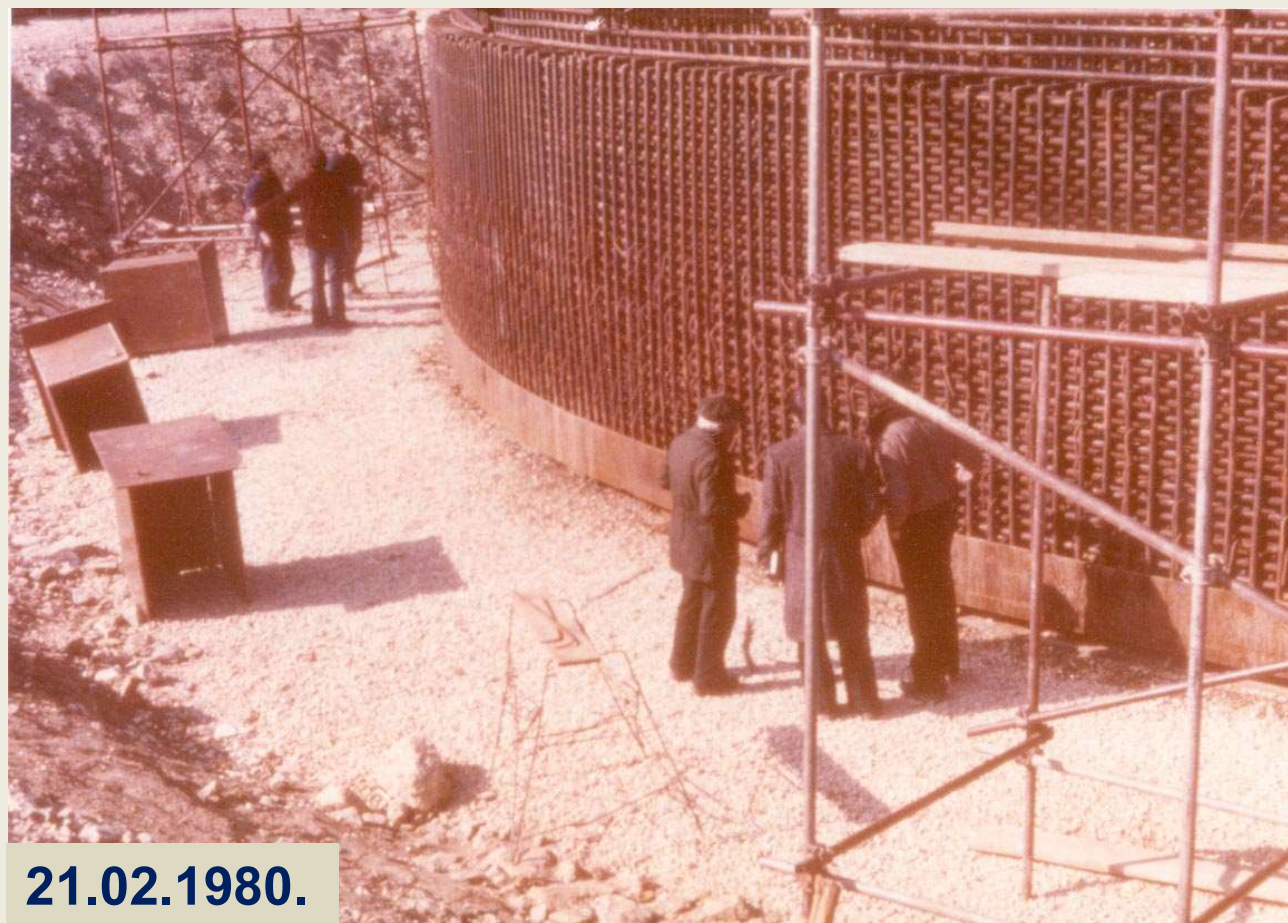
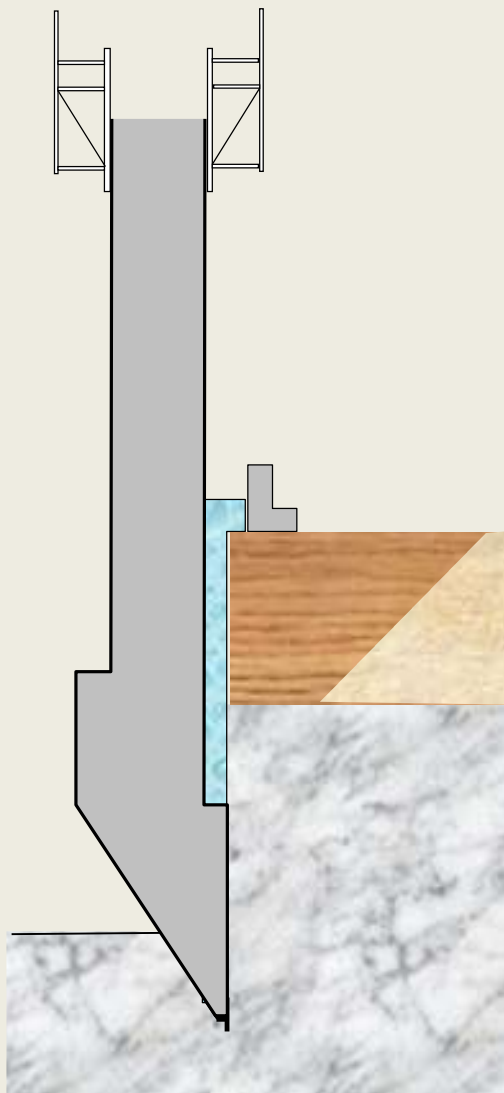
Bager Poclairn 160





Armatura noža bunara



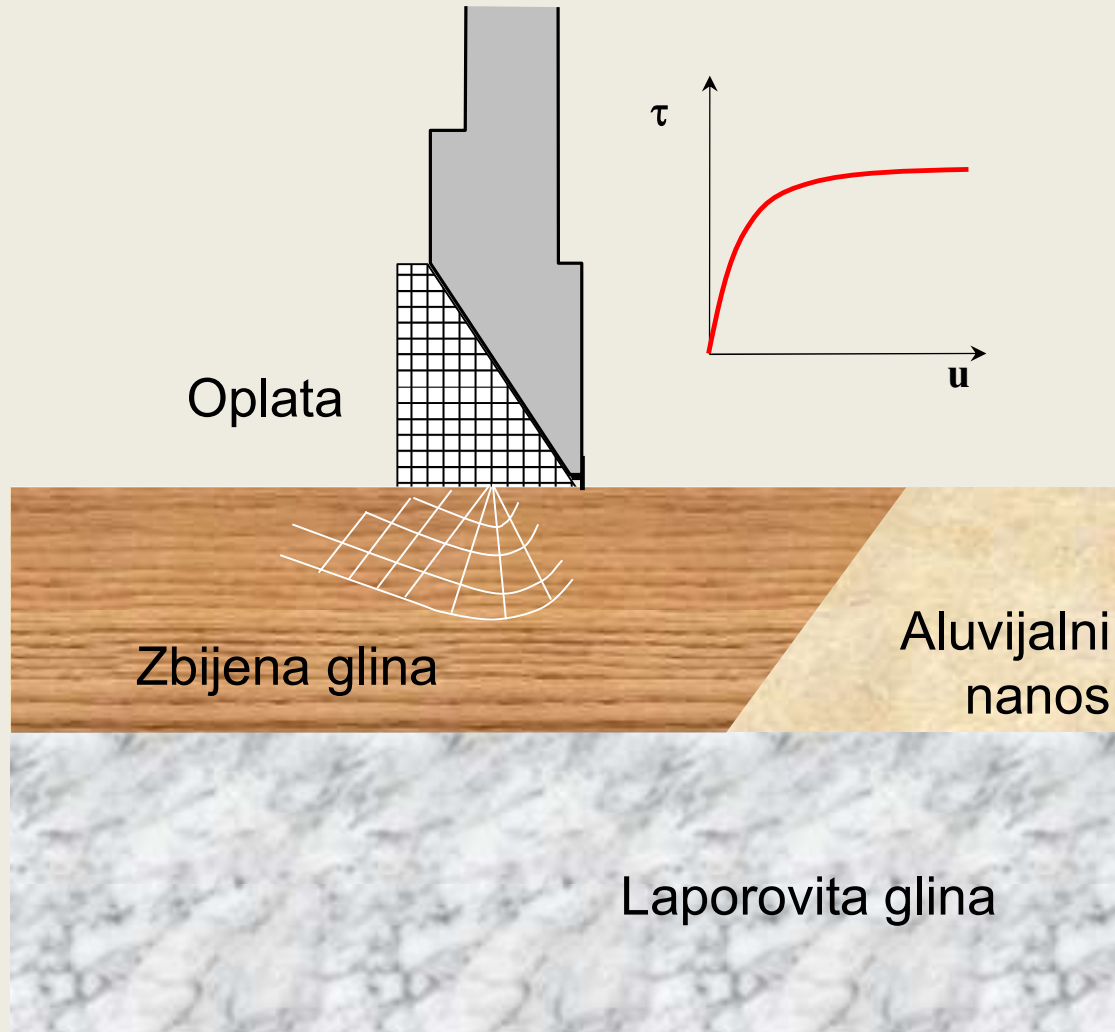


Profesor Nonveiller na gradilištu

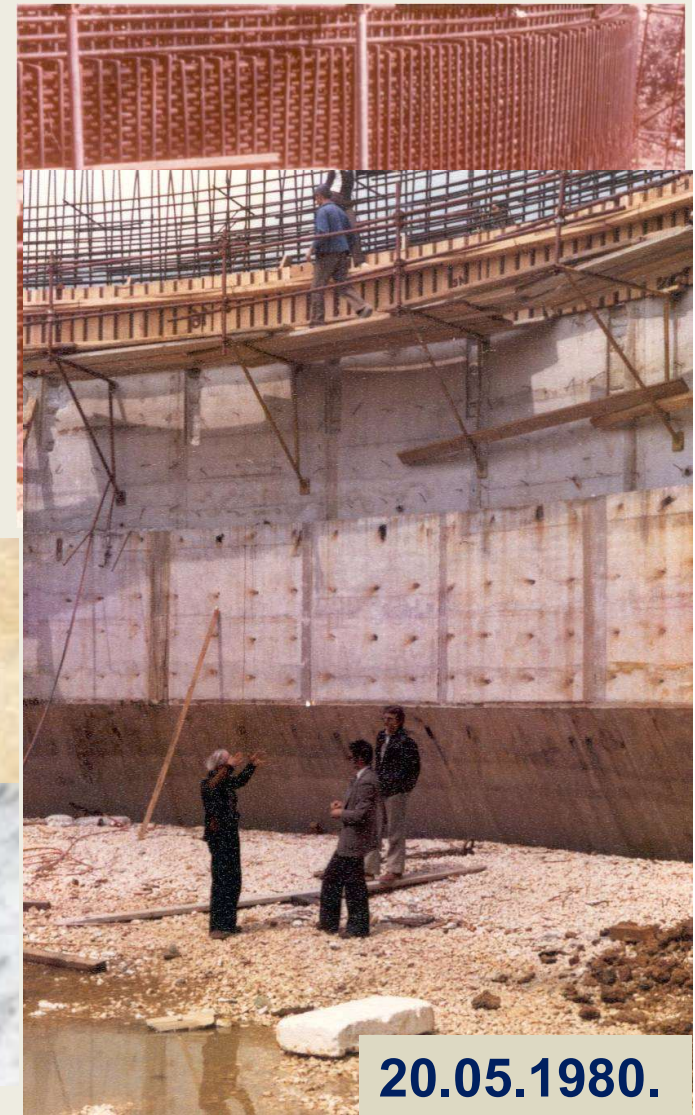
16



Spuštanje bunara u zbijenoj glini

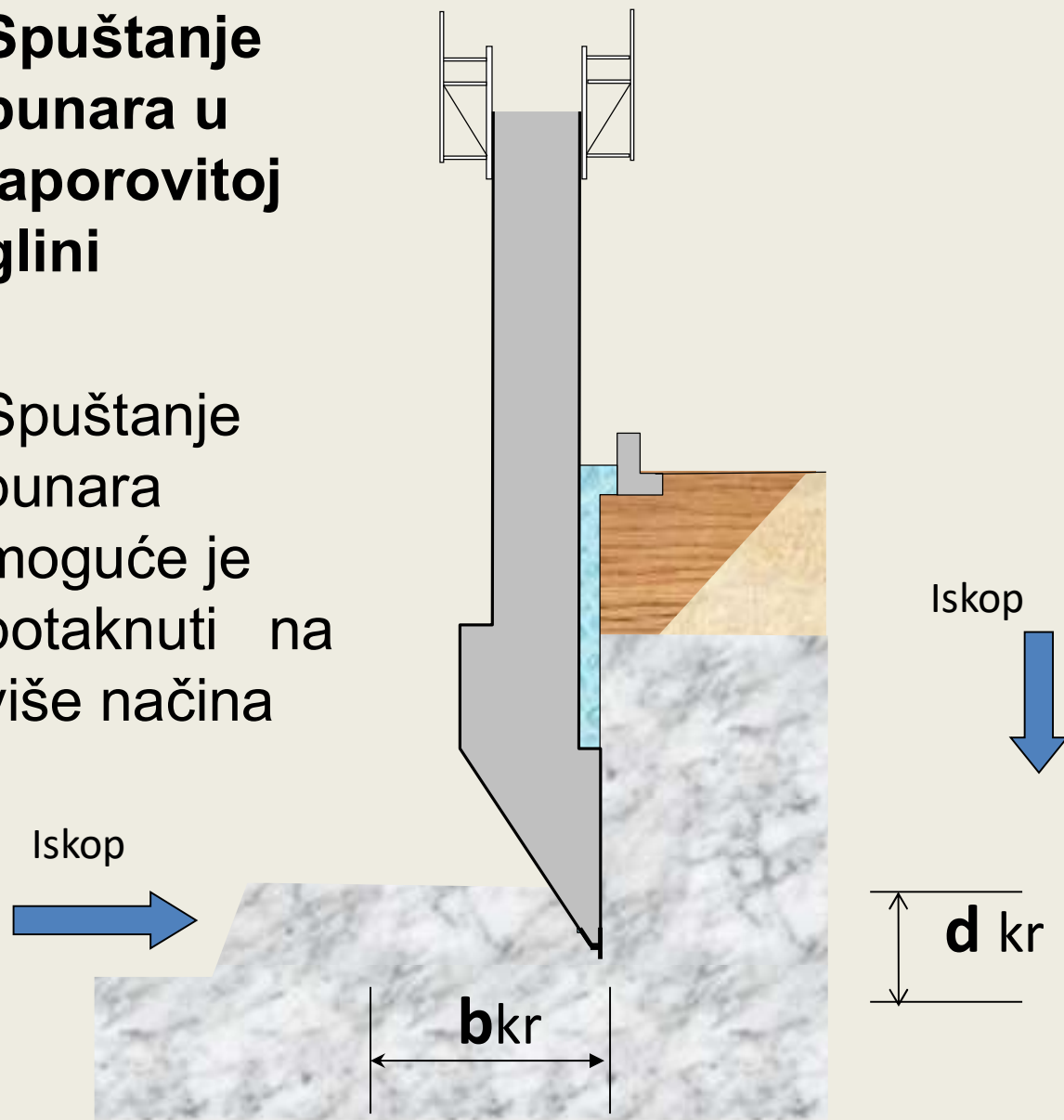


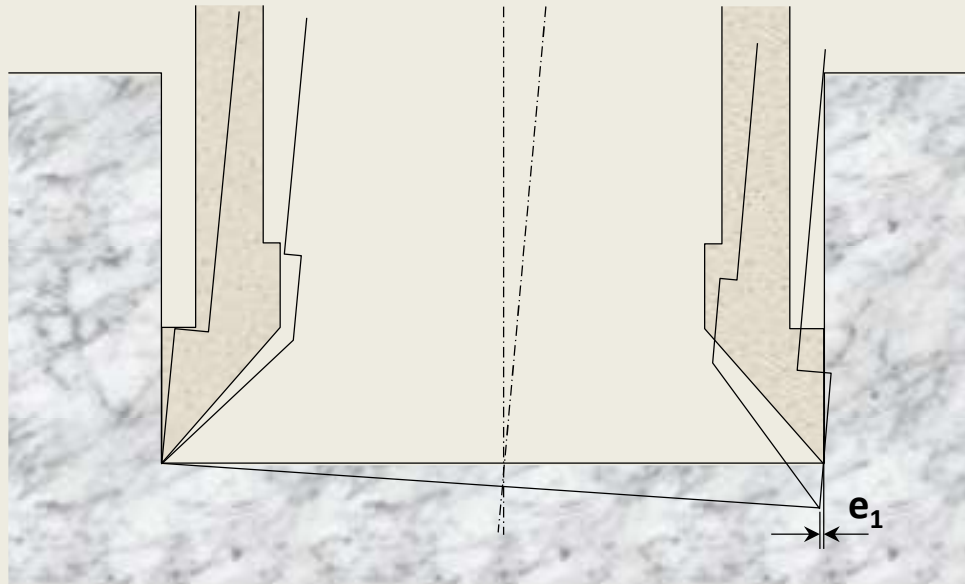
Meyerhofo rješenje



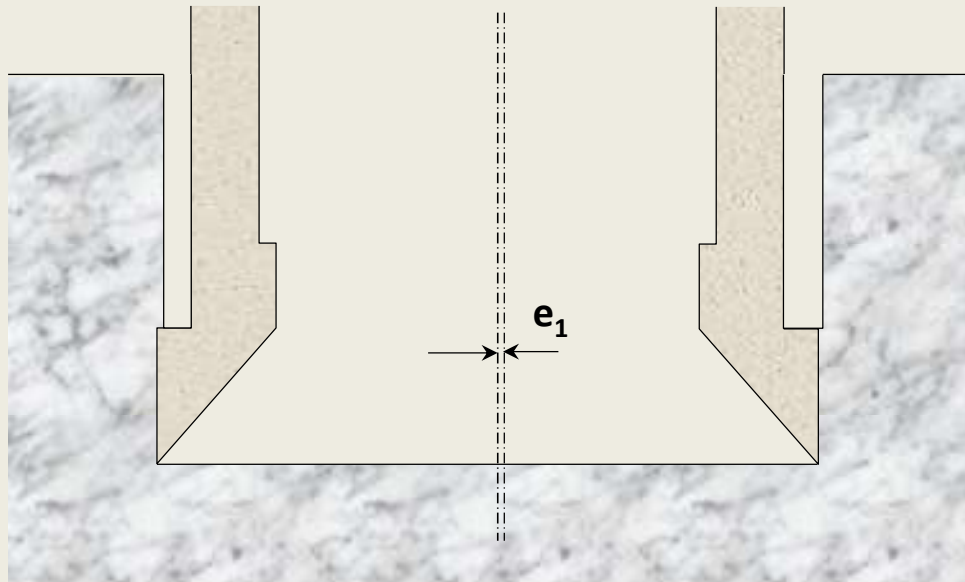
Spuštanje bunara u laporovitoj glini

Spuštanje bunara moguće je potaknuti na više načina





**Rizik vodoravnog
pomaka osi
bunara.**



Više uzastopnih
naginjanja na jednu
stranu prouzročit će
vodoravni pomak
osi bunara.



18.09.1980.

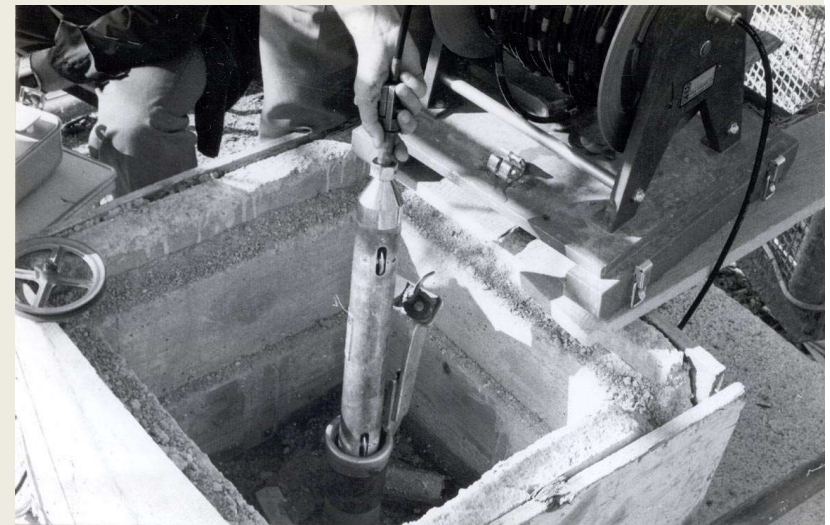
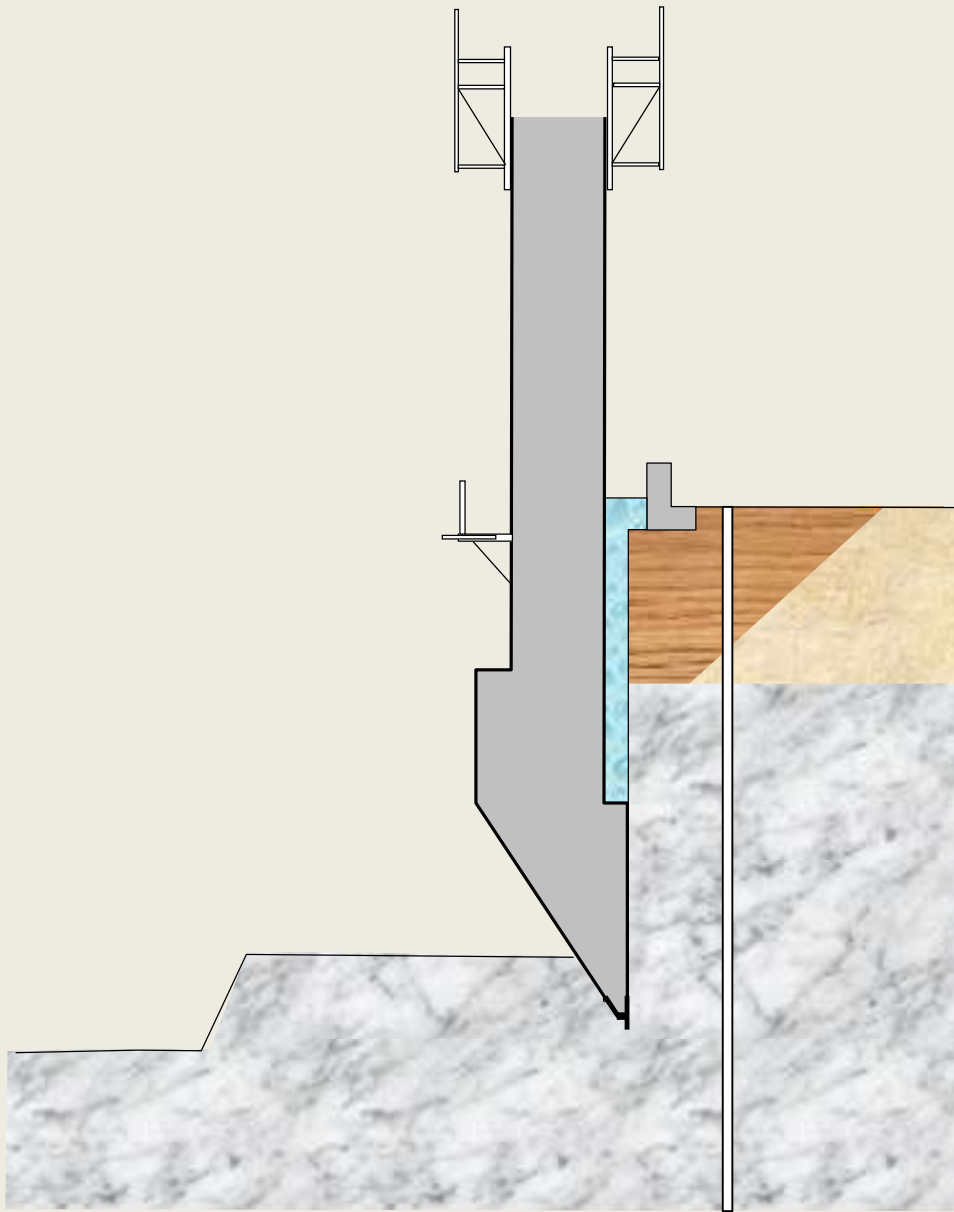
Nekada je iskop
jednog dijela
bunara bio izrazito
nesimetričan kako
bi se izazvalo
naginjanje bunara
na željenu stranu

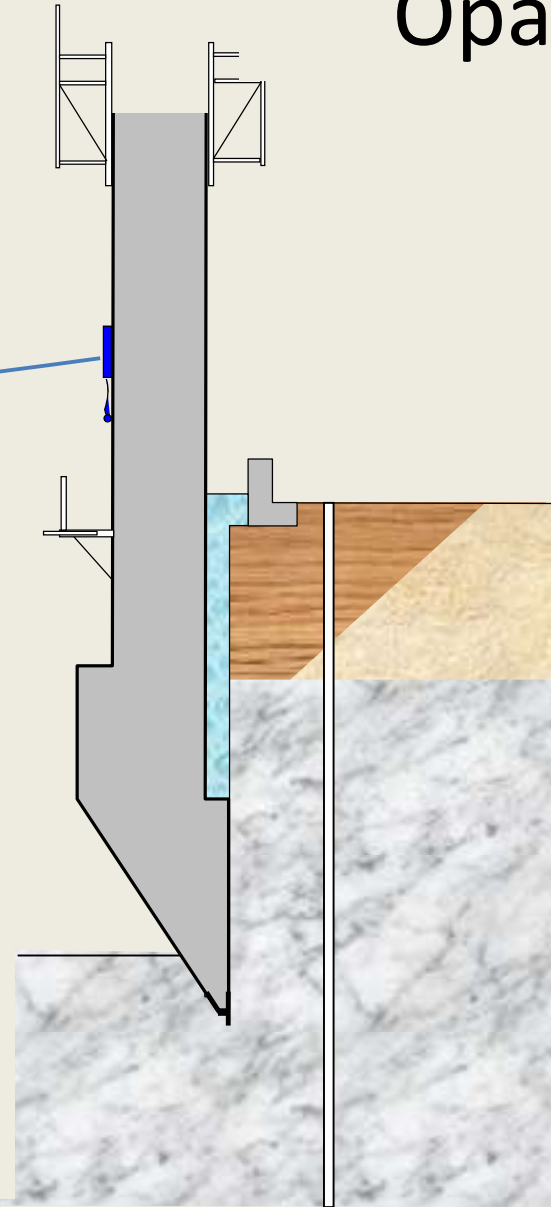
Opažanja



Opažanja tijekom gradnje

Tri inklinometra za kontrolu stabilnosti okolnog tla





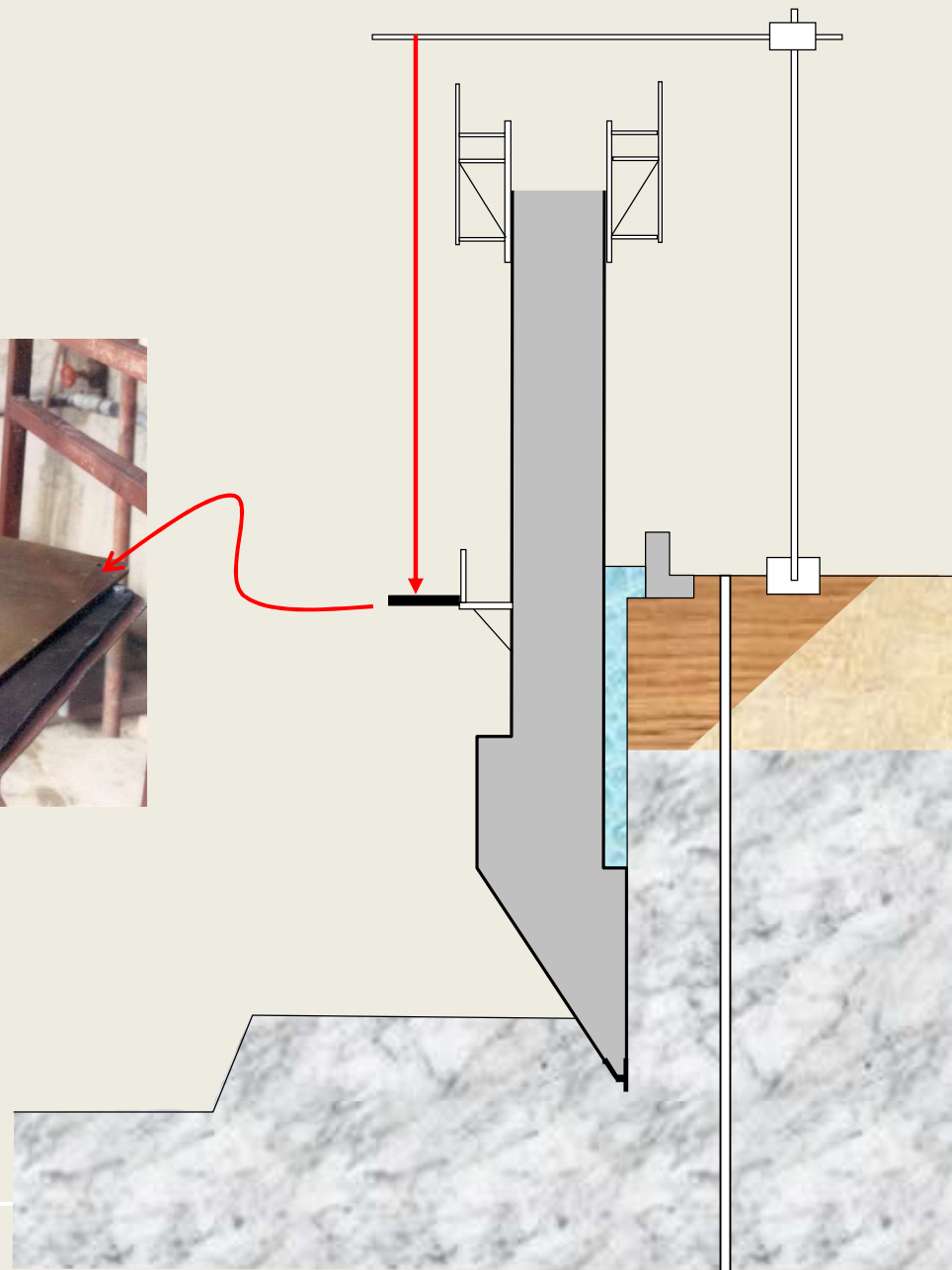
Vodena vaga za praćenje naginjanja bunara

(8 staklenih cijevi povezanih s plastičnom cijevi po unutarnjem plaštu bunara)

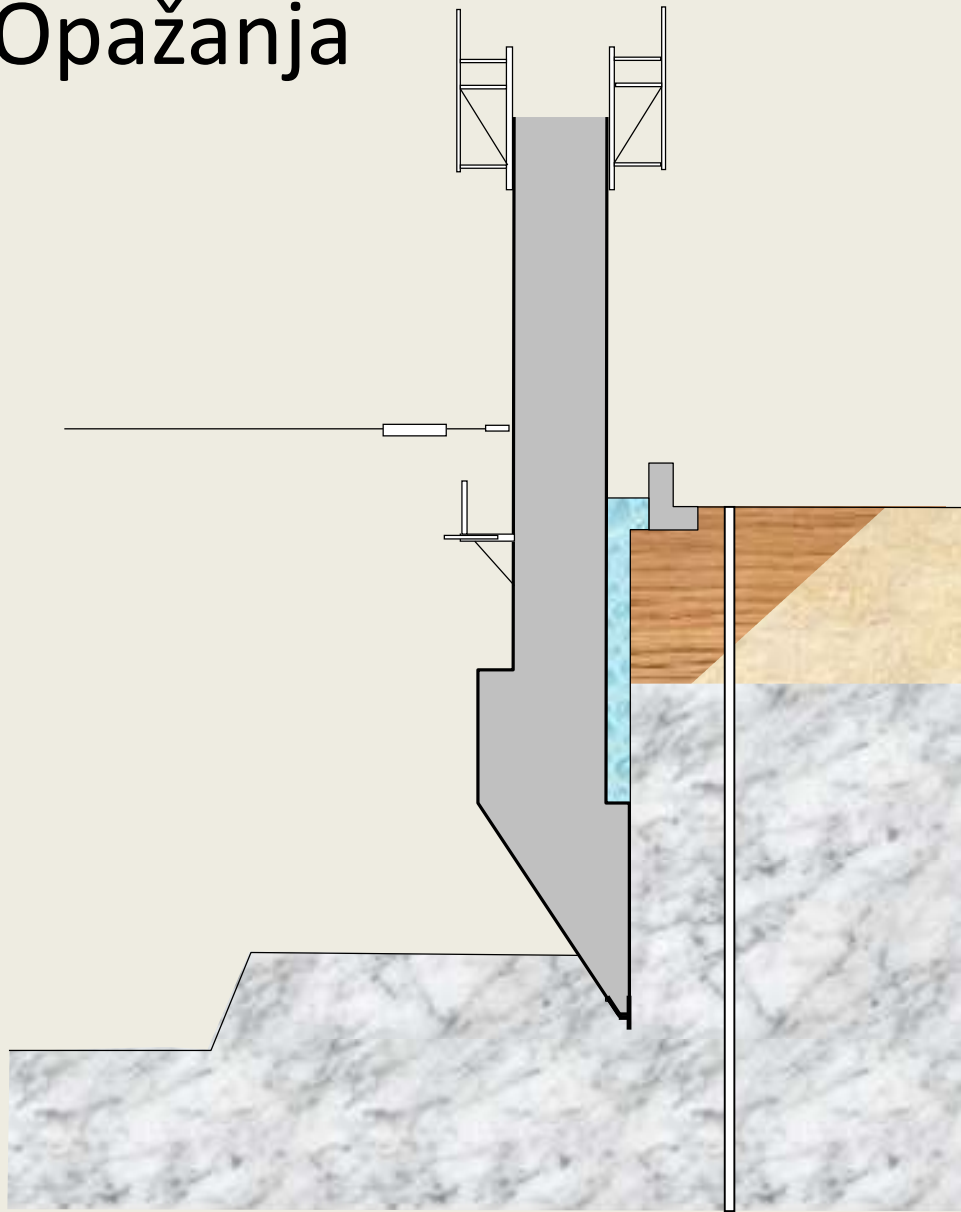
Opažanja



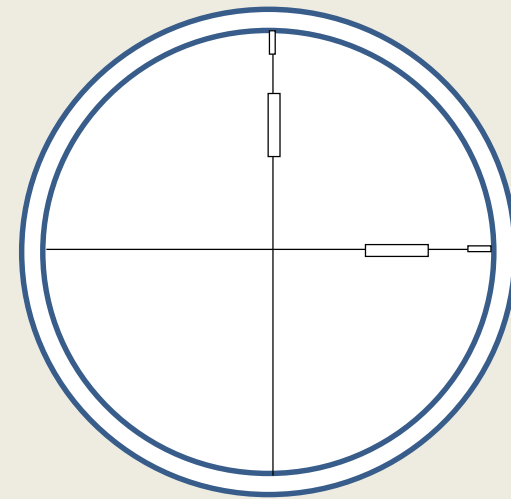
Visak



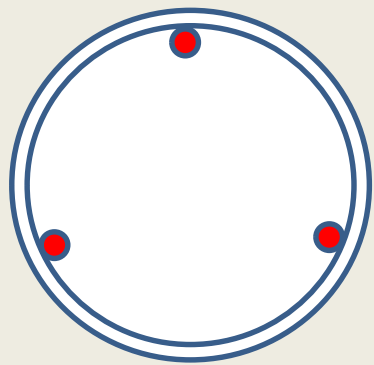
Opažanja



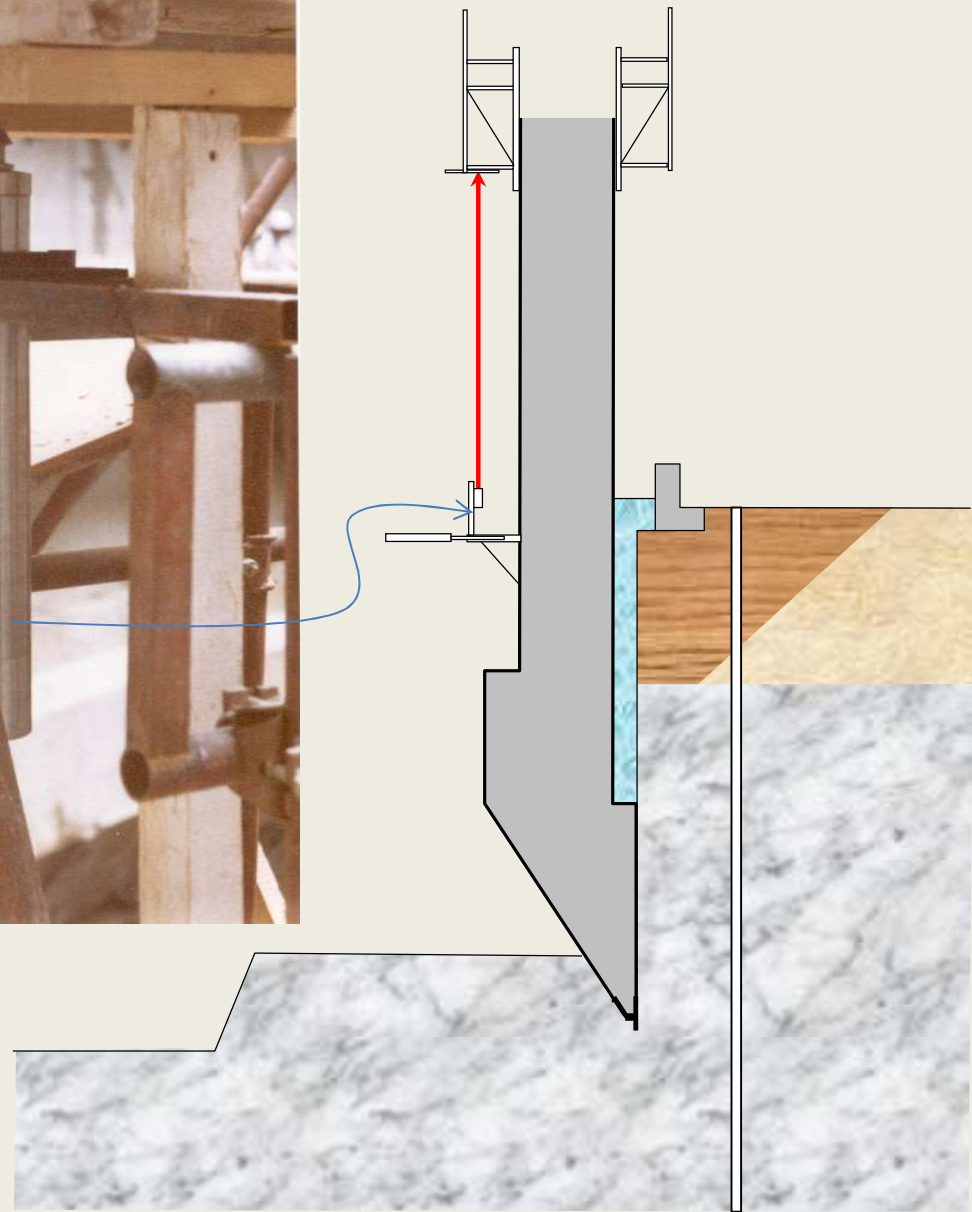
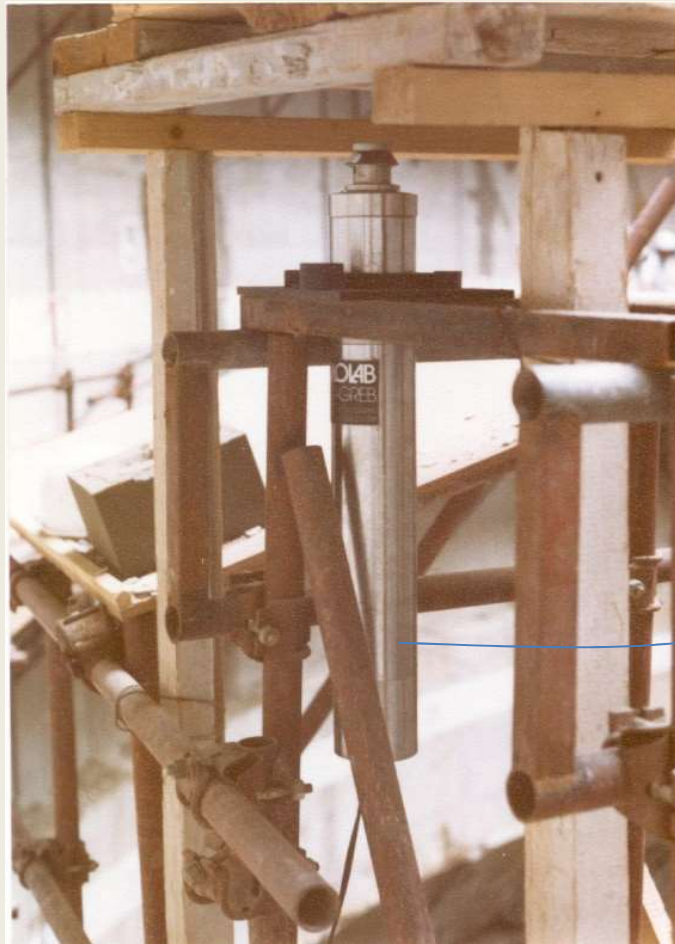
Mjerenje konvergencije



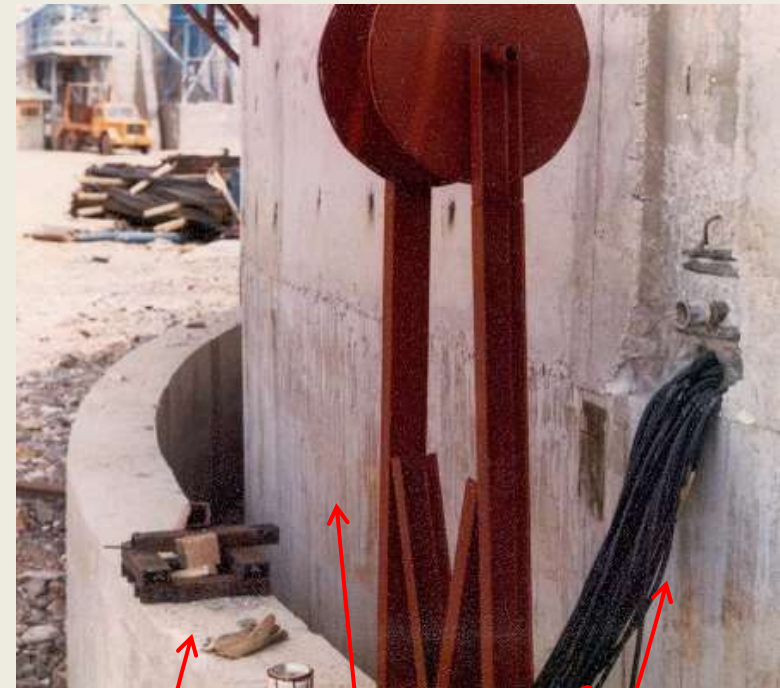
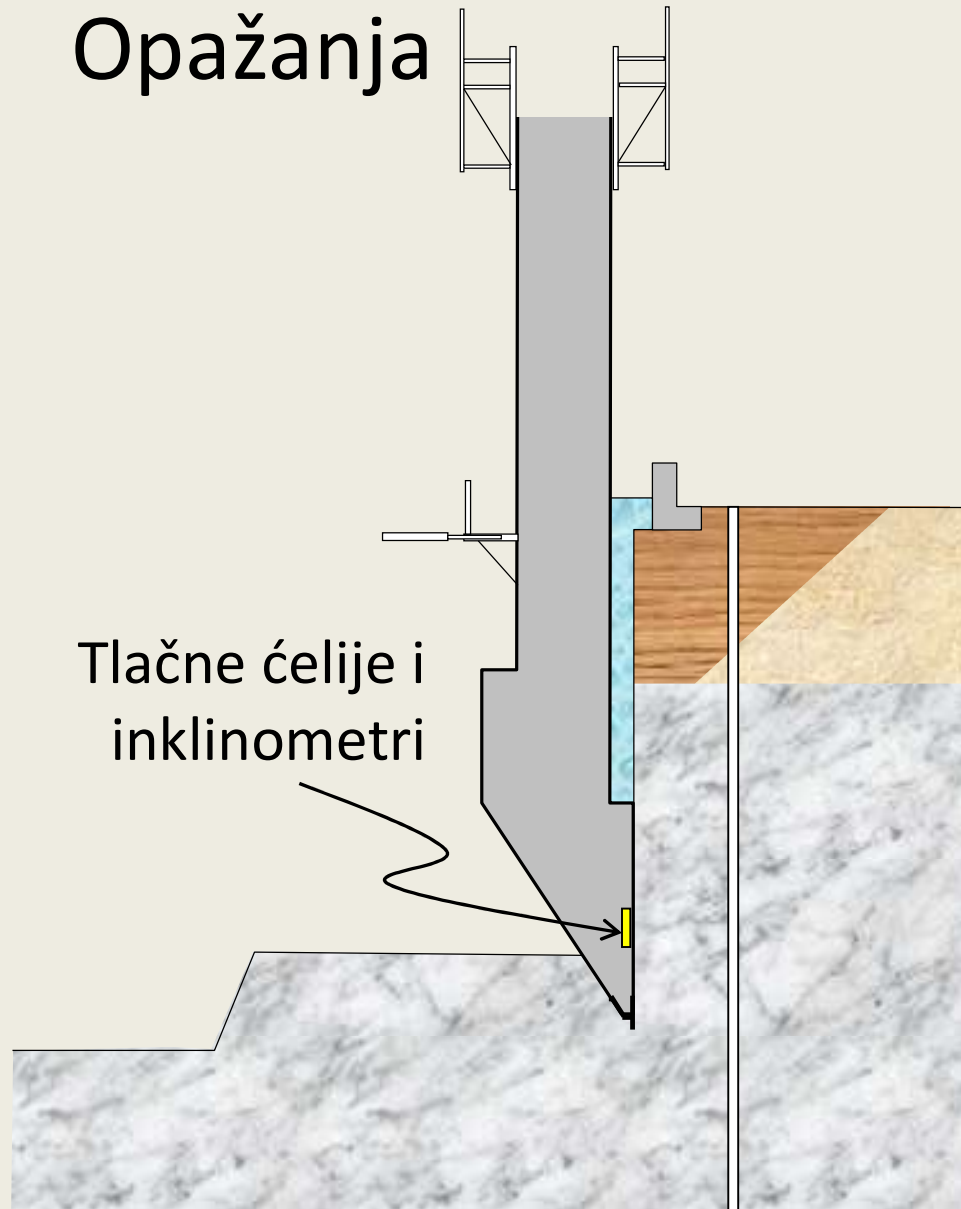
Opažanja



Tri lasera za kontrolu kružnog oblika klizne oplata



Opažanja



Uvodni zid

Bunar

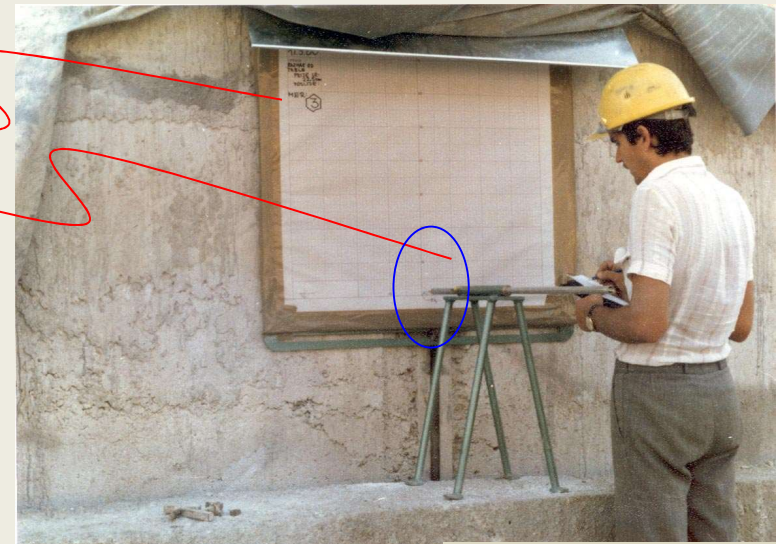
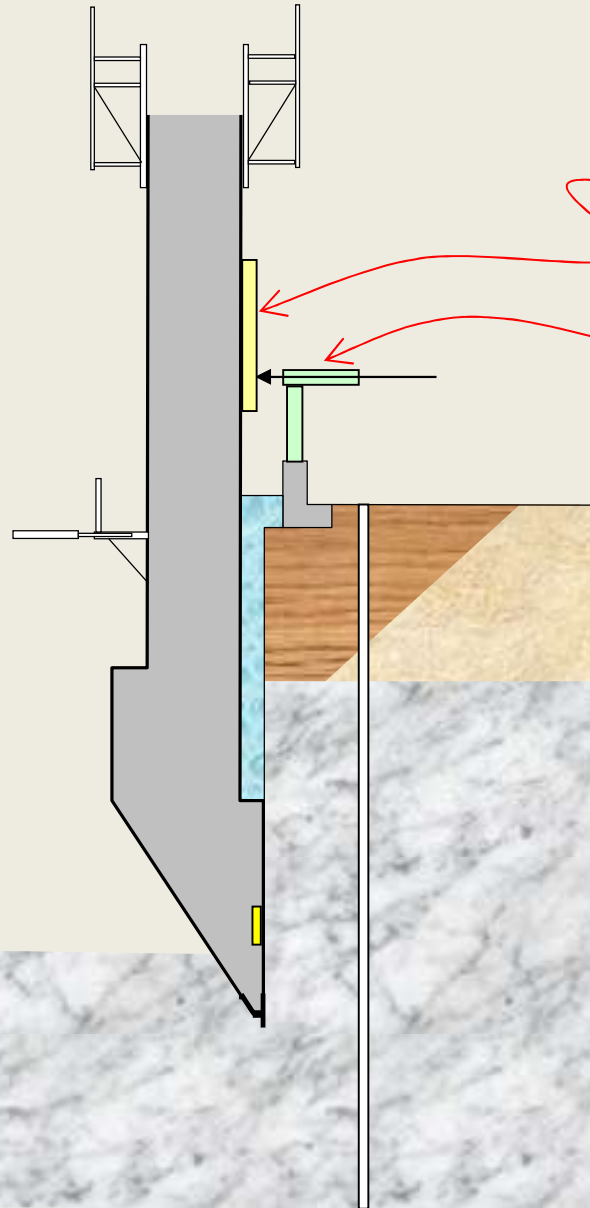
Kablovi
mjernih
uređaja u
nožu

Opažanja

Tabla učvršćena na vanjski plašt bunara.

Grafitna olovka pritisnuta na ploču gumenom trakom

Olovka u cijevi nosača pričvršćenog na ulvodni zid.



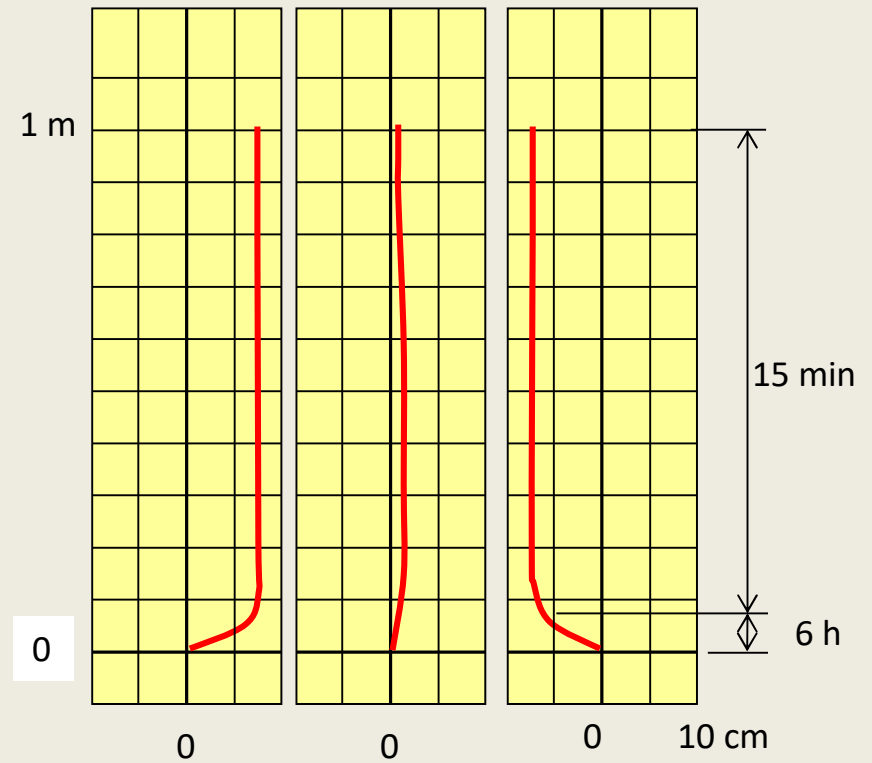
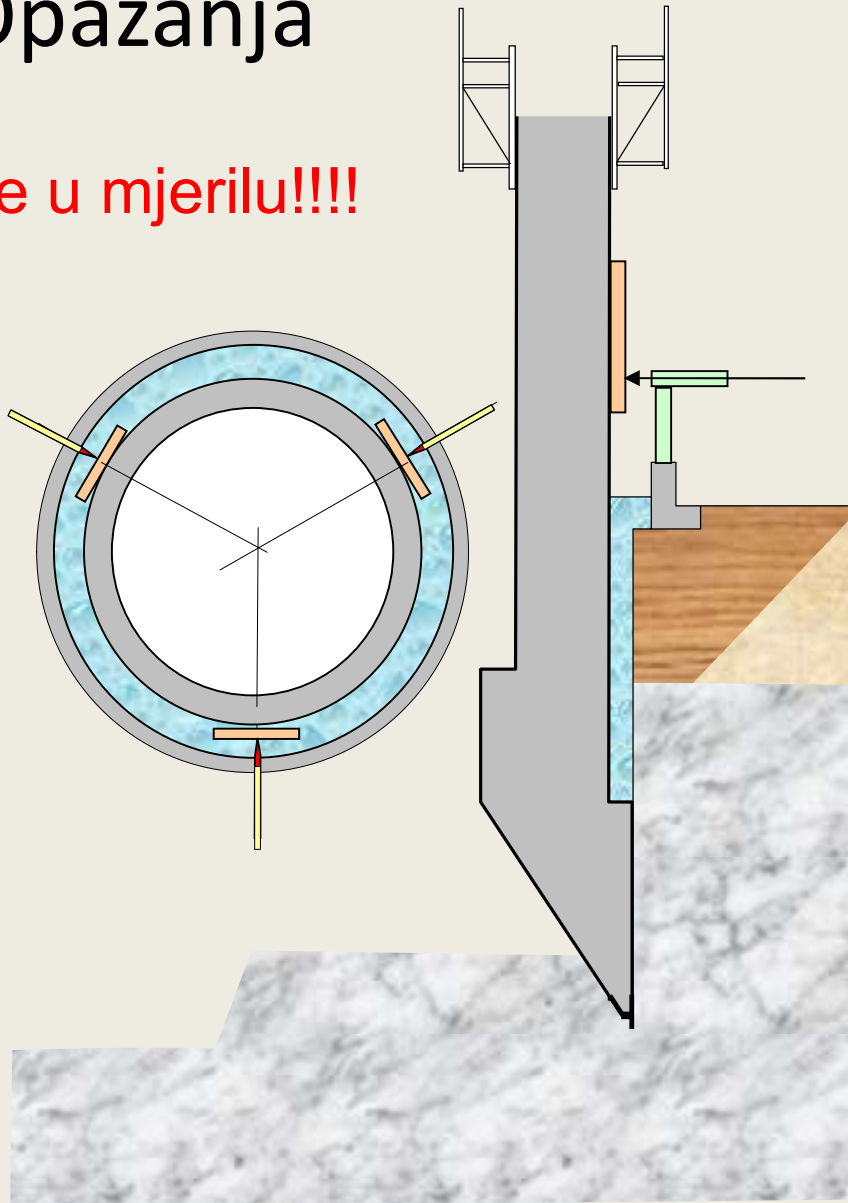
19.09.1980.

Olovka ostavlja trag na ploči tijekom spuštavanja



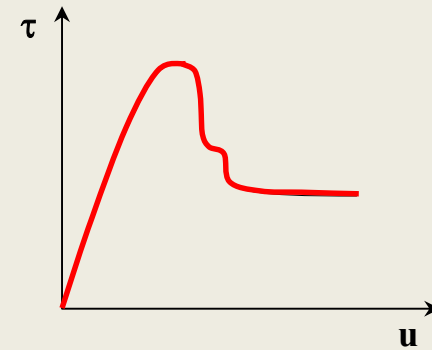
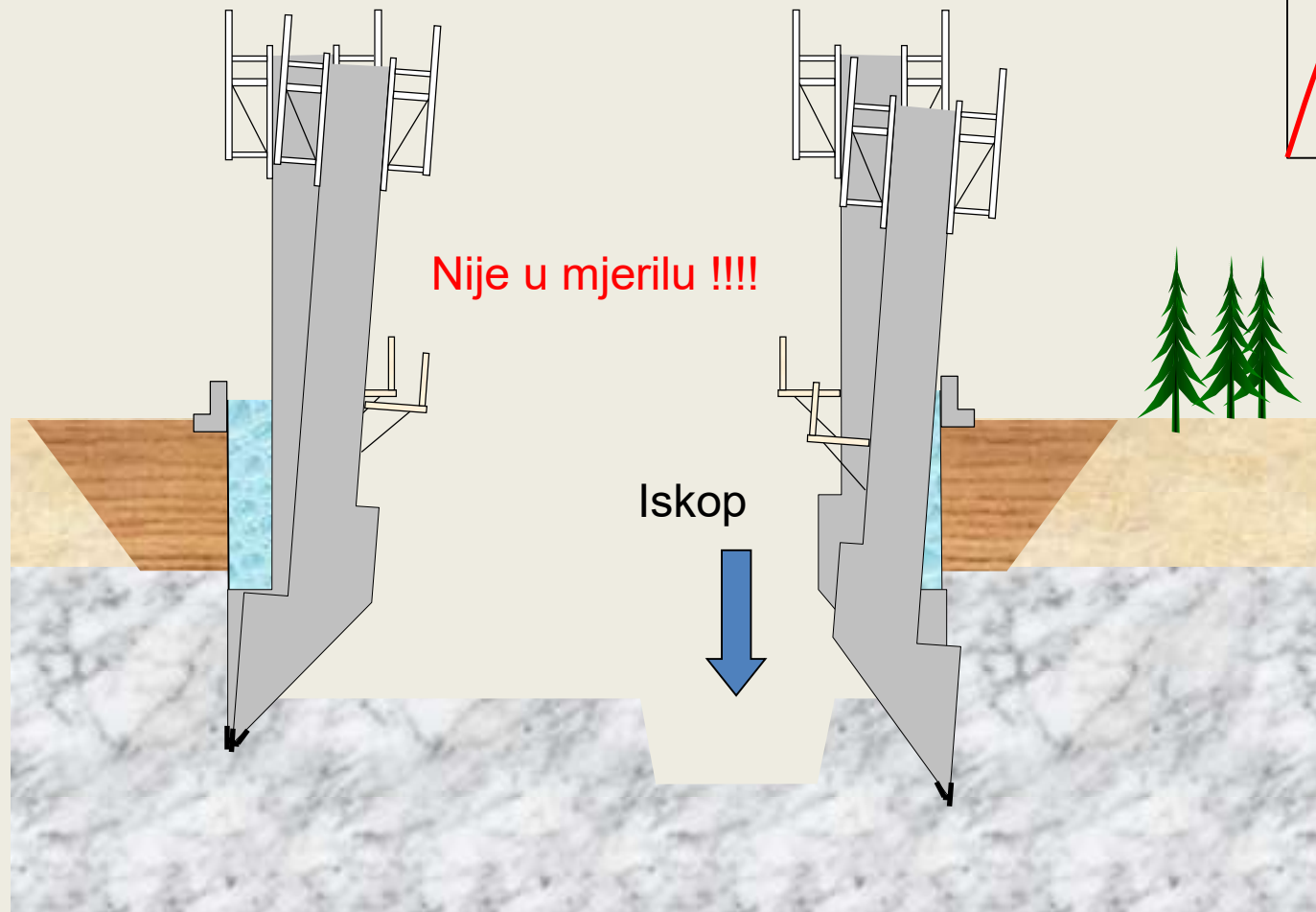
Opažanja

Nije u mjerilu!!!!



Tri olovke zapisat će trag pomaka bunara na tablama

Progresivni slom tla uz nož



Laporovita glina imala je izrazito svojstvo **omekšavanja**

Olovka i tabla, kao najjednostavnija oprema, pokazala se najkorisnijom.

Terzaghi, K., 1937, **Mein Lebensweg und meine ziele:**

Uspjeh istraživanja ne ovisi o cjelovitosti opreme nego o temeljnom konceptu.



Problemi pri spuštanja bunara



Prodor isplake u bunar

Bentonitna isplaka je nekoliko puta procurila u iskop kroz pukotine koje su bile posljedica sloma tla oko noža bunara.

Brzim iskopom u zoni prodora isplake potaknuto je spuštanje bunara te je na taj način prekinut dotok isplake.



Prodor isplake u bunar

Slijeganje

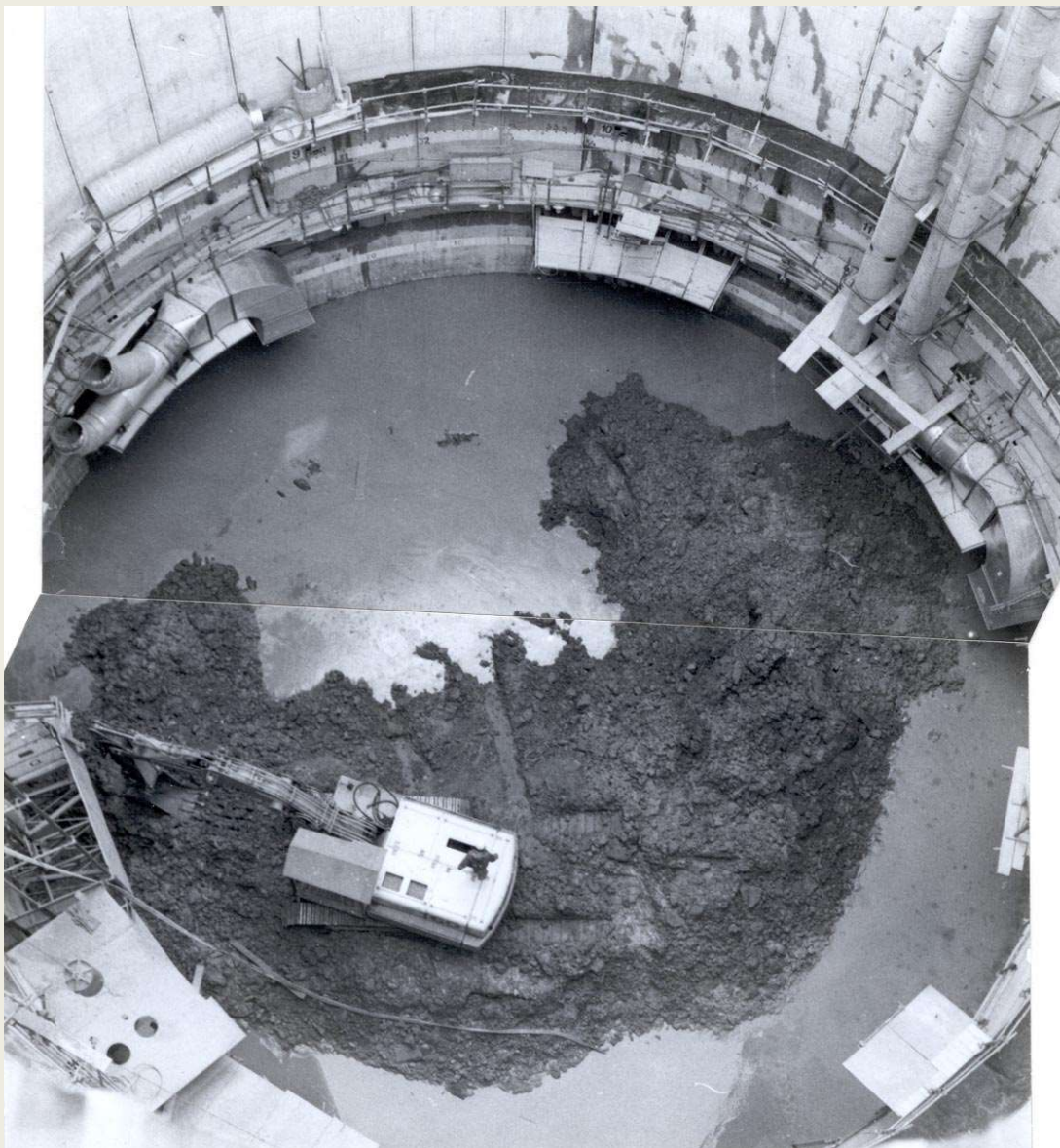


U jednom slučaju to nije bilo moguće.

Gubitak isplake bio je veći od mogućnosti dodavanja nove u zazor.

Gubitak isplake u zazoru prouzročio je slom tla oko bunara.



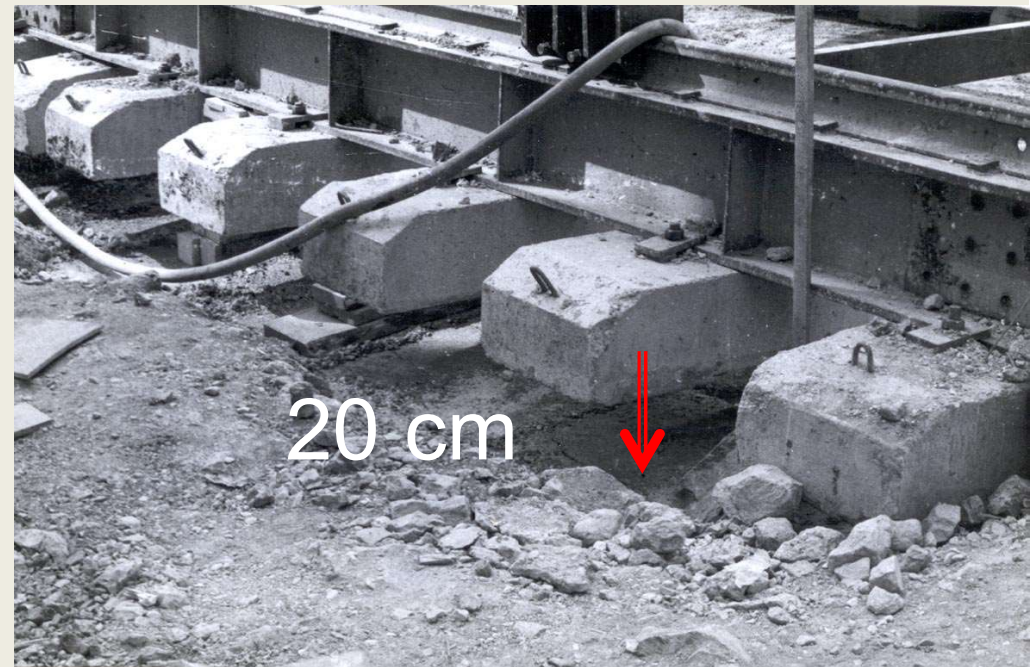


Prodor isplake u bunar

26.09.1980.

Prodor isplake u bunar

Sljeganje terena kao posljedica sloma tla oko bunara



02.10.1980.

Oštećenja noža bunara

Pri kraju spuštanja naprezanja u nožu bunara prouzročila su njegova oštećenja.

Ova oštećenja nisu zabrinula projektante i bunar je uspješno spušten na konačnu dubinu krajem 1980.

02.10.1980.



Profesor Čalogović i inženjer Galić

Količine

Armirani beton	8 500 m ³
Iskop	40 000 m ³
Bentonitna isplaka	1 050 m ³
Vrijeme građenja:	5 mjeseci

Bila je ovo najdublja građevina na svijetu građena bunarskim načinom



Umjsto zaključka



Veliki inženjerski uspjeh ostvaren je zahvaljujući:

1. Opsežnom i pažljivom ispitivanju neporemećenih uzoraka.
2. Detaljnoj analizi rezultata s ciljem definiranja parametara tla.
3. Numeričkim analizama koje su uključile ponašanje tla.
4. Inženjerskom osjećaju i iskustvu sudionika pri projektiranju i gradnji.



Reference

1. Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb,), Zavod za geotehniku (1980. RHE Obrovac, Strojarnica I faza Klizni bunar-Glavni projekt-Knjiga III-Tehnološki projekti- Svezak III/2. RN 2212-1-14203/80.(u posjedu Hrvatskog geotehničkog društva).
2. Geoexpert, Zagreb i Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb (1979), RHE Obrovac, Okno strojarnice – Glavni projekt – Knjiga I, Zagreb, rujan 1979. 72 str.+21 prilog (u posjedu Hrvatskog geotehničkog društva).
3. Grubić, N., Kovačić, D., Nonveiller, E., Szavits-Nossan, A. (1981), Vrednovanje numeričkih analiza za građevnu jamu Obrovac, Saopštenja XV Savjetovanja Jugoslavenskog društva za mehaniku tla i fundiranje, Ohrid, Knjiga 1, 335-348.
4. Grubić, N., Szavits-Nossan, A., Kovačić, D. (1988), Numeričke analize pri projektiranju strojarnice RHE Obrovac. I Jugoslavenski simpozij o tunelima, Savez društava za tunele Jugoslavije i društvo za tunele Hrvatske, Briuni, 24-26.
5. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi” (1977), RHE Obrovac – Strojarnica, Završni elaborat kompleksnih istraživanja. Beograd, 96 str.+19 priloga. (u posjedu Hrvatskog geotehničkog društva).
6. Lisac, Z., Nonveiller, E., Szavits-Nossan, A., Vrkljan, I., Višić, I. (1980), Geotehničke osnove projektiranja i gradnje okna strojarnice reverzibilne hidroelektrane, 5. Simpozij Jugoslavenskog društva za mehaniku stijena i podzemne radove, Split, Knjiga 2, 58-63.
7. Nonveiller, E., Szavits-Nossan, A., Lisac, Z., Vrkljan, I., Višić, I., Mavar, R. (1982), Grundungsschaht 60m tief als Brunnen abgesent, Bauingenieur 57, 351-356.
8. Vrkljan, I. Nonveiller, E., Szavits-Nossan, A., Lisac, Z., Višić, I. (1983), Controlled Sinking of an Open Caisson in Weak Rock, 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Australia, D: 337-342.
9. Znidarčić, D., Szavits-Nossan, A., Mulabdić, M. (1982), Mehanička interakcija bentonitne isplake i slabo propusnog tla, XV Savjetovanje jugoslavenskog društva za mehaniku tla i fundiranje, Ohrid, Knjiga II, 141-146.

