

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Diplomski sveučilišni studij

Smjer: **GEOTEHNIKA**

Nasute i potporne građevine 13

Prof. dr. sc. Tomislav Ivšić
Građevinski fakultet Zagreb

Proračuni ukopanih stijena

PROJEKTNI ZAHTJEVI

- Stabilnost zida i sustava pridržanja / sidrenja
- Stabilnost dna iskopa (mehanički i hidraulički slom)
- Ukupna stabilnost pokosa s potpornom konstrukcijom
- Rezne sile u zidu i poduporama (nosivost, radne sile)
- Pomaci konstrukcije i tla → susjedne građevine i instalacije
- Dodatne sile u susjednim građevinama ili instalacijama zbog izgradnje

Proračuni ukopanih stijena

PRORAČUNSKI POSTUPCI → **ciljano predviđanje ispunjenja projektnih zahtjeva**

TRADICIONALNO – pojednostavljeni postupci, empirijski pristup

RAZVOJ RAČUNALNE TEHNIKE → znatan napredak proračunskih i projektnih postupaka, jednostavnije uključivanje novih spoznaja

SADAŠNJE STANJE (prakse, propisa, znanja) → mnogo različitih metoda

Kako usporediti i kako vrednovati ?

OSNOVNI NAGLASAK : *Potporne konstrukcije predstavljaju primjer međudjelovanja (interakcije) tla i konstrukcije* → bitno različita obilježja – materijali, dimenzije, ponašanje

- Kod potpornih zidova – relativno jednostavno međudjelovanje (granična ravnoteža, mali pomaci)
- Kod ukopanih stijena s pridržanjima:
 - bitan je mehanizam prijenosa sila (tlo ispred zida, podupore)
 - fleksibilnost zidova varira u velikom rasponu → utjecaj na raspodjelu zemljanih pritisaka, momenata, pomaka i sila u pod.
 - složenost međudjelovanja raste s brojem podupora i njihovom popustljivošću
 - tip veze podupore i stijene
 - način izgradnje (iskop ili zasipavanje)

Teorijski zahtjevi za opće rješenje

- **RAVNOTEŽA** $\Sigma F = 0, \Sigma M = 0$

- **KOMPATIBILNOST**

 - kontinuirana funkcija deformacija s derivacijama

 - slom, pukotine \rightarrow diskontinuiteti

- **MEHANIČKO PONAŠANJE** – konstitucijski odnosi (naprezanje – deformacija)

$\sigma_{ij} = [\mathbf{D}] \varepsilon_{ij}$ - u matrici \mathbf{D} sadržane su sve specifičnosti mehaničkog ponašanja: nelinearnost, ireverzibilnost, utjecaji povijesti opterećenja, porni pritisci

- **RUBNI UVJETI** (za sile i pomake)

 - ravninsko stanje naprezanja (poseban slučaj općeg stanja)

Postupci proračuna ukopanih stijena

1. ZATVORENA ANALITIČKA RJEŠENJA

- teorijski zamisliva rješenja koja zadovoljavaju opće zahtjeve
- danas: samo za jednostavnije rubne uvjete ili probleme uz pretpostavku linearno elastičnog tla (beskorisno za opis sloma)
- upotrebljiva u problemima temeljenja u prosječnim ili tvrdim tlima i stijenama pri manjim opterećenjima i deformacijama (npr. Boussinesquovo rješenje i slično)

2. POJEDNOSTAVLJENI POSTUPCI

2.1 Granična ravnoteža

- pretpostavljena klizna ploha s kriterijem sloma
- ravnoteža u krutom bloku → Coulombova metoda

2.2 Rješenja s poljem naprezanja

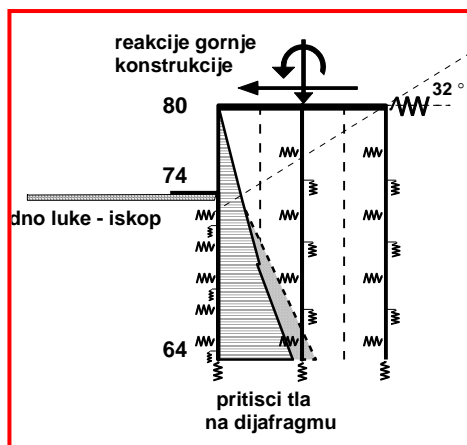
- pretpostavka: tlo je svugdje u točki sloma (kriterij sloma + jedn.ravnoteže)
- primjeri: Rankine (AKT-PAS), rješenja Sokolowskog...
- točna rješenja za različite rubne uvjete: rješavanje diferencijalnih jednadžbi hiperboličkog tipa npr. metodom karakteristika

2.3 Limitna (granična) analiza

- teoremi gornje (kinematika) i donje (statika) granice
- ne zadovoljavaju sve opće uvjete (dominira problem stabilnosti, nema pomaka, ne razlikuju podupore, faze izgradnje)
- Korekcije s mjerenjima (empirijske) → bolja predvidivost za tipične sluč.
- Jednostavni za korištenje (prve ocjene, grube analize)

3. NUMERIČKE ANALIZE

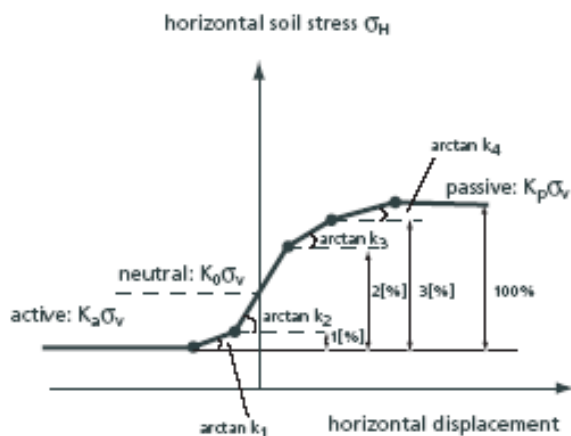
3.1 Greda na oprugama



- Problem reduciran na gredu na popustljivim osloncima (izvorno: LIN EL) koji zamjenjuju tlo ili dio tla (pasivni) + posebne opruge za podupore ili sidra
- Kontrola sile u oprugama na slom (aktivni i pasivni)

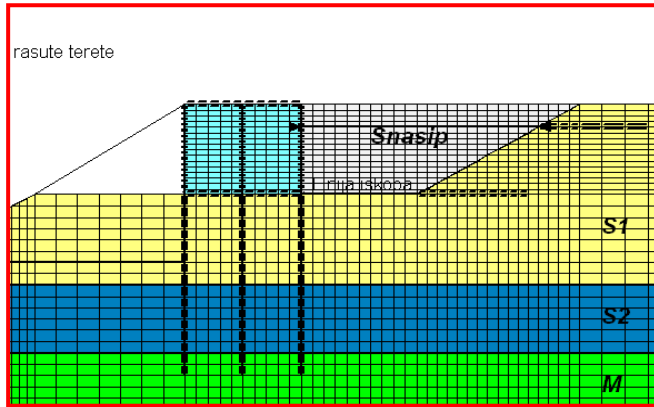
Poboljšanja – greda na nelinearnim oprugama

- Krivulje pritisak-pomak se računaju za svaku dubinu (kontrola pasivnog i aktivnog tlaka)
- Nagib p / y predstavlja generaliziranu Winklerovu konstantu (promjenjivu s dubinom i pomakom)
- krivulje $p - y$ nisu konstitucijske jednadžbe nego numerička aproksimacija veze pritiska i pomaka konstrukcije



3.2 “Puna” numerička analiza (**numerička simulacija**)

- postupci koji pokušavaju zadovoljiti sve teorijske zahtjeve, uključiti realne konstitucijske modele i rubne uvjete s terena



Sekvencijalna analiza- proračuni po fazama (konačno stanje jedne faze je početno stanje za drugu) → bolja simulacija nelinearnih procesa i parametara ovisnih o povijesti opt.

konačne diference ili konačni elementi
(numerički aparat)

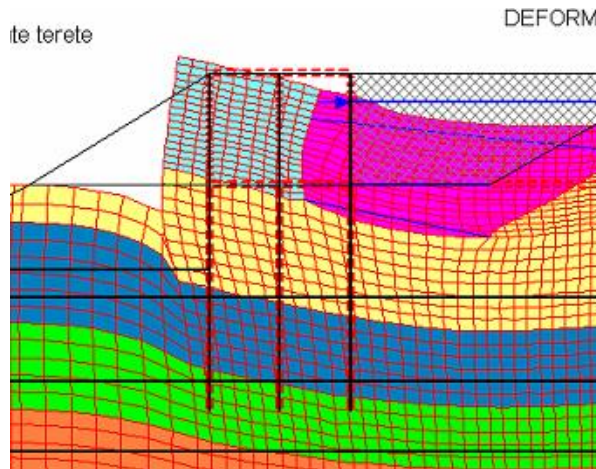
- točnost predviđanja – konst. modeli, parametri

-traže specijalistička znanja (inž., mehtla, num.)

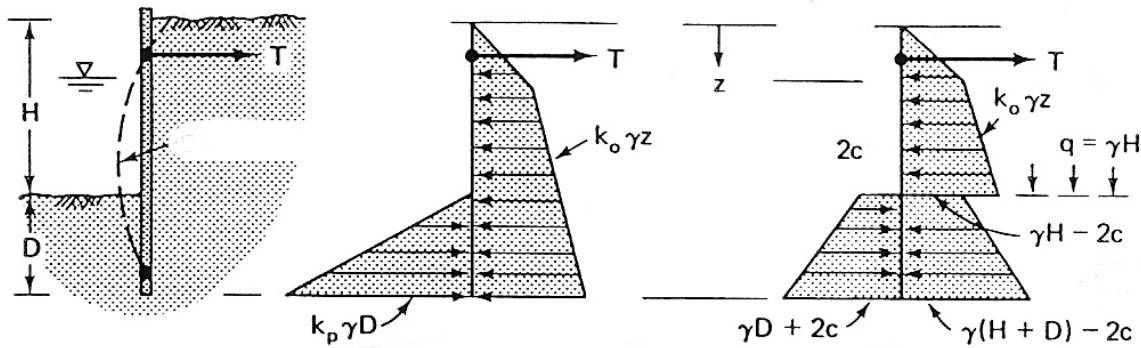
-kontrola i prikazivanje rezultata,

-parametarske analize (studija) – izbor mjerodavnih par.

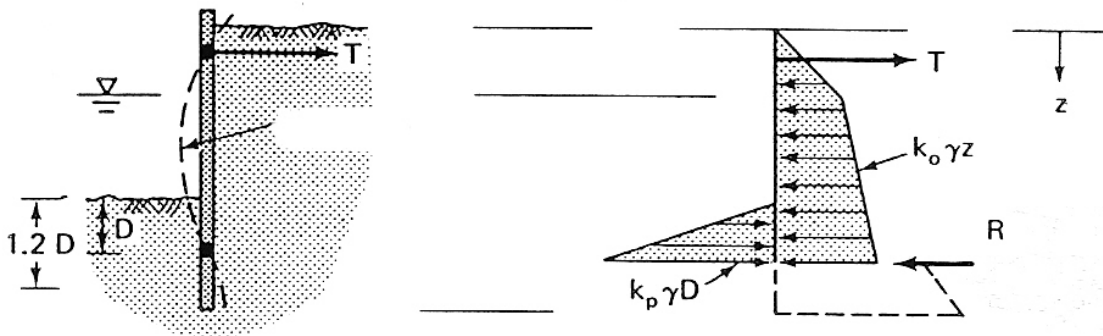
- Kad je dosta točno ? (za proj. ili za istraž.?)



Pojednostavljeni postupci

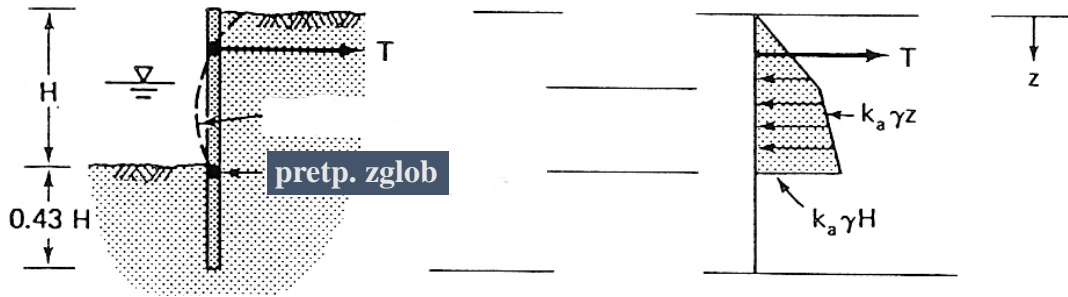


a) stijena slobodna na dnu (free earth support)

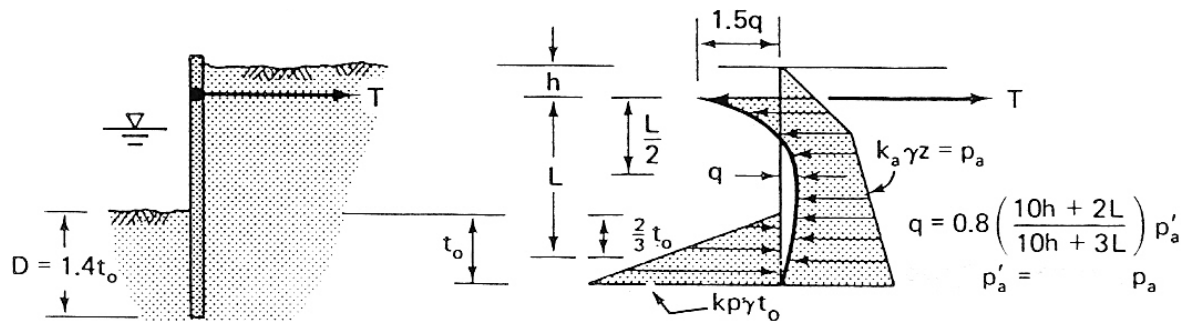


b) stijena uklještena na dnu (fixed earth support)

Pojednostavljeni postupci

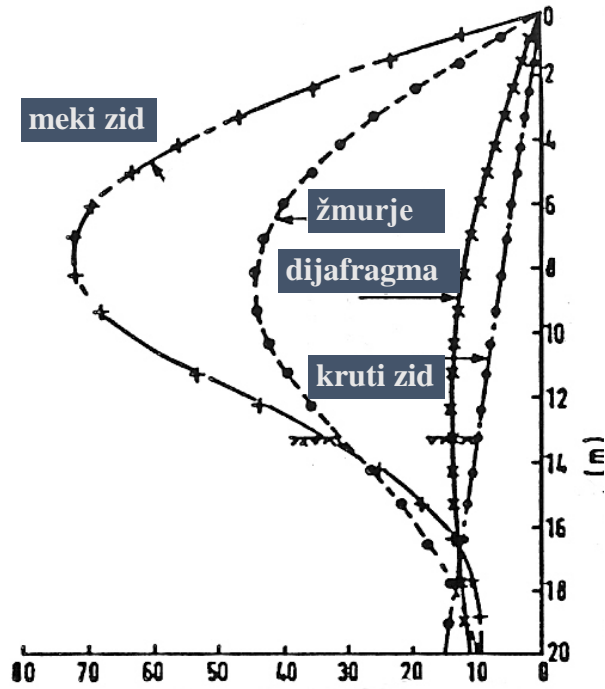


c) postupak Tchebotarioffa

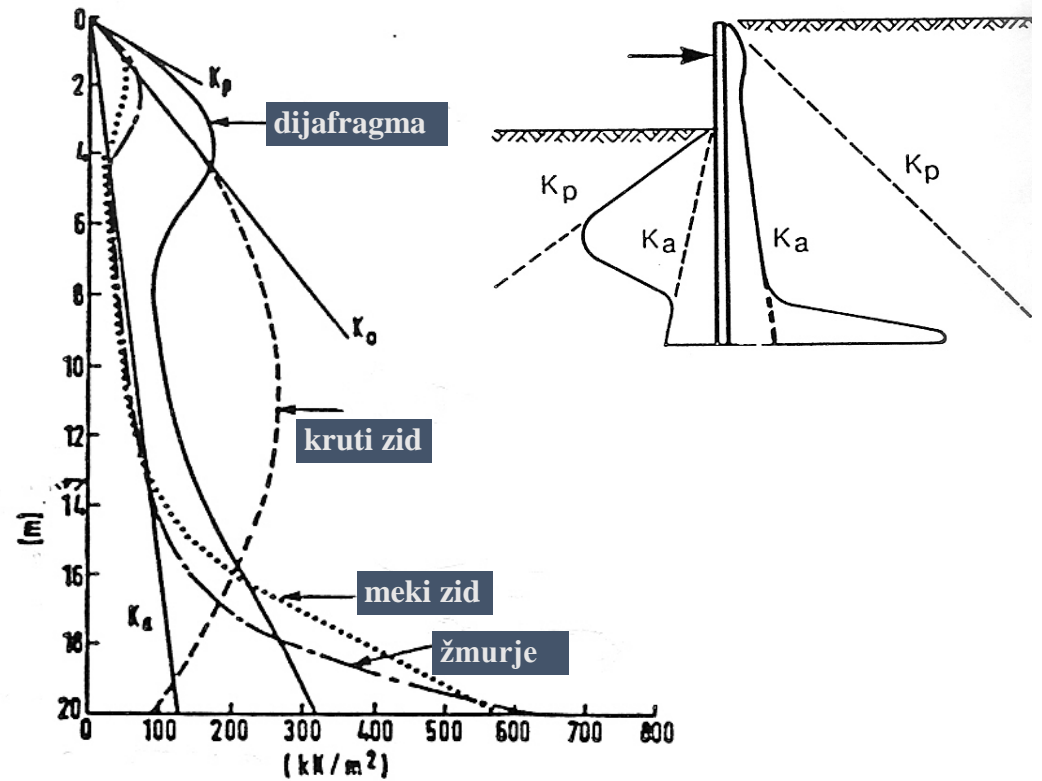


d) postupak prema
Danskim pravilima

Utjecaj krutosti zida



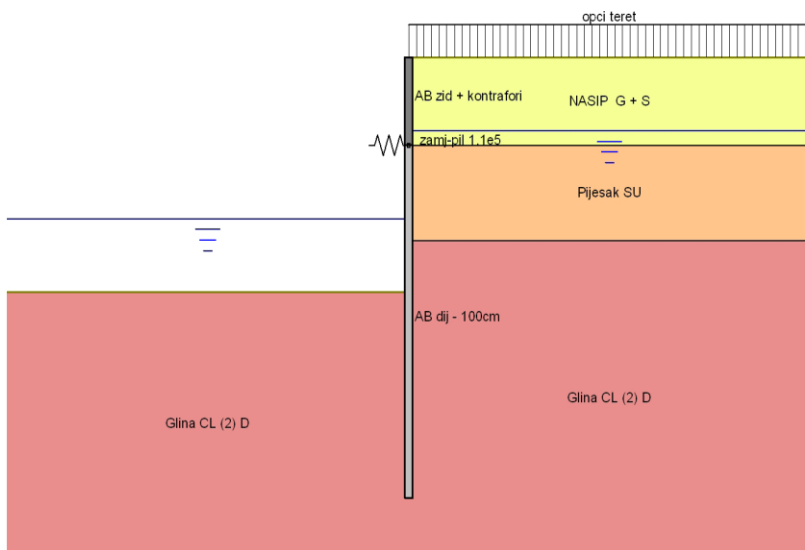
pomak prema iskopu (cm)



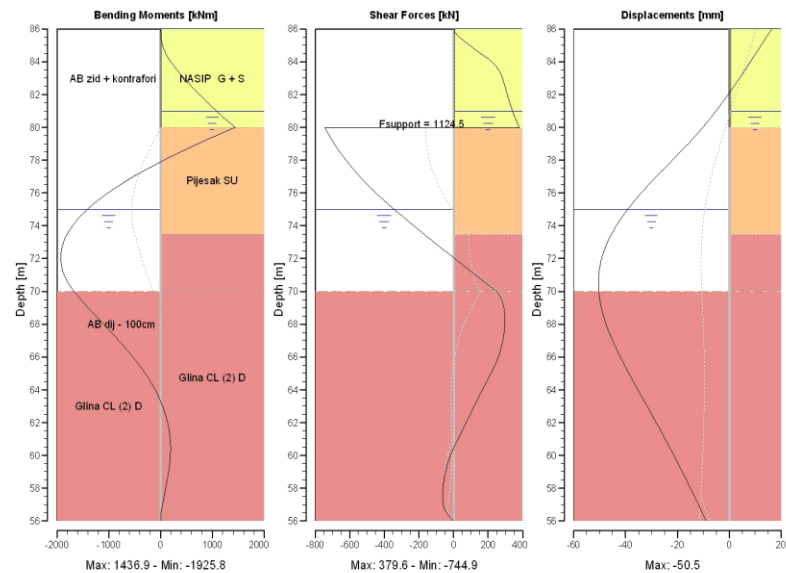
horizontalna naprezanja

Primjer jednostavnijeg proračuna s nelinearnim oprugama

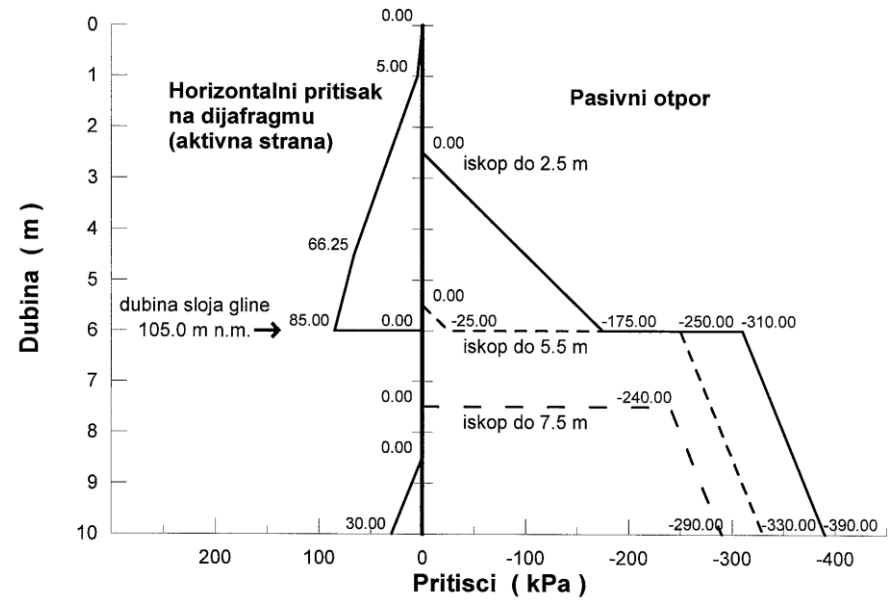
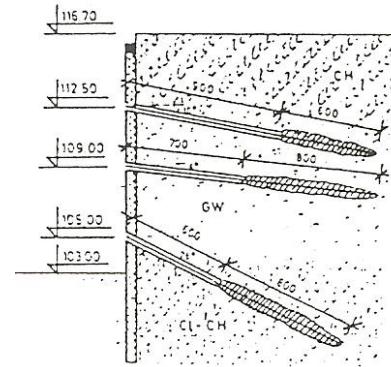
Outline - Stage 6: opci teret



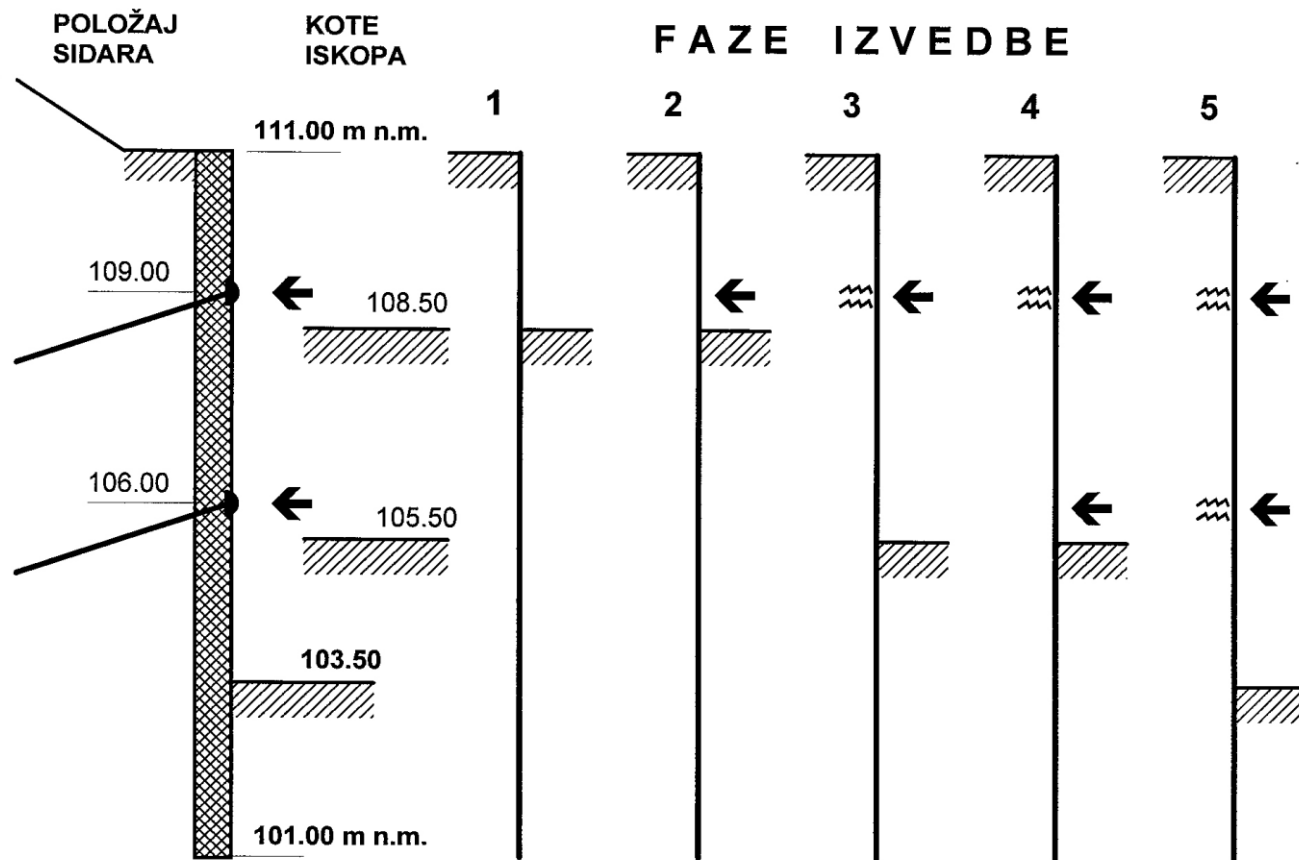
Moments/Forces/Displacements - Stage 6: opci teret



Simulacija izgradnje

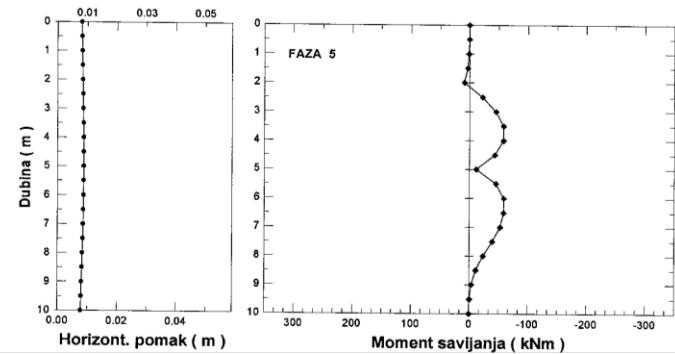
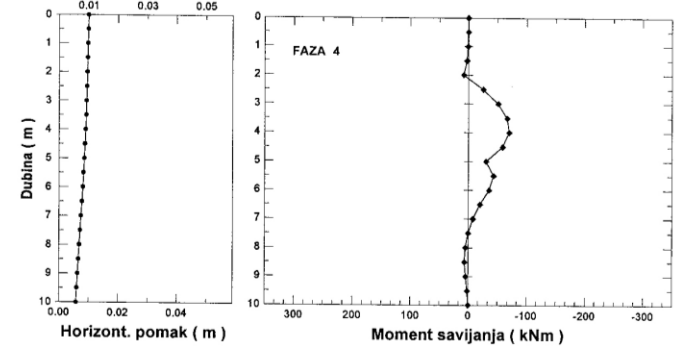
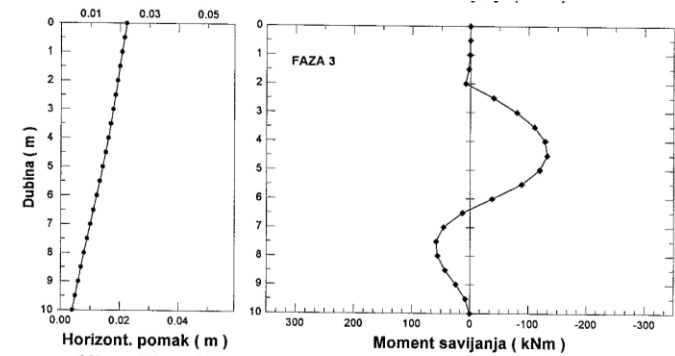
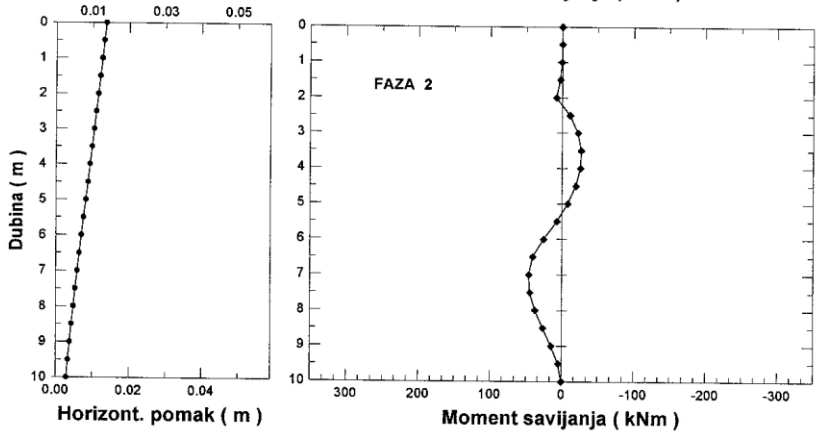
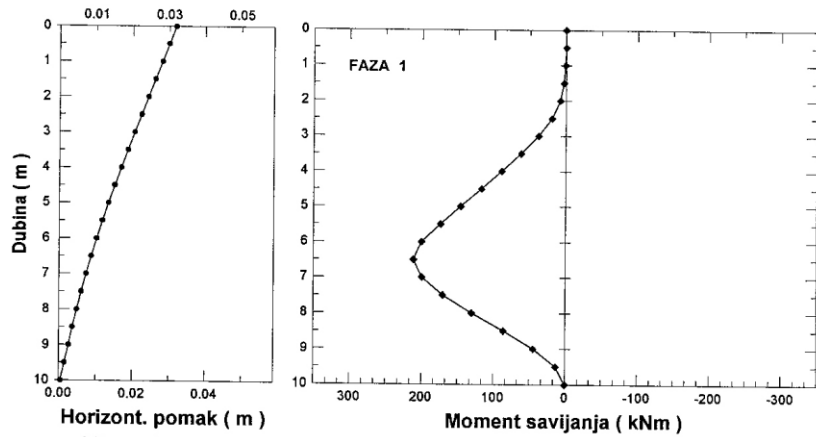


Simulacija izgradnje

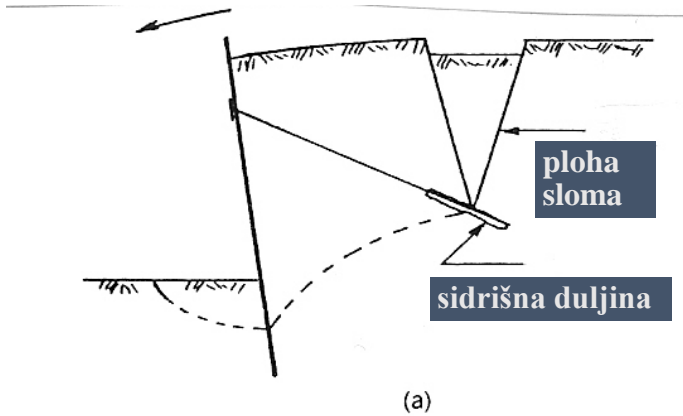


Statičke proračunske sheme za iskop i prednapinjanje sidara

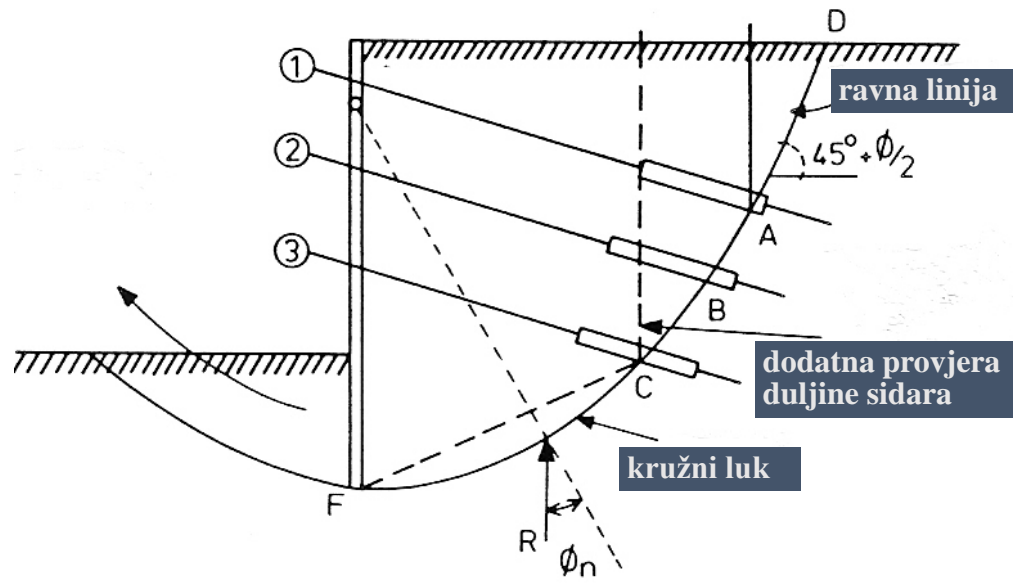
Simulacija izgradnje



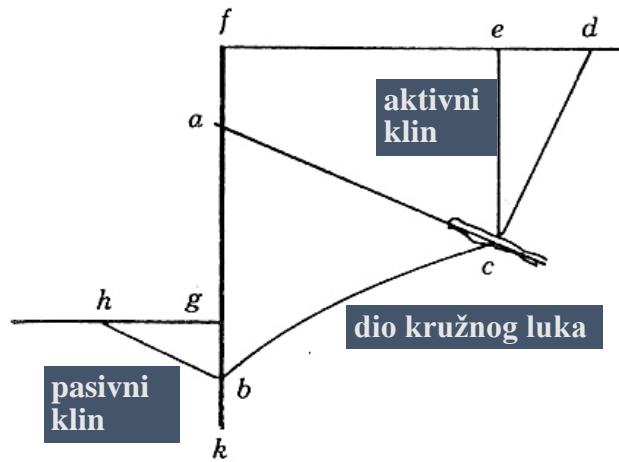
Opća stabilnost usidrenog sklopa



Analiza opće stabilnosti kružnom kliznom plohom



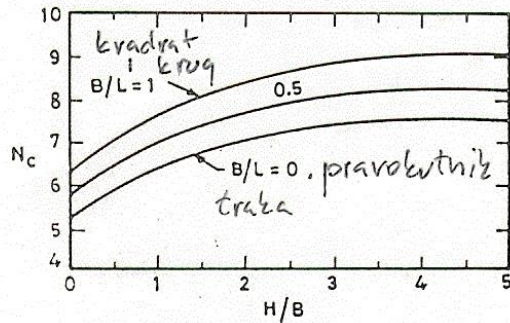
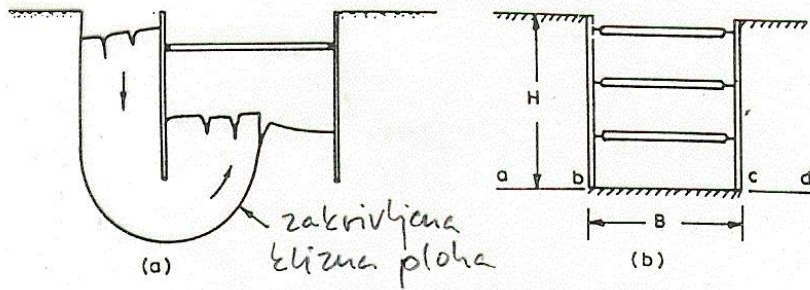
mehanizam sloma utvrđen eksperimentalno



zamjenjujući kruti blok

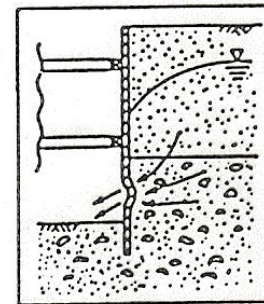
Nestabilnosti na dnu iskopa

MEKE GLINE

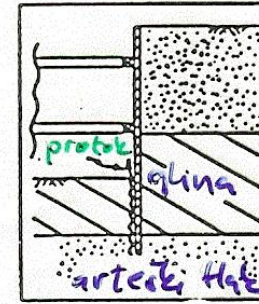


$$F_s = c_u N_c / (\gamma H + q)$$

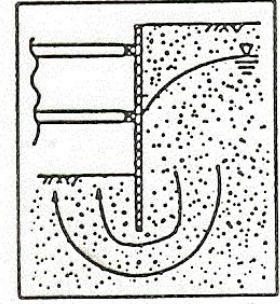
PIJESCI – pomaci i nestabilnosti zbog protjecanja vode



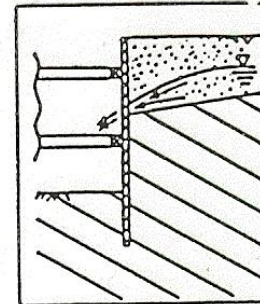
protok kroz zid



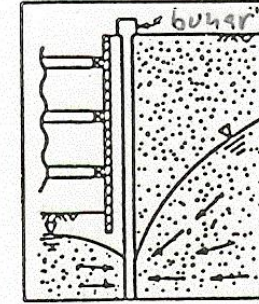
protok duž stijene



protok ispod stijene



curenje kroz zid

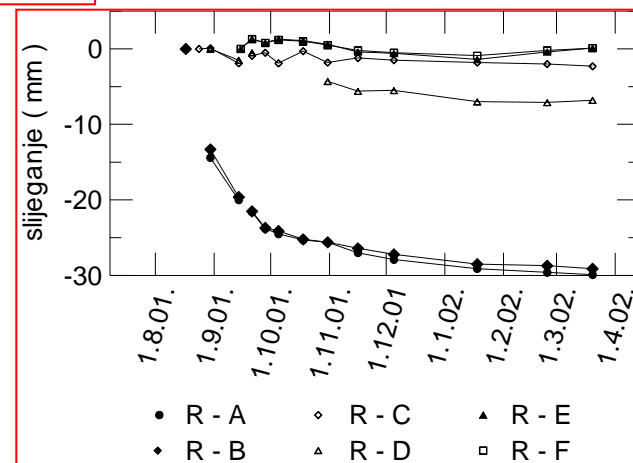
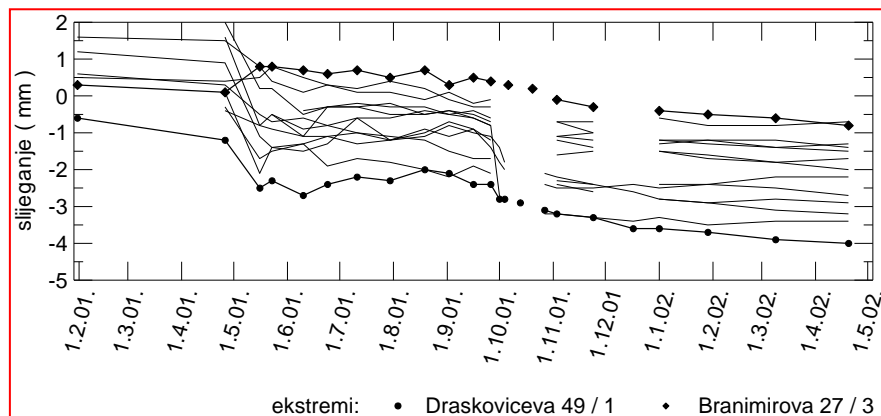
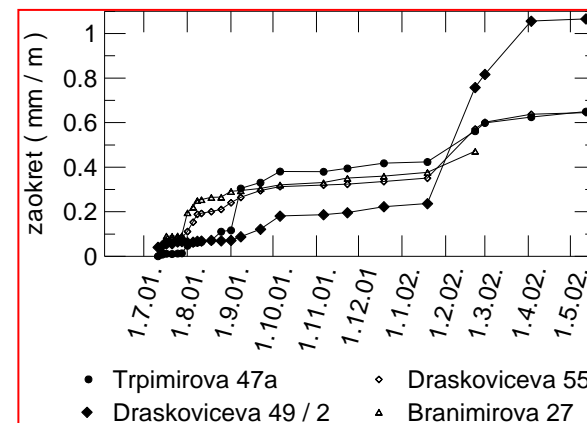
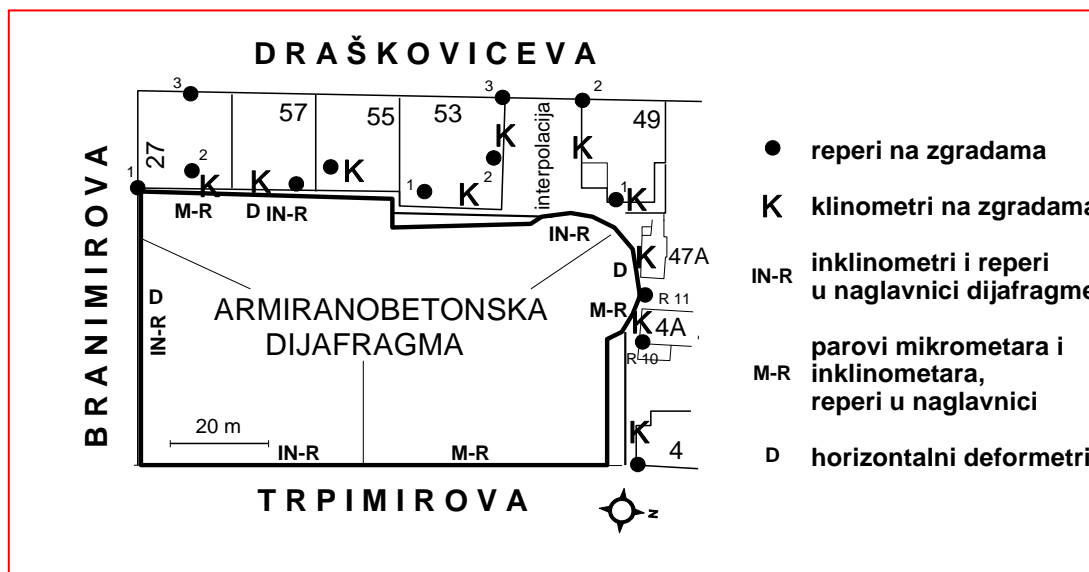


tečenje uslijed sniženja vodnog lica

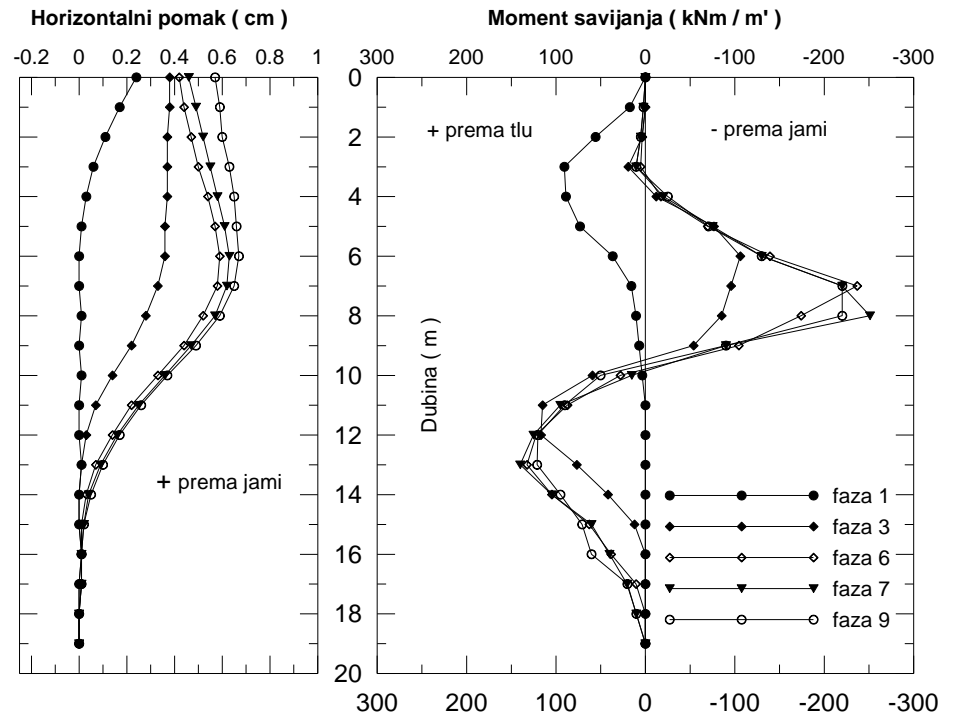
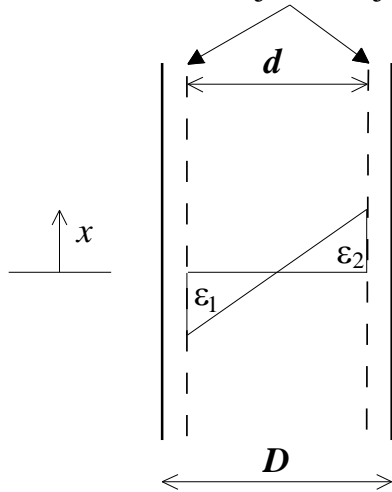
Građevna jama – centar “Branimir”



Građevna jama – centar “Branimir” - monitoring



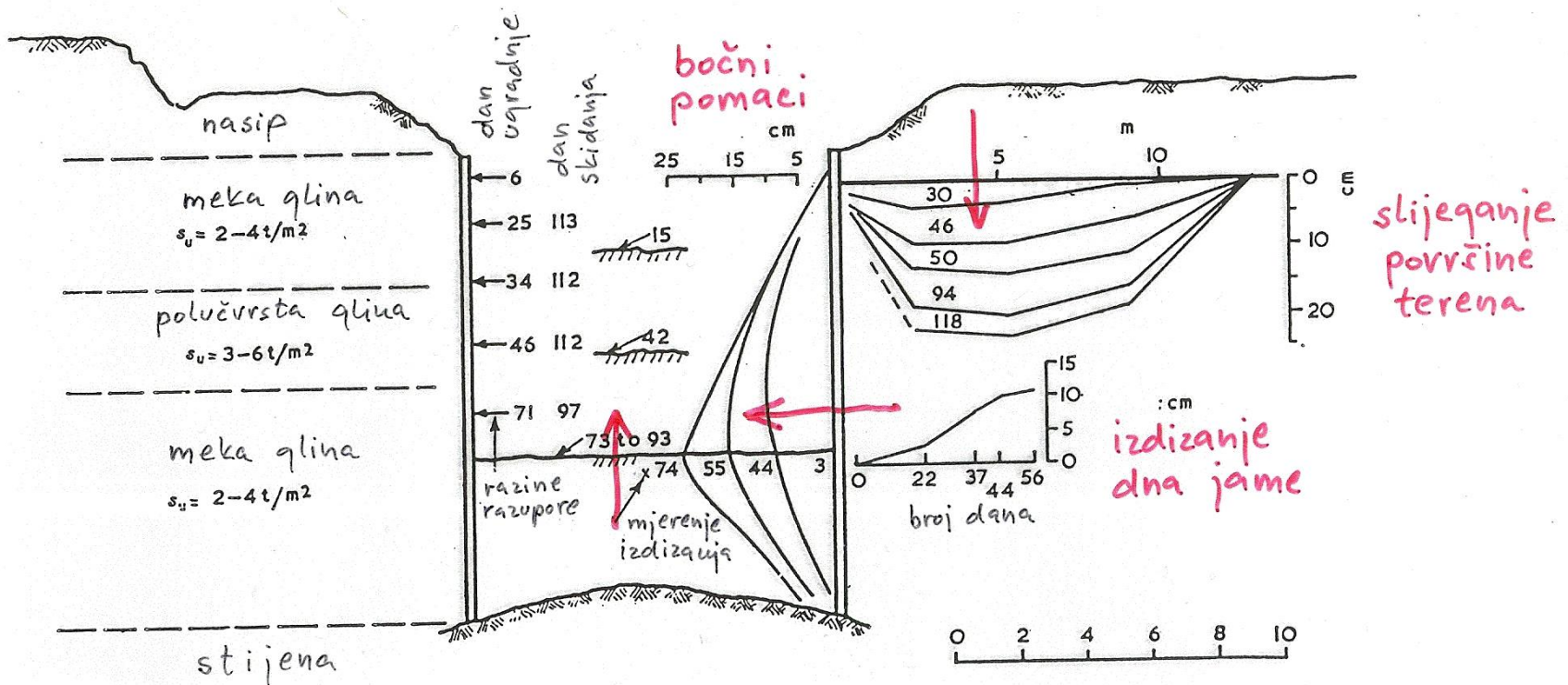
osi mjernih cijevi



Deformacije tla i potporne konstrukcije u vremenu

Primjer izmjerenih pomaka:

- slobodna površina terena, razuprta ukopana stijena (čelične talpe)
- Tlo: meka do polučvrsta glina



Pomaci tijekom iskopa

Opterećenje poluprostora – analogno kao za slijeganja i slom temelja

Vertikalna naprezanja i pomaci

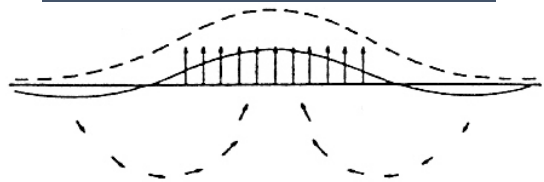
Opterećenje granične ravnine



(a)

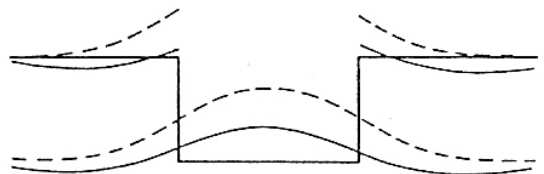
Slijeganja + slom temelja

Rasterećenje granične ravnine



(b)

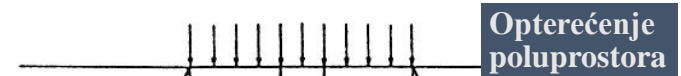
Preslikano na dno iskopa



(c)

— trenutno
- - - dugotrajno

Horizontalna naprezanja i pomaci na vertikalnoj ravnini



(a)

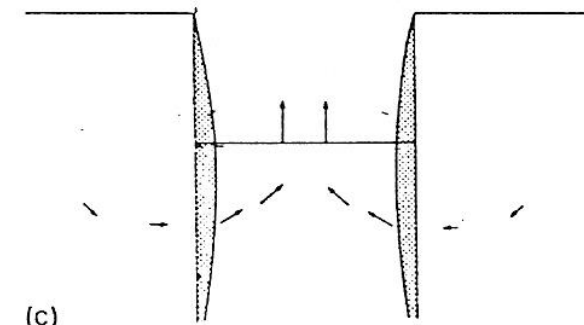
Opterećenje poluprostora



(b)

Rasterećenje poluprostora

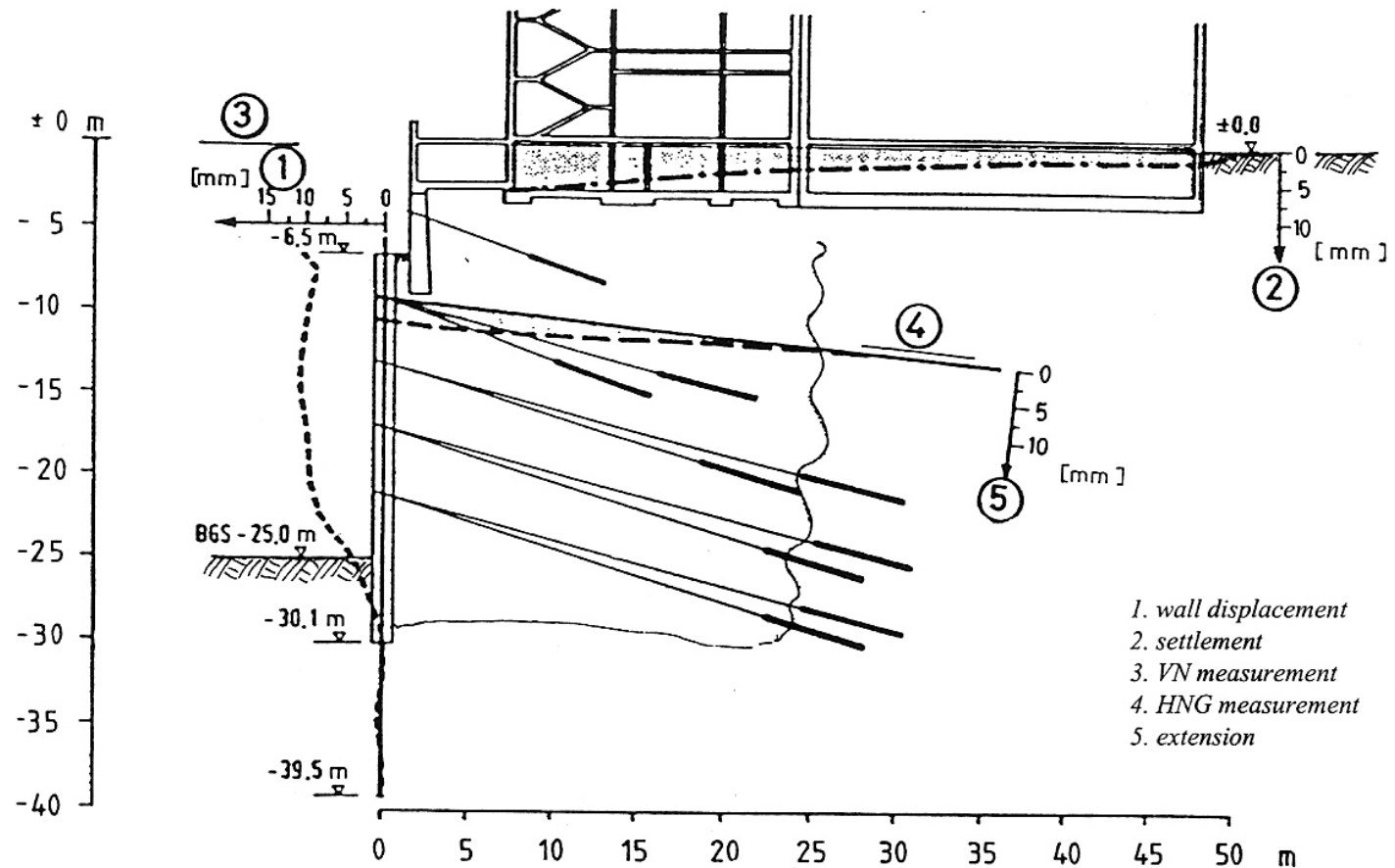
Preslikano na dno iskopa



(c)

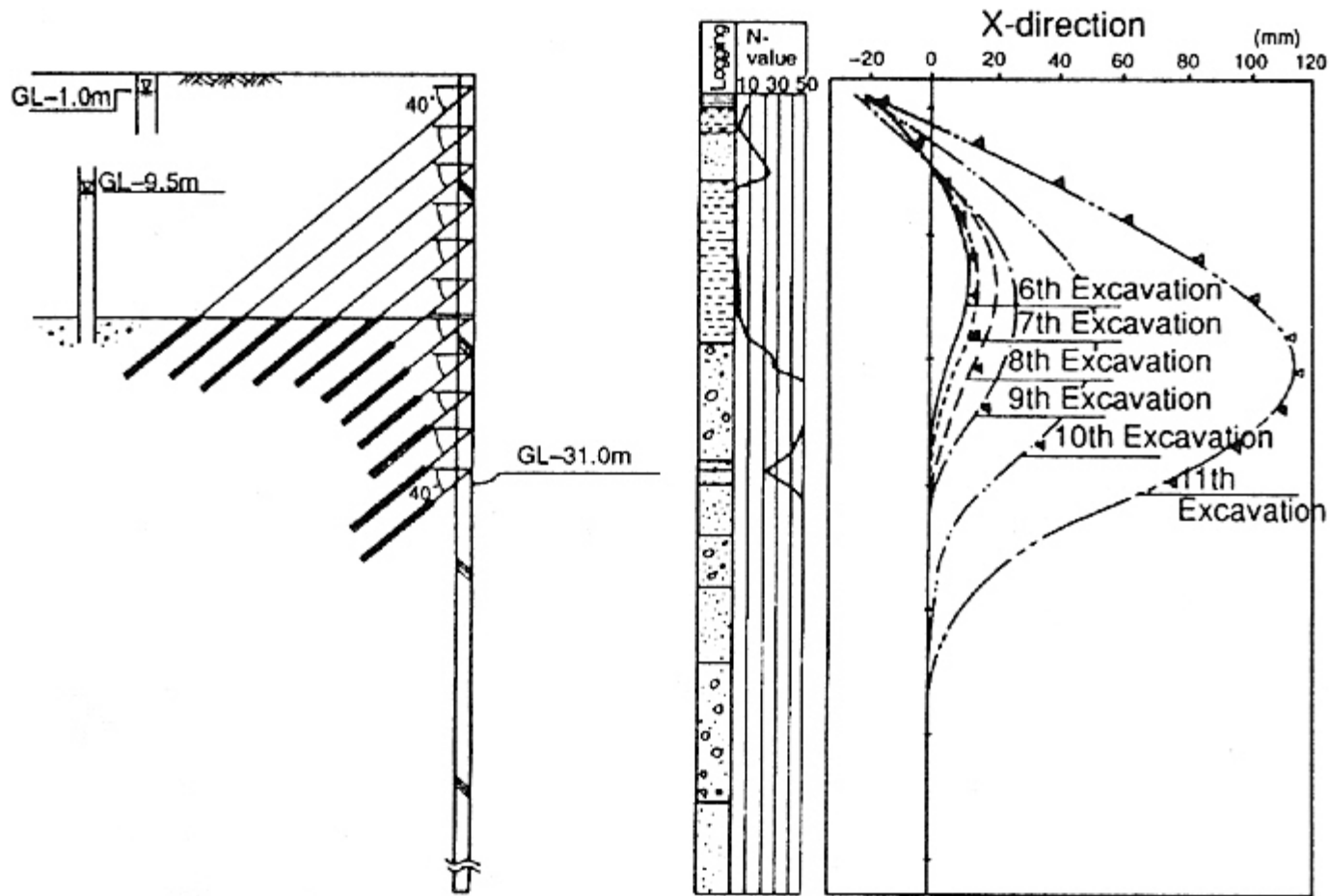
Pomaci tijekom iskopa

Primjer izmjerenih pomaka- iskop pored stambene zgrade



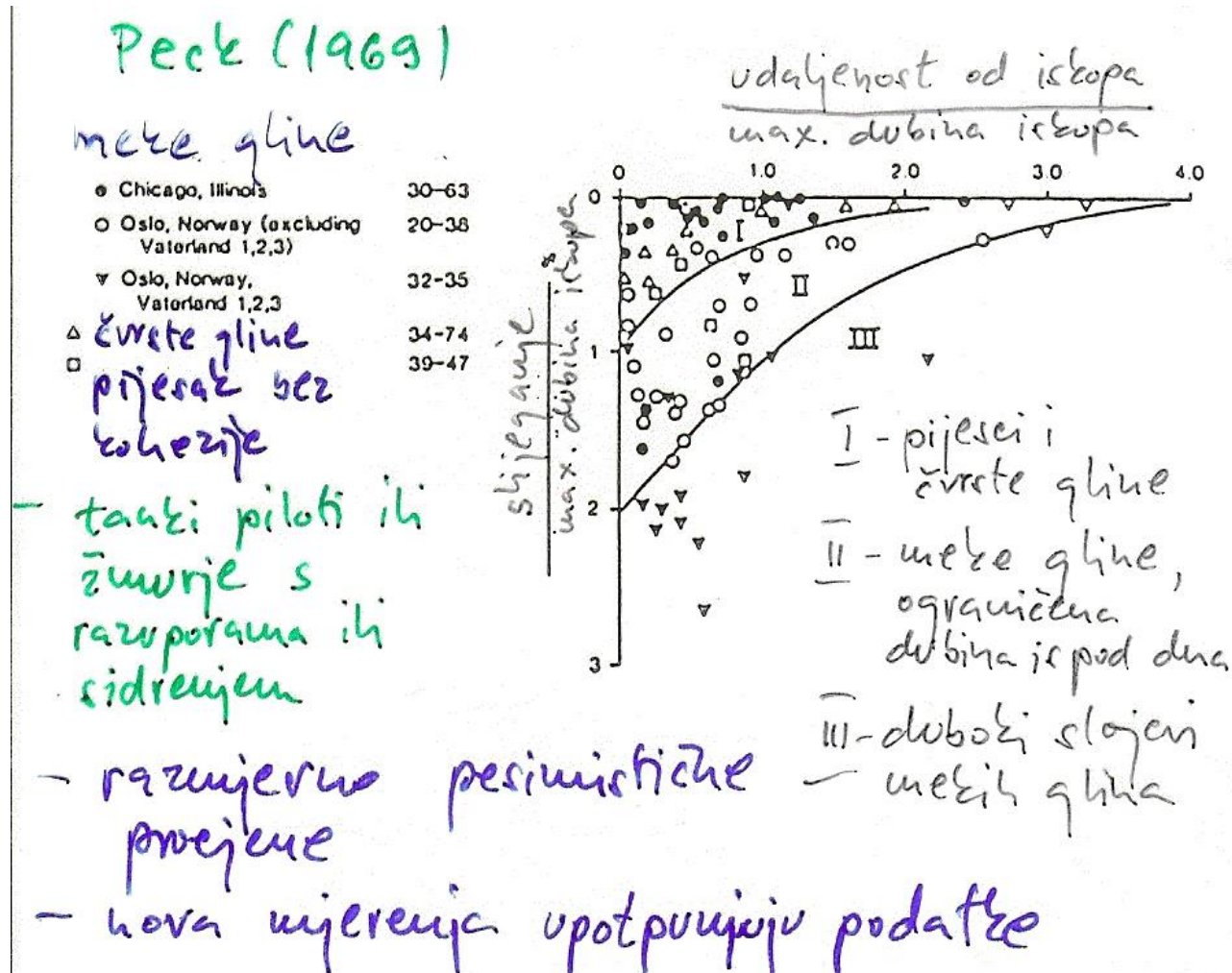
Pomaci tijekom iskopa

Primjer izmjerenih pomaka: duboka građevna jama



Mjereni pomaci ukopanih stijena

Zbirni prikaz izmjerenih pomaka u iskopima

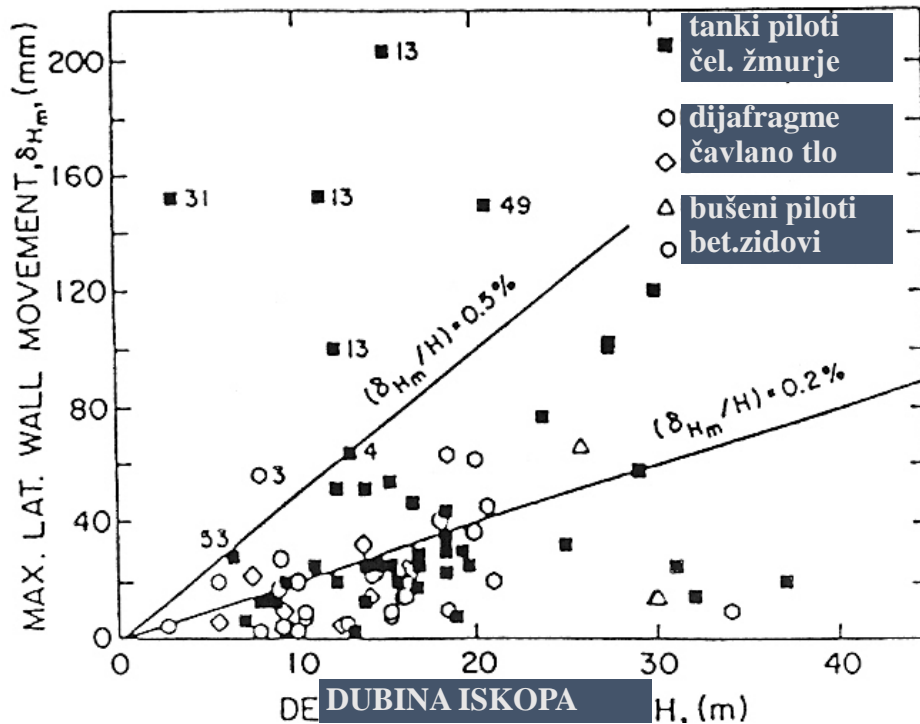


Mjereni pomaci ukopanih stijena

Zbirni prikaz izmjerenih pomaka u iskopima poduprtim *in-situ* zidovima

Tlo: čvrste gline i pijesci

Maksimalni izmjereni horizontalni pomaci (mm)



Maksimalna izmjerena slijeganja (mm)

