

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  
ispunjena 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 → diskontinuiteti
- **MEHANIČKO PONAŠANJE** – konstitucijski odnosi (naprezanje – deformacija)  
$$\sigma_{ij} = [ D ] \epsilon_{ij}$$
 - u matrici **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

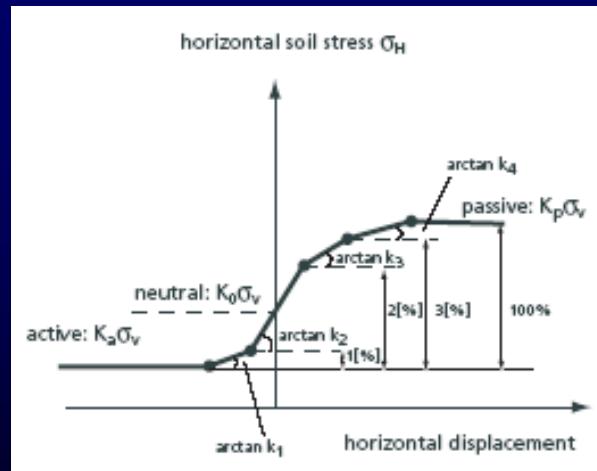
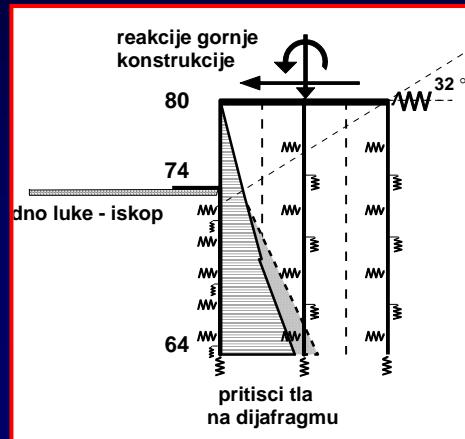
- pretpostavka: tlo je svugdje u točki sloma (kriterij sloma + jedn.ravnoteže)
- primjeri: Rankine (AKT-PAS), rješenja Sokolowskog...
- točna rješenja za različite rubne uvjete: rješavanje diferencijalnih jednadžbi hiperboličkog tipa npr. metodom karakteristika

### 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 mjeranjima (empirijske) → bolja predvidivost za tipične sluč.
- Jednostavni za korištenje ( prve ocjene, grube analize)

# 3. NUMERIČKE ANALIZE

## 3.1 Greda na oprugama



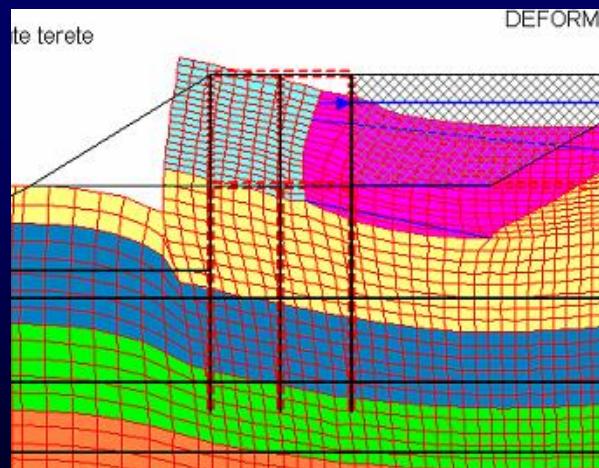
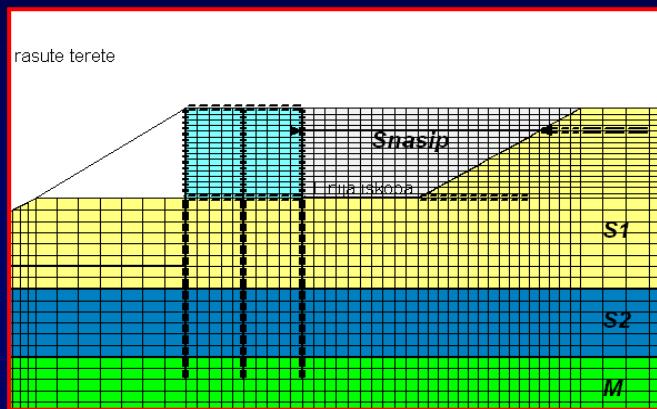
- Problem reduciran na gredu na popustljivim osloncima (izvorno: LIN EL) koji zamjenjuju tlo ili dio tla (pasivni) + posebne opruge za podupore ili sidra
- Kontrola sile u oprugama na slom (aktivni i pasivni)

**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 pritisaka 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

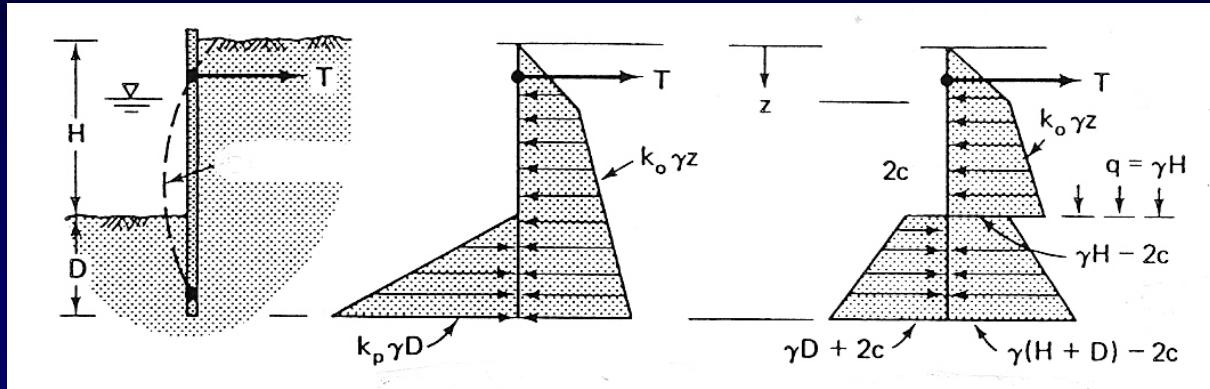


Sekvencijalna analiza- proračuni po fazama (konačno stanje jedne faze je početno stanje za drugu) → bolja simulacija nelinearnih procesa i parametara ovisnih o povijesti opt.

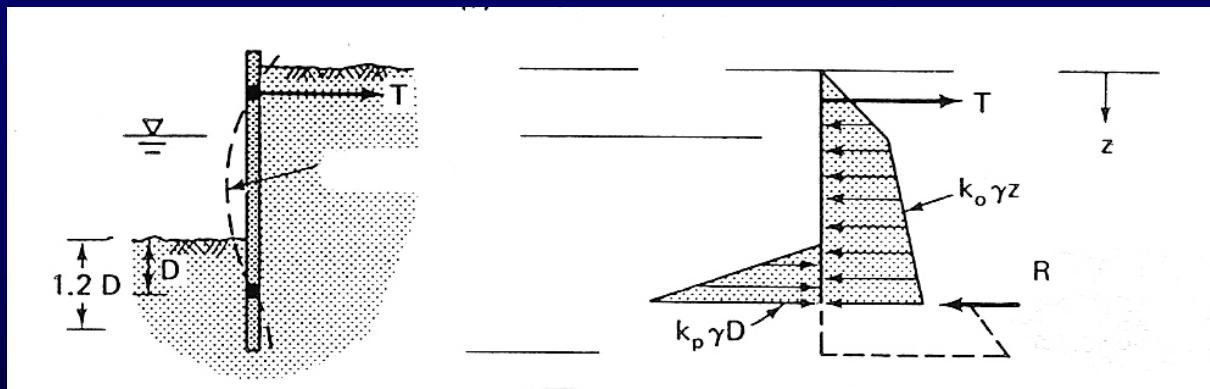
**konačne difference ili konačni elementi**  
(numerički aparat)

- točnost predviđanja – konst. modeli, parametri
- traže specijalistička znanja (inž., mehtla, num.)
- kontrole i prikazivanje rezultata,
- parametarske analize (studija) – izbor mjerodavnih par.
- **Kad je dosta točno ? ( za proj. ili za istraž.?)**

# Pojednostavljeni postupci

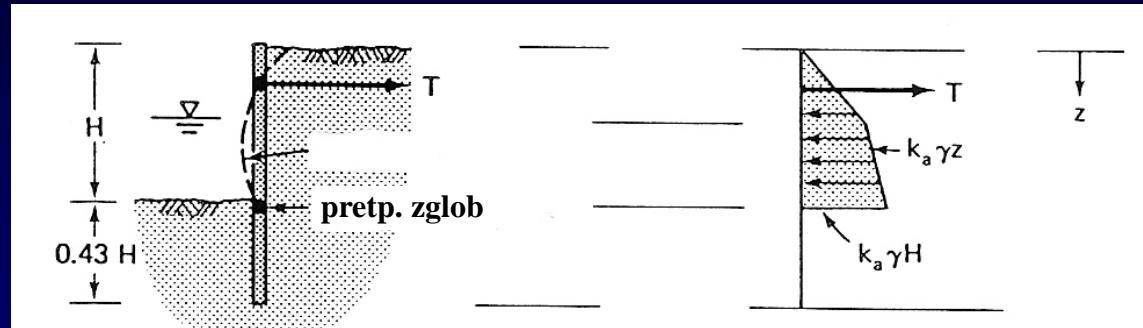


a) stijena slobodna na dnu ( free earth support )

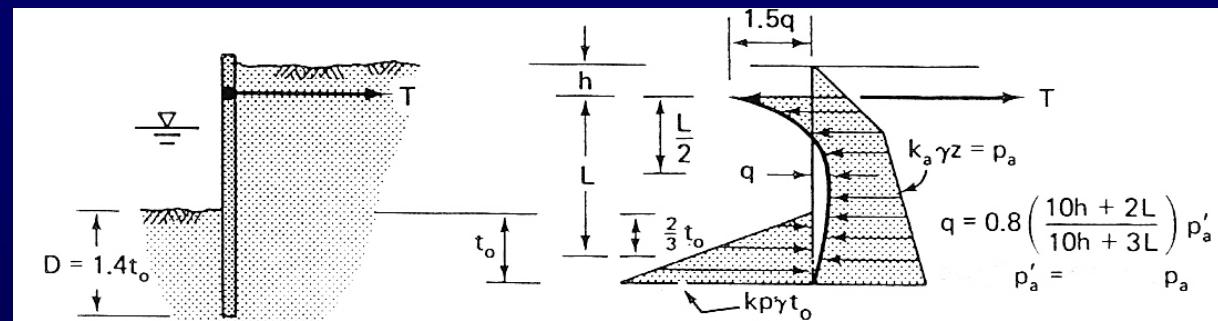


b) stijena uklještena na dnu (fixed earth support)

# Pojednostavljeni postupci

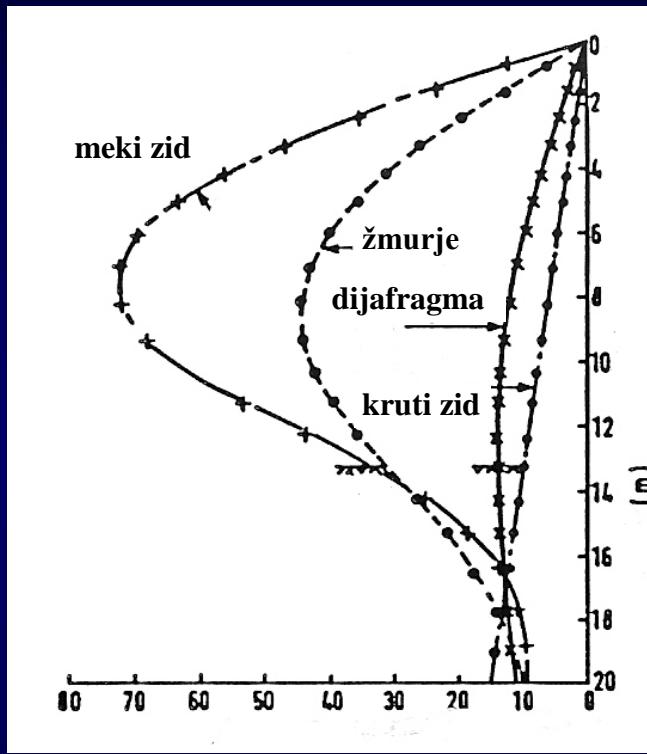


c) postupak Tchebotarioffa

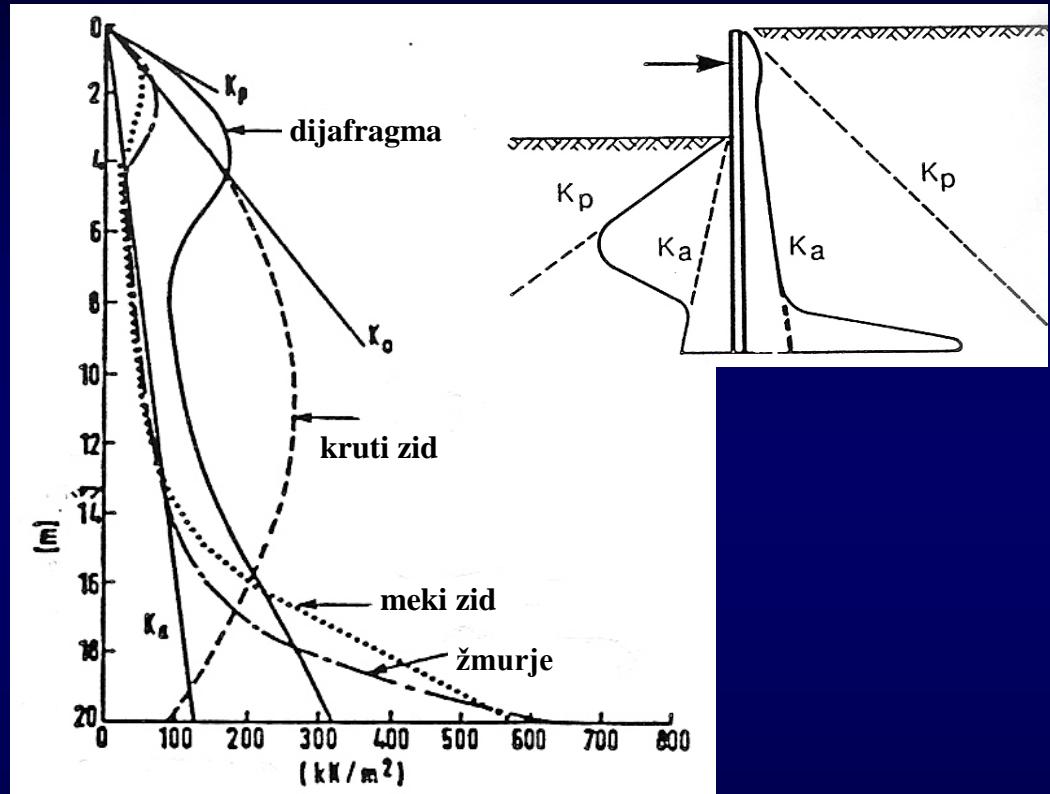


d) postupak prema  
Danskim pravilima

# Utjecaj krutosti zida

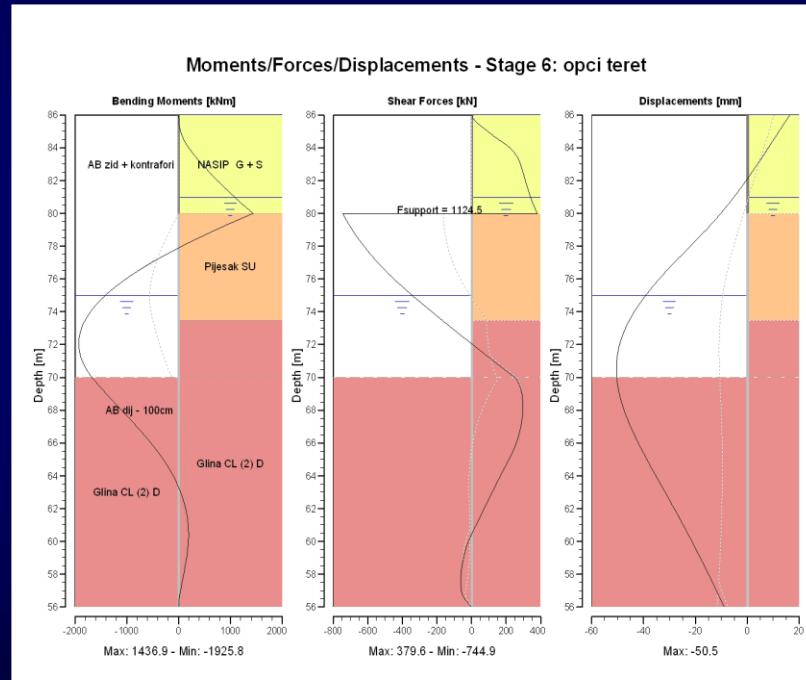
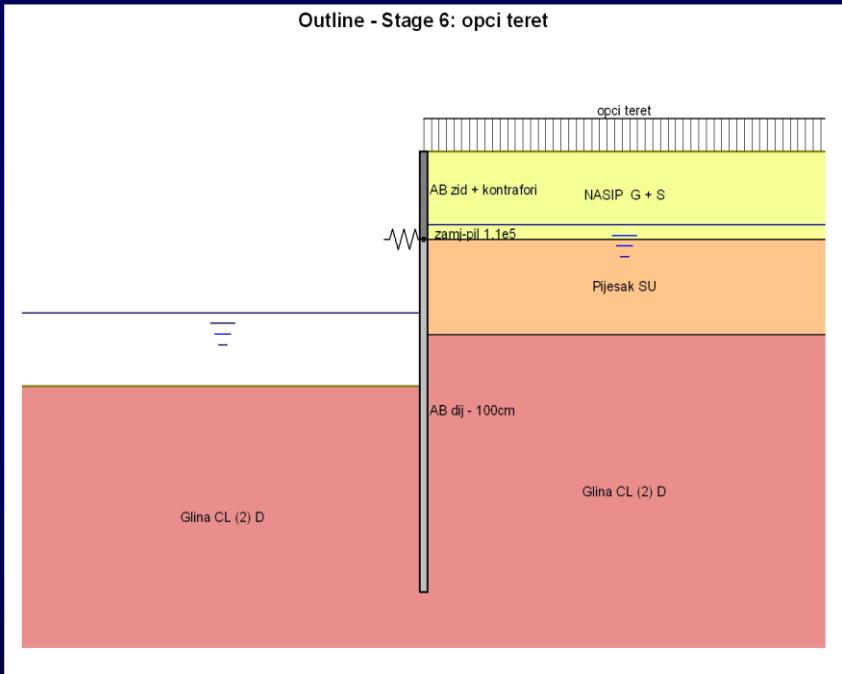


pomak prema iskopu (cm)

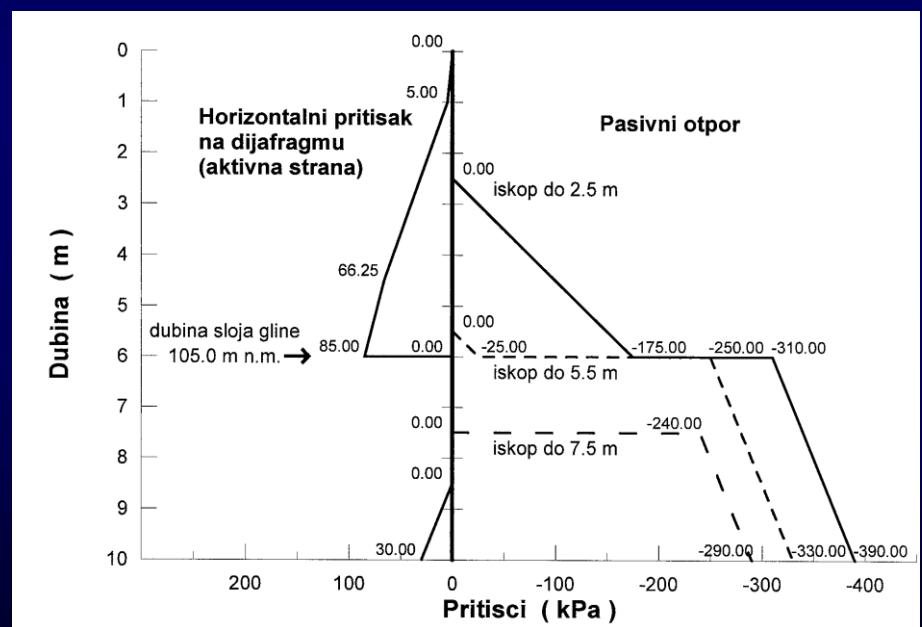
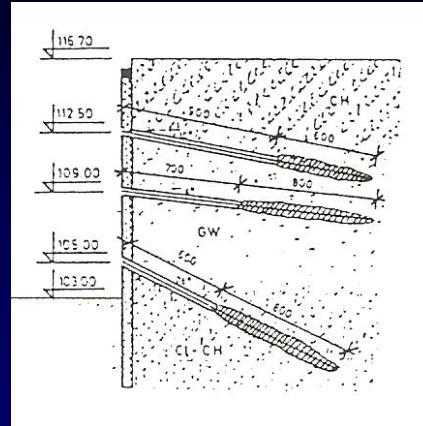


horizontalna naprezanja

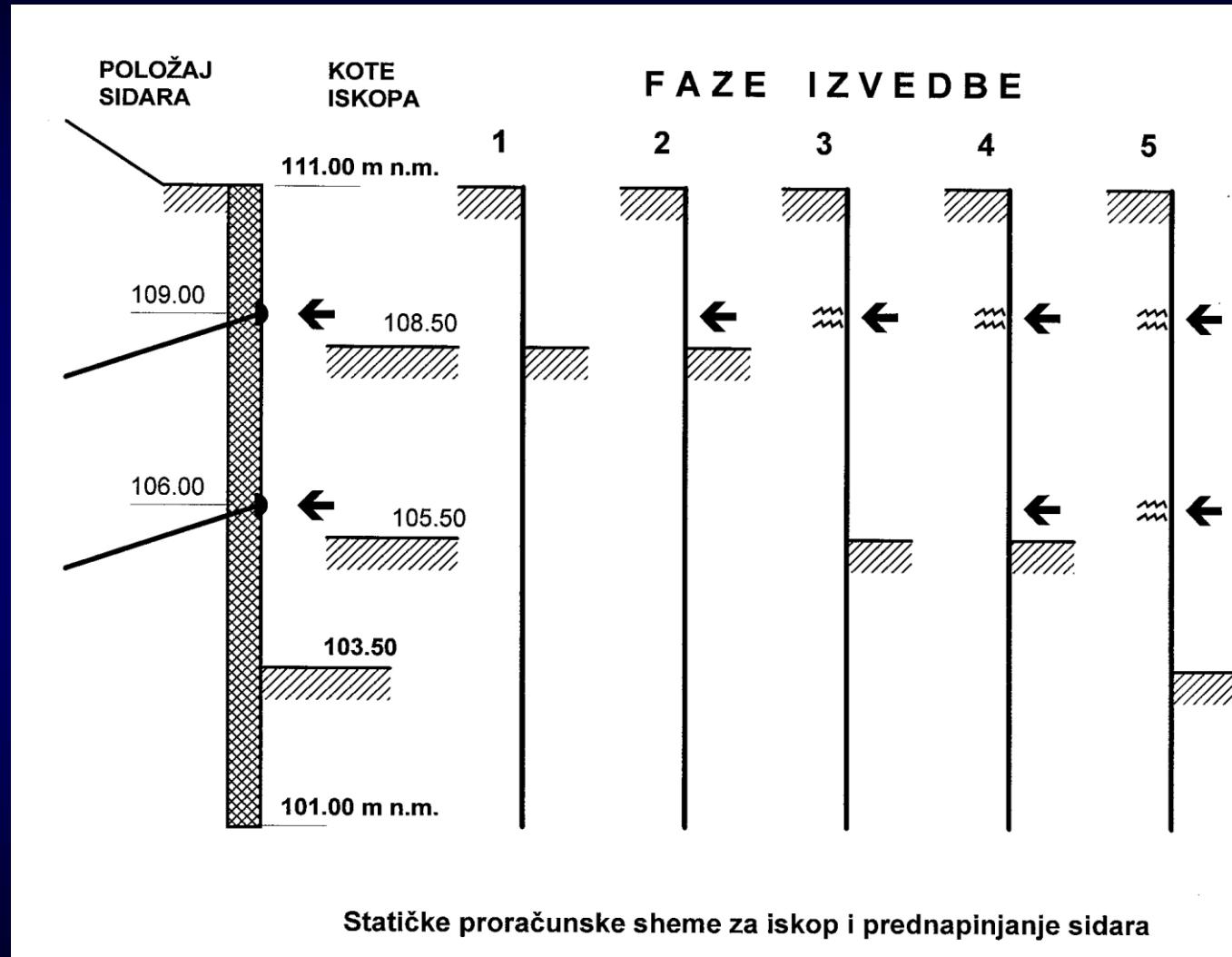
# Primjer jednostavnijeg proračuna s nelinearnim oprugama



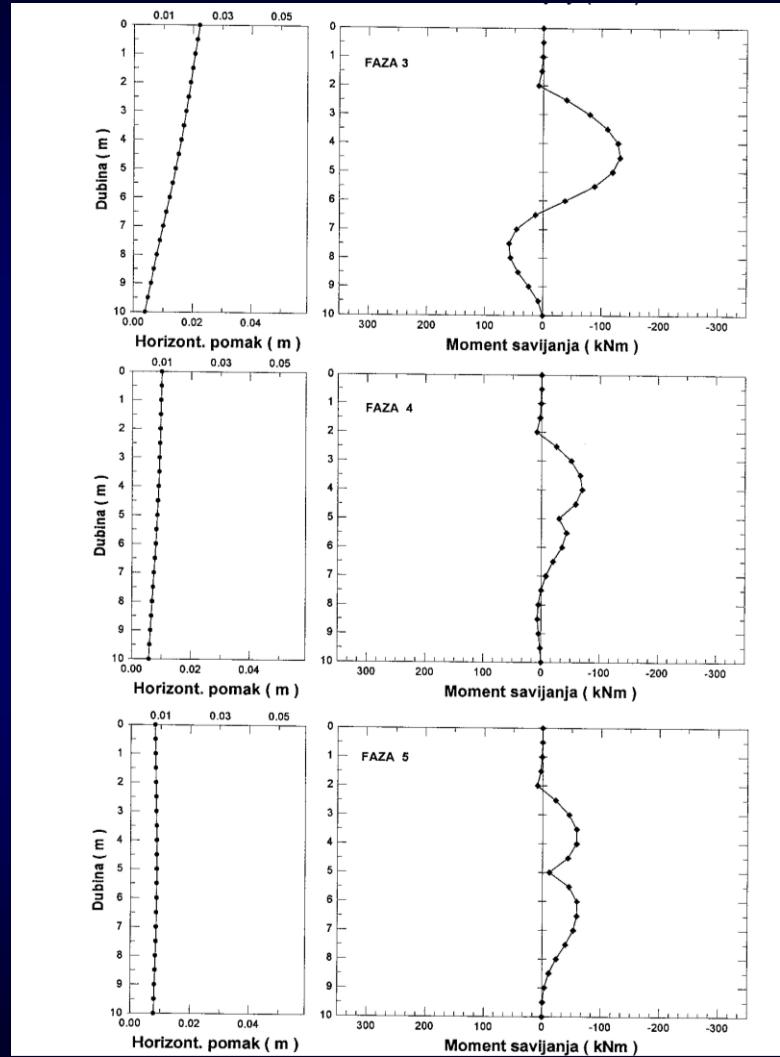
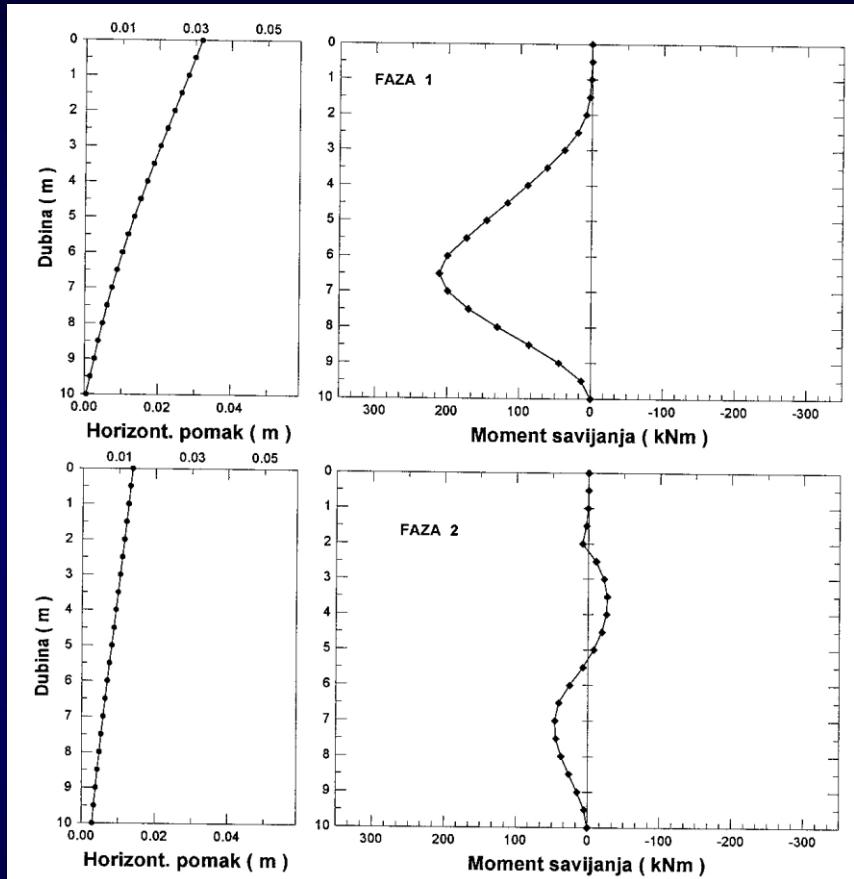
# Simulacija izgradnje



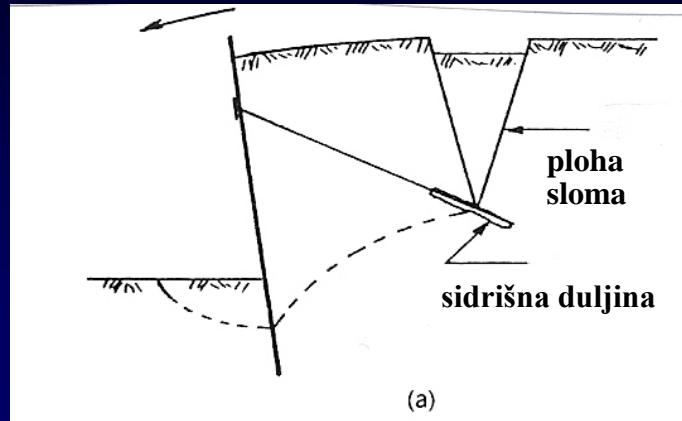
# Simulacija izgradnje



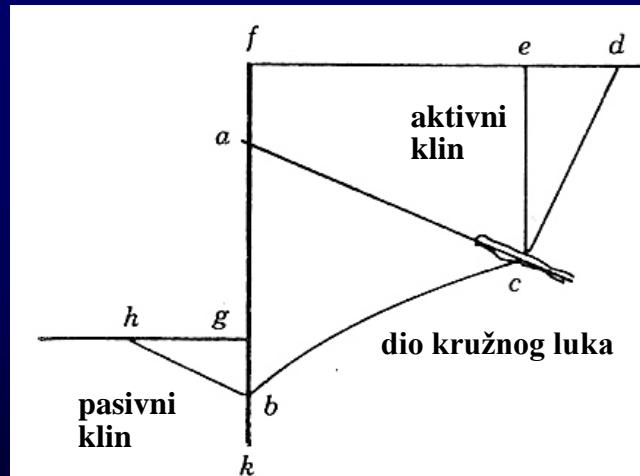
# Simulacija izgradnje



# Opća stabilnost usidrenog sklopa

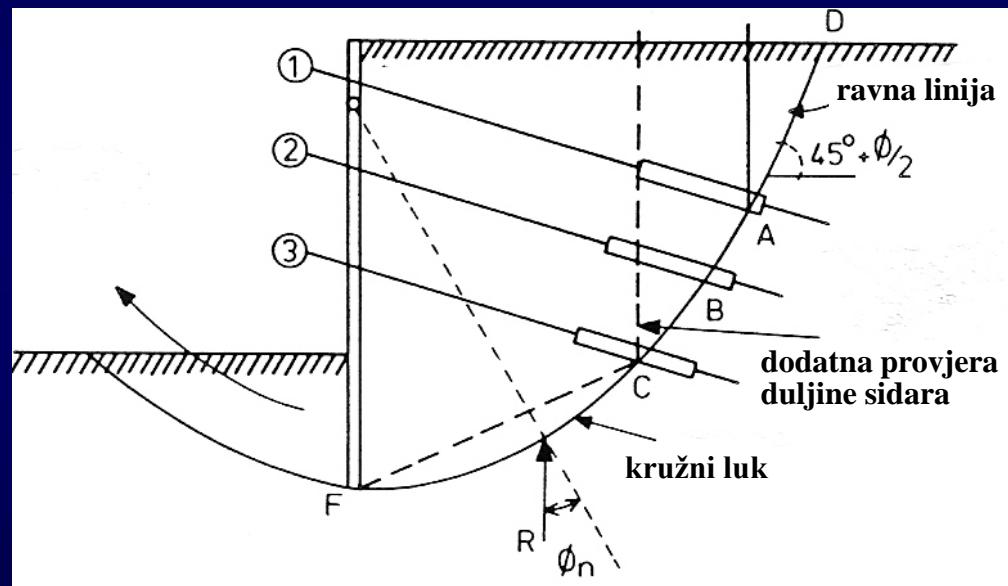


mehanizam sloma utvrđen eksperimentalno



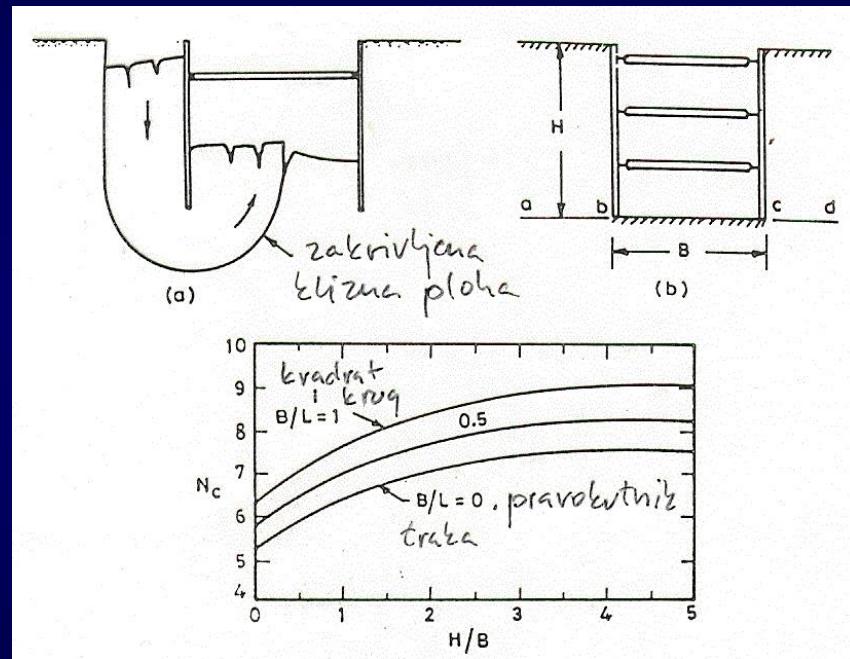
zamjenjujući kruti blok

## Analiza opće stabilnosti kružnom kliznom plohom



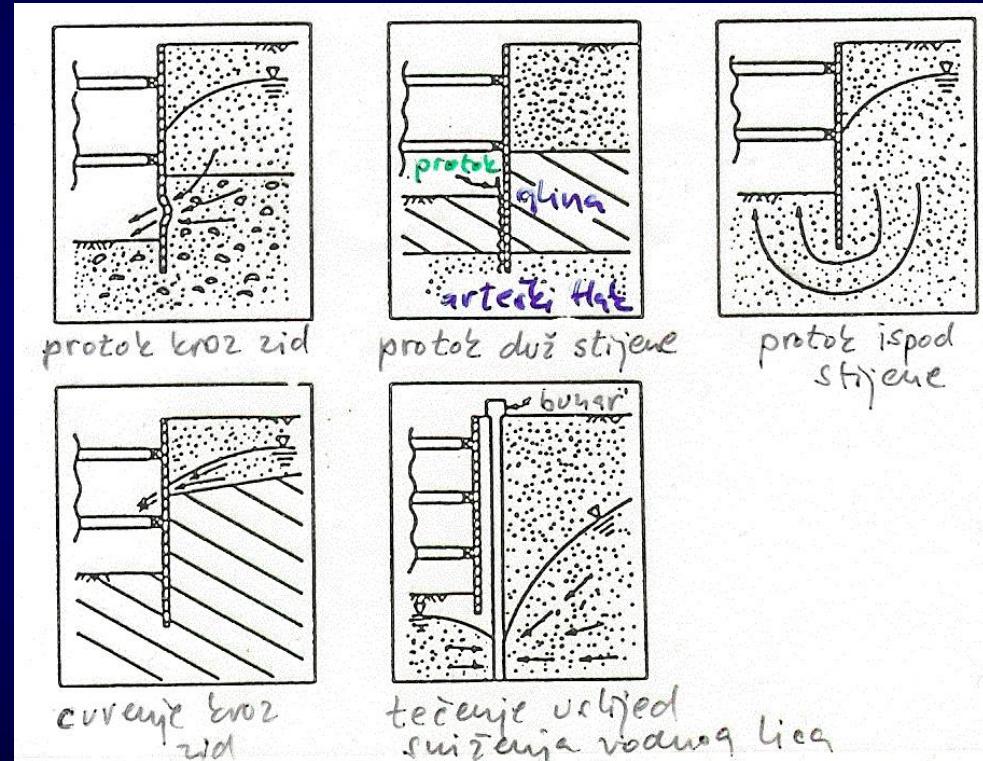
# Nestabilnosti na dnu iskopa

## MEKE GLINE



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

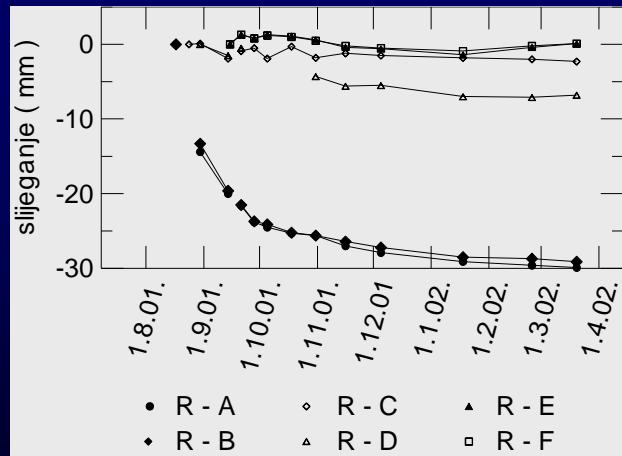
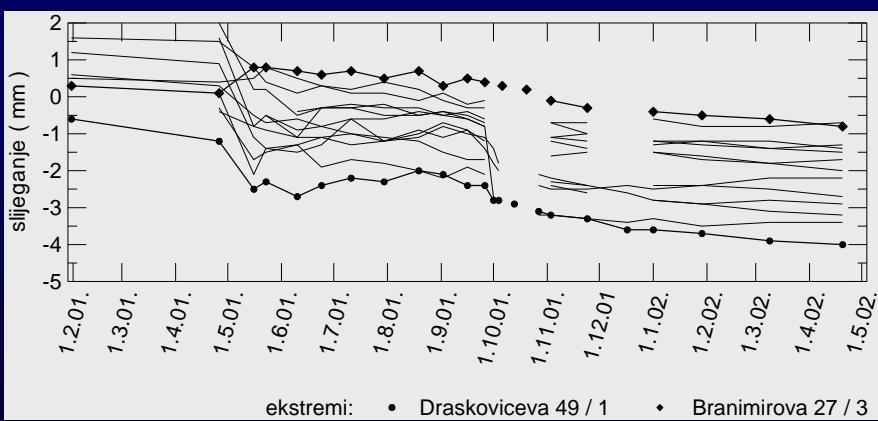
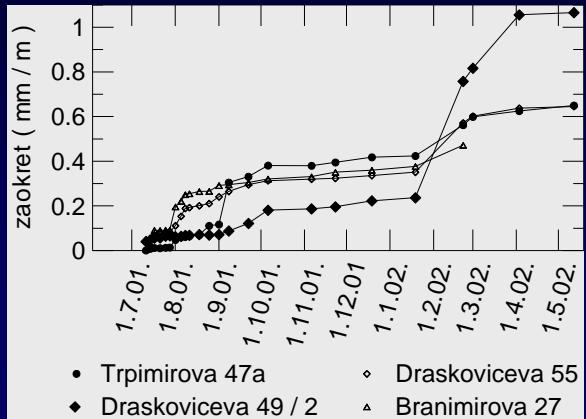
## PIJESCI – pomaci i nestabilnosti zbog protjecanja vode

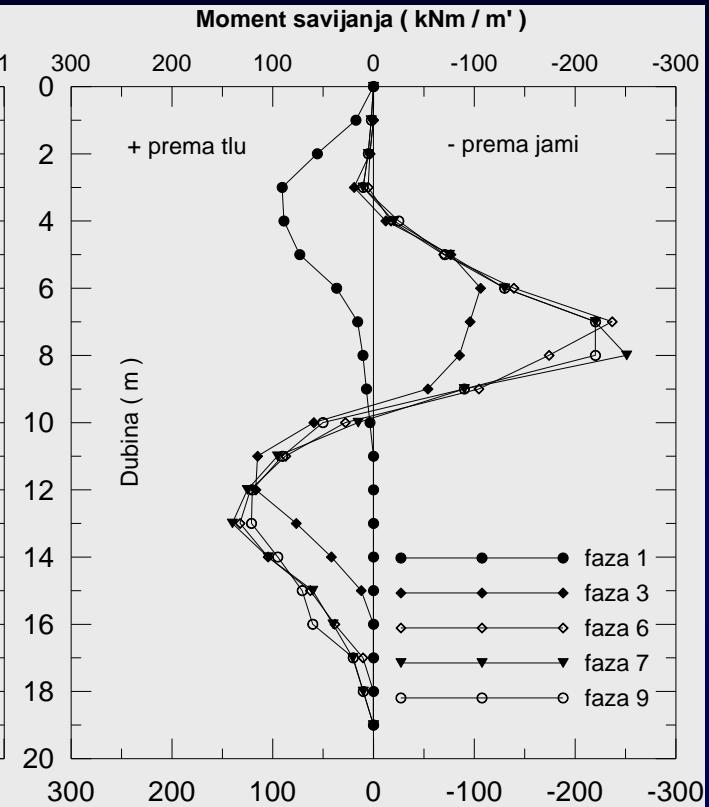
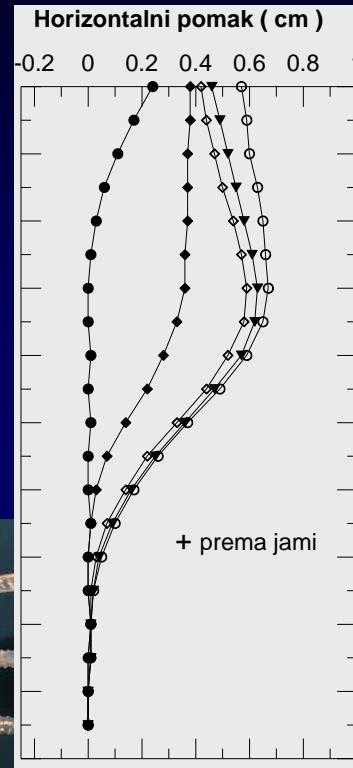
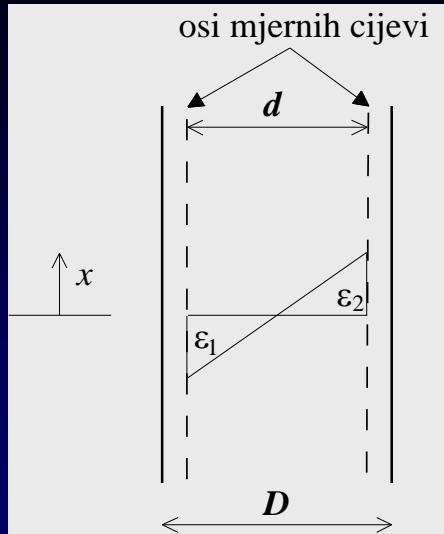


# Gradevna jama – centar “Branimir”



# Gradjevna jama – centar “Branimir” - monitoring

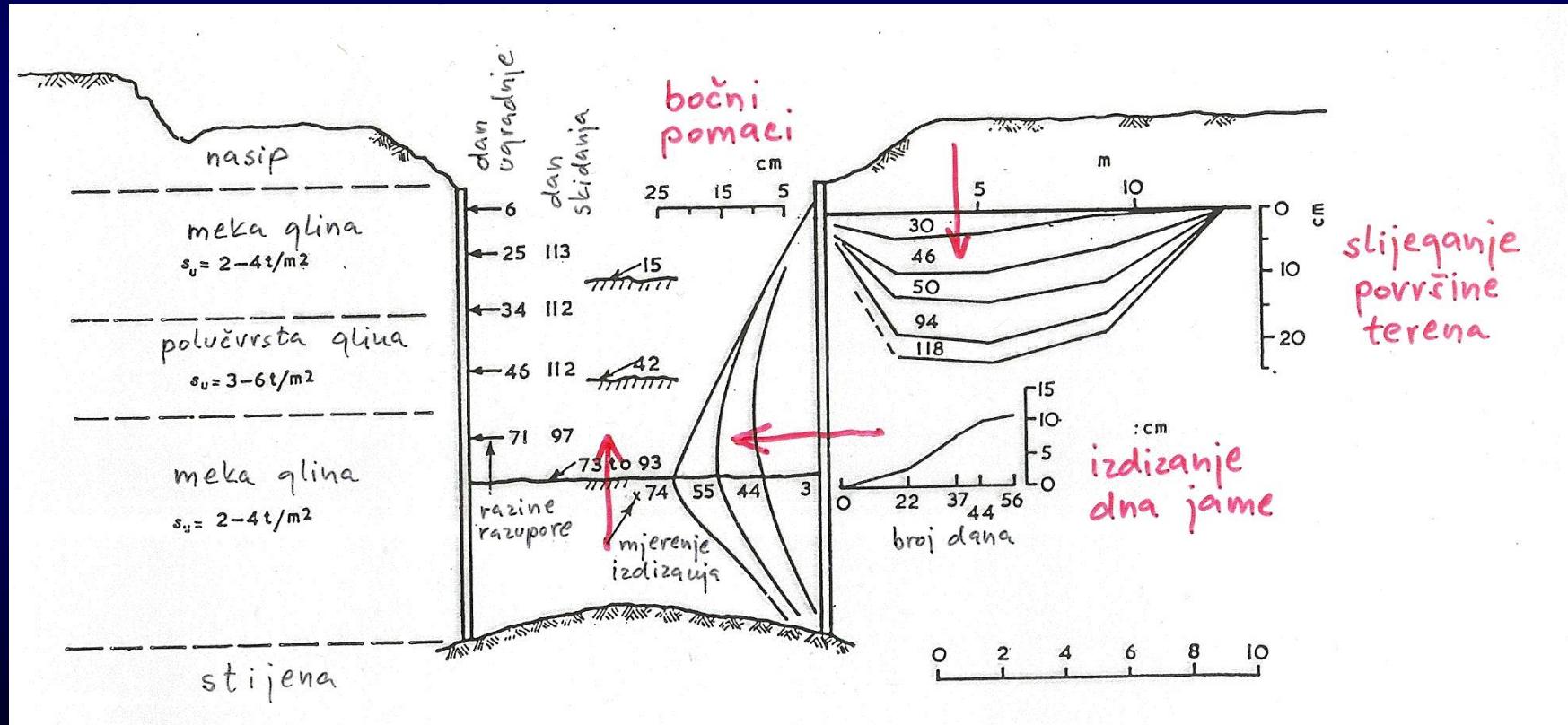




# Deformacije tla i potporne konstrukcije u vremenu

Primjer izmjerenih pomaka:

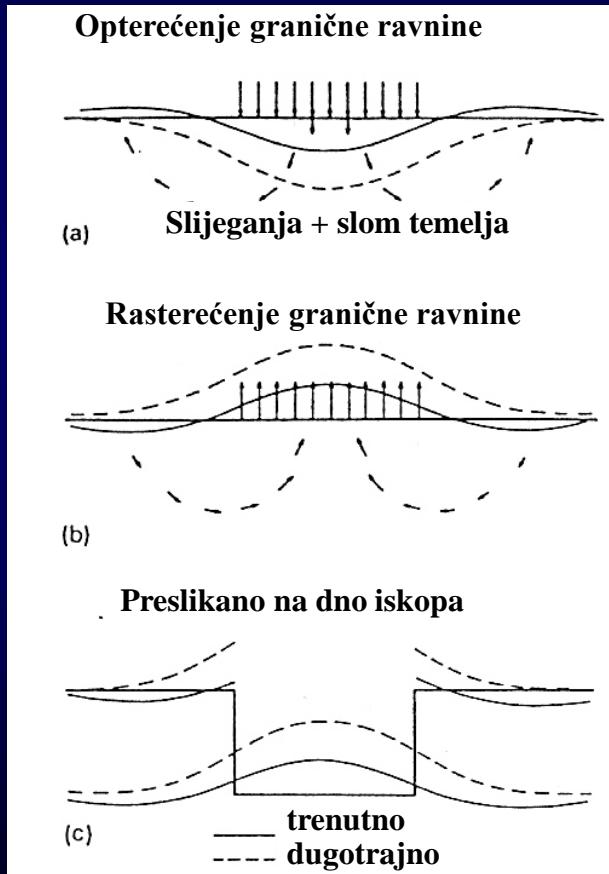
- slobodna površina terena, razuprta ukopana stijena (čelične talpe)
- Tlo: meka do polučvrsta glina



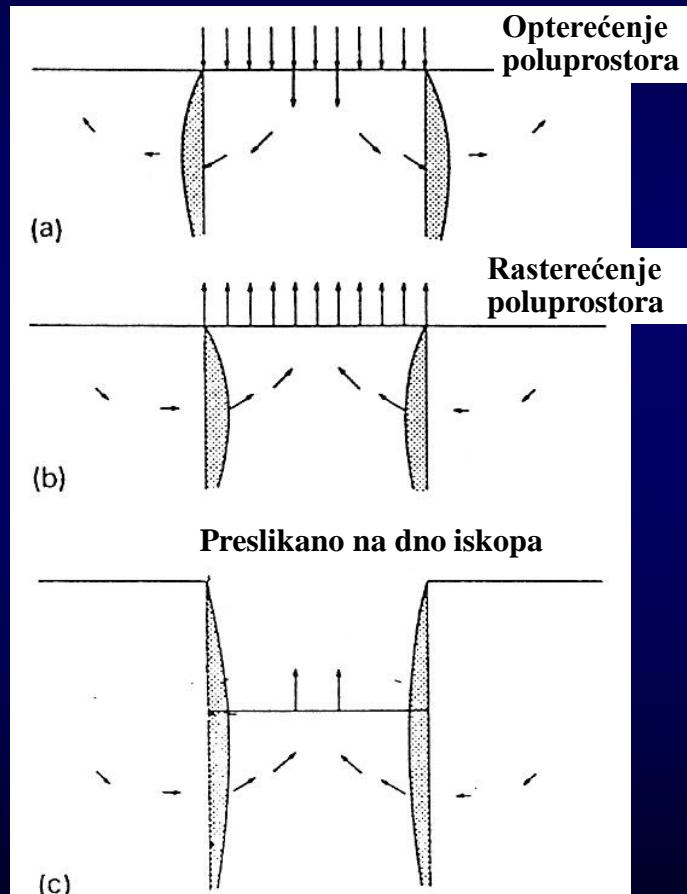
# Pomaci tijekom iskopa

Opterećenje poluprostora – analogno kao za slijeganja i slom temelja

Vertikalna naprezanja i pomaci

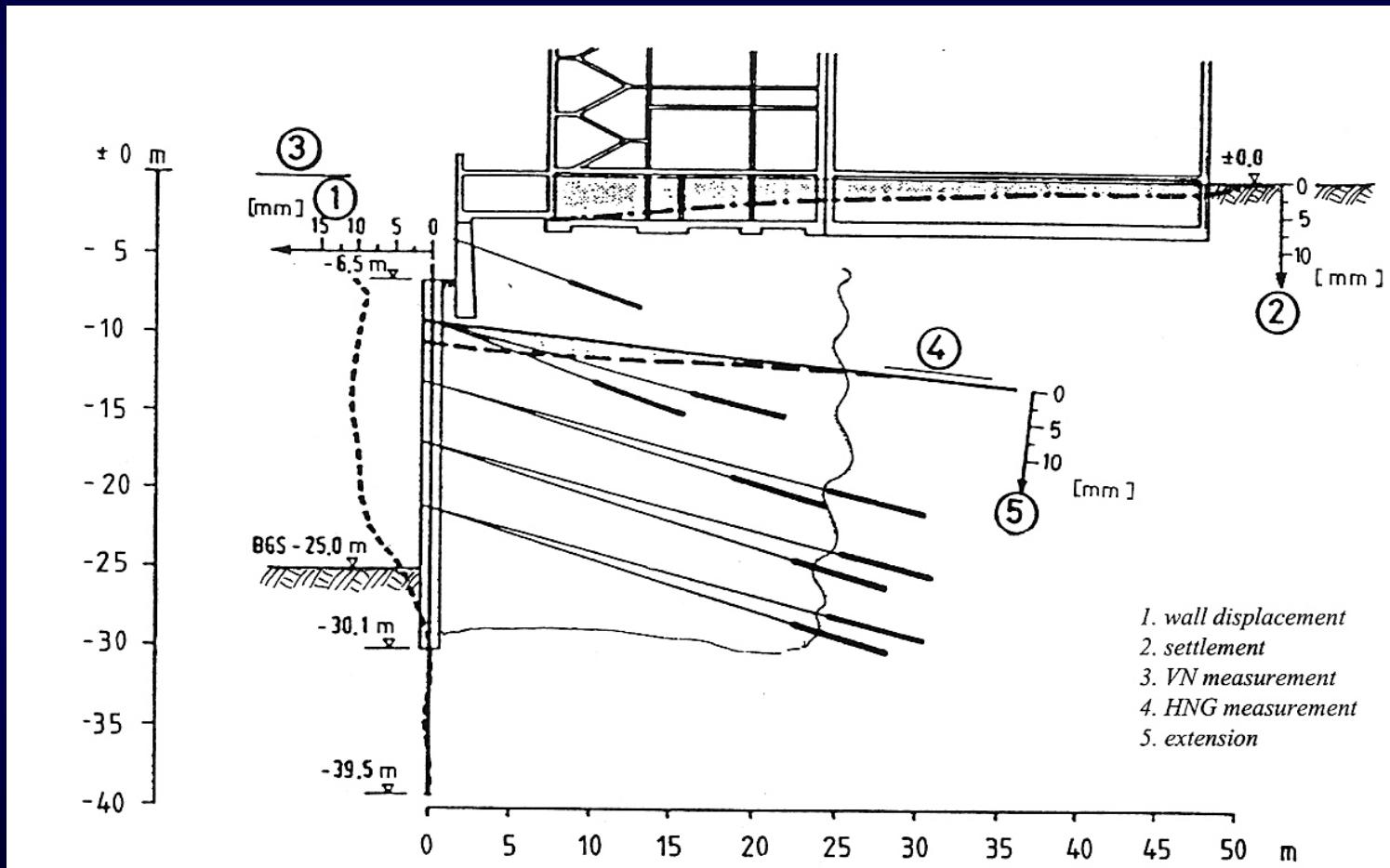


Horizontalna naprezanja i pomaci na vertikalnoj ravnini



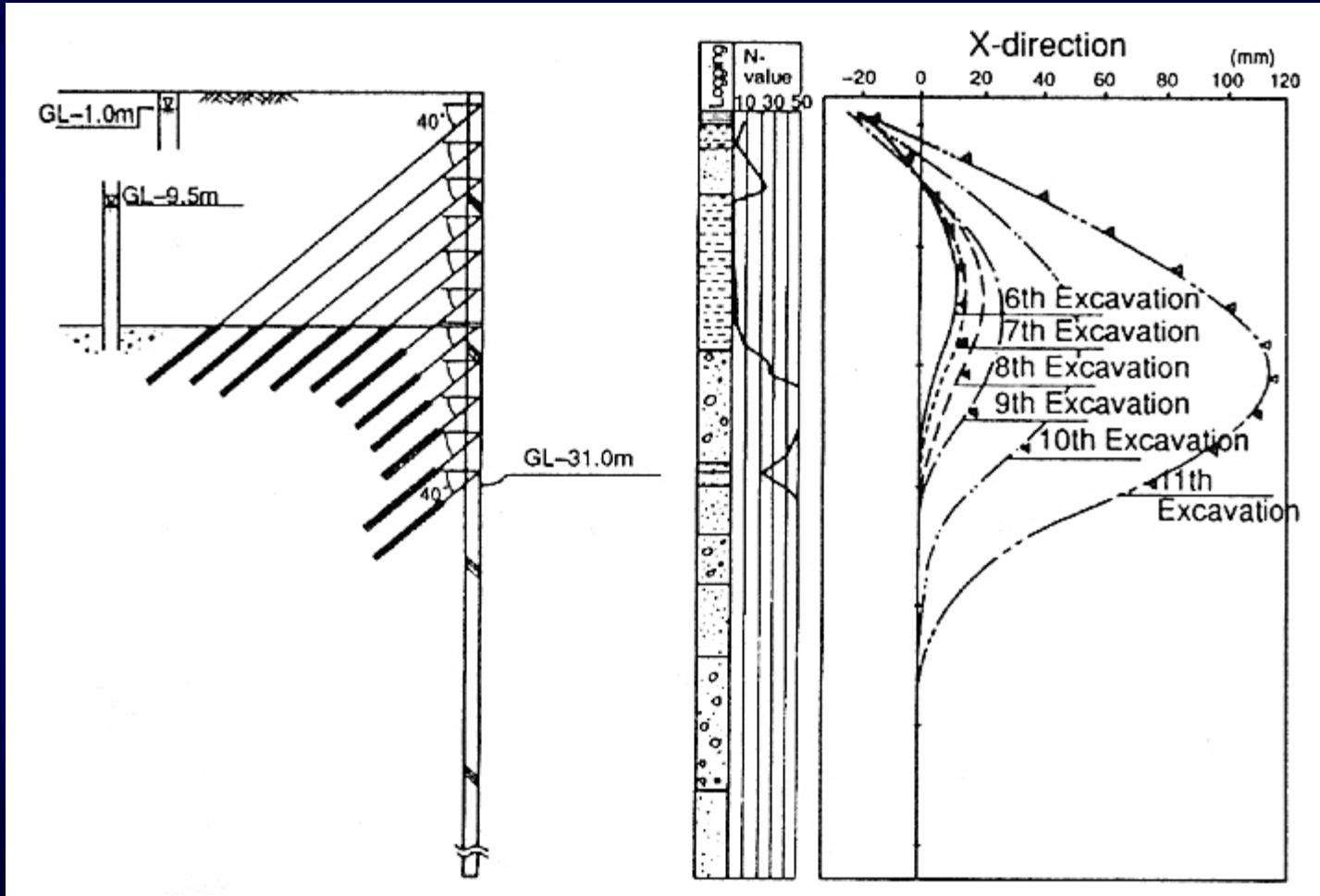
# Pomaci tijekom iskopa

Primjer izmjerenih pomaka- iskop pored stambene zgrade



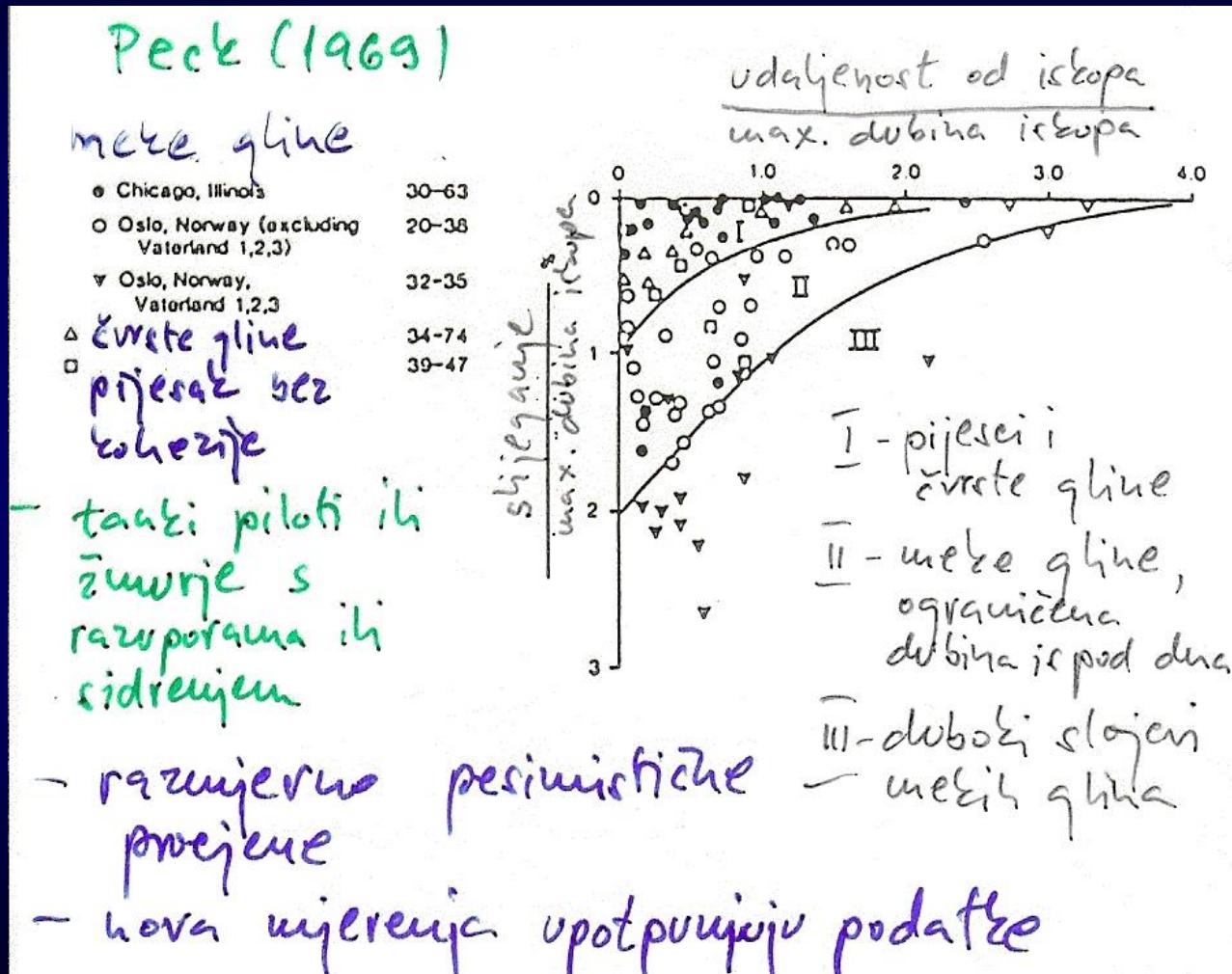
# Pomaci tijekom iskopa

## Primjer izmjerenih pomaka: duboka građevna jama



# Mjereni pomaci ukopanih stijena

Zbirni prikaz izmjereneih pomaka u iskopima

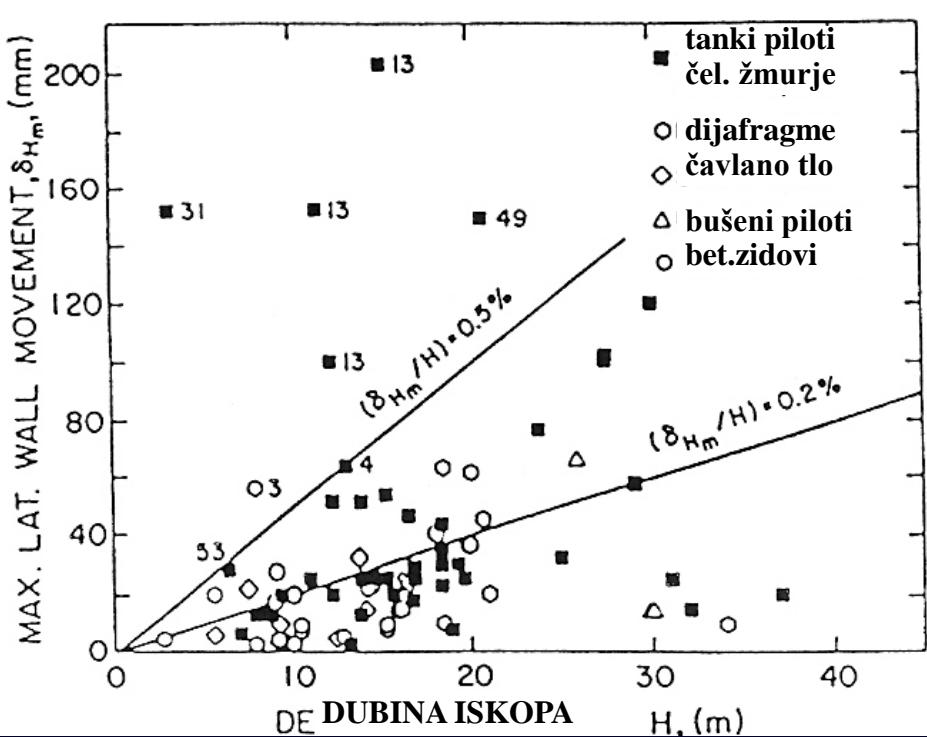


# Mjereni pomaci ukopanih stijena

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

Tlo: čvrste gline i pijesci

Maksimalni izmjereni horizontalni pomaci (mm)



Maksimalna izmjerena slijeganja (mm)

