

**INŽENJERSKA KOMORA CRNE GORE**

**MEĐUNARODNA KONFERENCIJA**

# **SEIZMIČKI RIZIK U CRNOJ GORI DANAS**

**GEOTEHNIČKI ASPEKT SEIZMIČKOG PROJEKTOVANJA**

**Autori:**

**Prof. dr Zvonko Tomanović, dipl.inž.građ.**

**MSc Borko Miladinović, spec.sci.građ.**

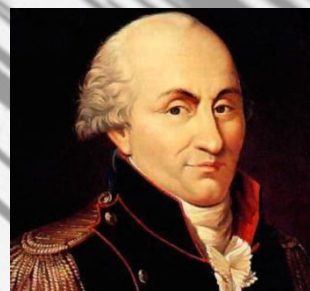
**Podgorica, mart 2023. godine**

# GEOTEHNIKA – GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

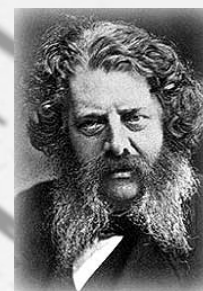
- Opšta nauka o problemima projektovanja i građenja na tlu ili stijeni.
- Težnja da se problemi fundiranja i geotehnike riješe iskustveno seže u daleku prošlost.
- Zemljana brana "Anaratraja Saragam" u indijskoj provinciji Madras sagrađena oko 1383. god.
- Krivi toranj u Pizi građen od 1173. do 1301. godine – više neuspješnih pokušaja sanacije.

## Mlada tehnička nauka – koja je počela da se razvija sredinom XIX vijeka

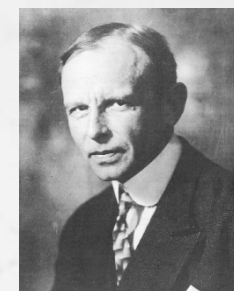
- Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806),
- William J.M. Rankine (1820-1872),
- Karl von Terzaghi (1883-1963),
- Alec W. Skempton (1914-2001),



*Coulomb*



*Rankine*



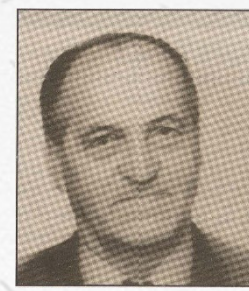
*Terzaghi*

## Početak razvoja Geotehnike na prostorima bivše Jugoslavije – nakon I svijetskog rata

- Ervin Nonveiller (1910-1999),
- Lujo Šuklje (1910-1997),
- Čedomir Vujičić (1923-2010),
- Petar Anagnosti (1934 - ),
- Milan M. Maksimović (1941-2014),



*Nonveiller*



*Vujičić*



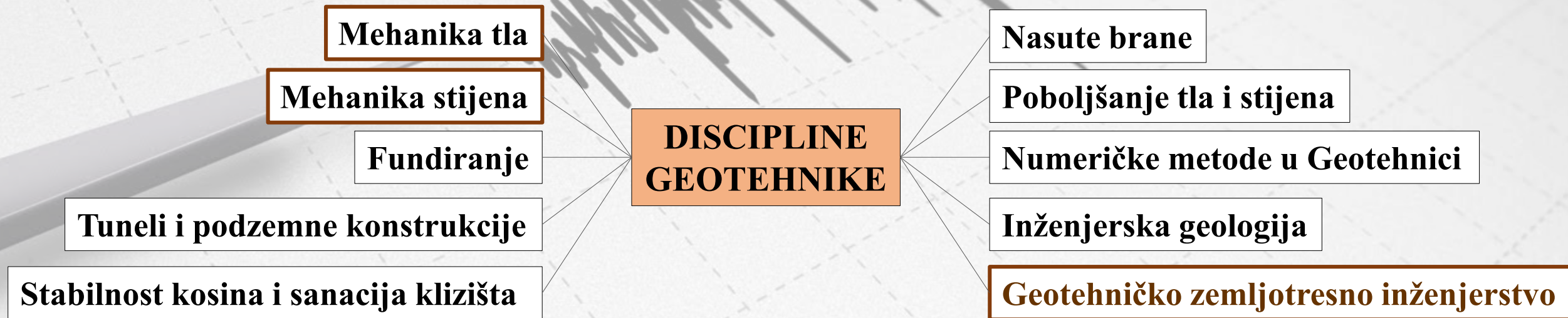
*Anagnosti*



*Maksimović*

# PREKRETNICE U RAZVOJU GEOTEHNIČKOG INŽENJERSTVA

- **Pronalazak parne mašine** nakon kojeg nastupa period intezivne gradnje željeznica, mostova i tunela, kao i proizvodnja **kvalitetnog čelika, cementa i eksploziva** – **prva polovina XIX vijeka**;
- **Veliki napredak u prirodnim naukama**, prevashodno mehanici kontinuuma, koji dovodi do prvih teorijskih rješenja pojedinih problema Geotehnike, a **osnivanje ustanova (visokih škola)** za osposobljavanje inženjera za rad u građevinarstvu – **druga polovina XIX vijeka**;
- **Formiranje nacionalnih i internacionalnih geotehničkih udruženja** – **sredina XX vijeka**;
- **Razvoj računarske tehnologije i specijalizovanih softvera** – **druga polovina XX vijeka**.



# GEOTEHNIČKO ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO

- **Disciplina o ponašanju tla, geotehničkih konstrukcija i temeljnih konstrukcija objekata tokom dejstva zemljotresa. Analiza interakcije temeljnog tla i konstrukcije tokom dejstva zemljotresa.**
- **GZI je najmlađa disciplina Geotehnike – sredina XX vijeka.**
- **Dešavanja tokom razornih zemljotresa u Niigata-i (Japan) i na Aljasci 1964. godine, kao i izgradnja sve većeg broja nuklearnih elektrana – prekretnice u razvoju GZI.**
- **Harry B. Seed (1922-1989), Kenji Ishihara (1934-20??), Izzat M. Idriss (1935-), George Gazetas (1950-), Steven L. Kramer (1952-), Ross W. Boulanger (1965-), Boris Jeremić (1964-).**

**Dinamičke karakteristike tla**

**Propagacija seizmičkih talasa kroz tlo**

**Analiza seizmičkog hazarda**

**Seizmički odgovor tla – uticaj lokalnih geotehničkih uslova**

**Likvefakcija**

**GEOTEHNIČKO  
ZEMLJOTRESNO  
INŽENJERSTVO**

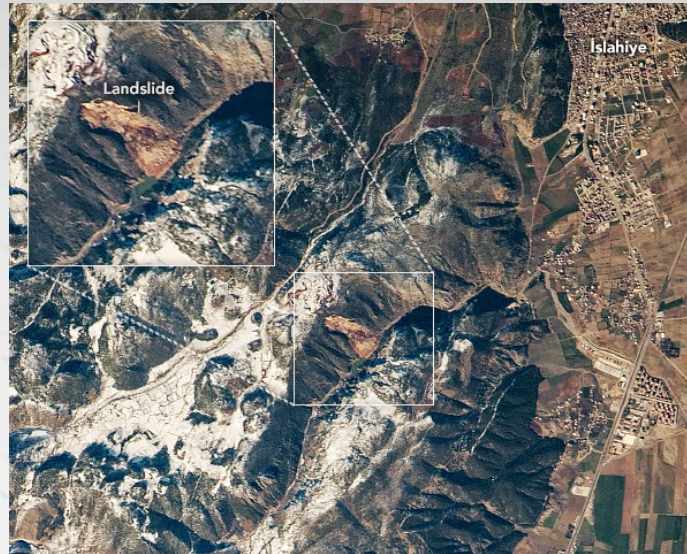
**Seizmička otpornost temelja objekata**

**Stabilnost kosina pri dejstvu zemljotresa**

**Seizmička otpornost geotehničkih konstru.  
(potporni zidovi, nasute brane, tuneli itd.)**

**Seizmička interakcija tla i konstrukcije**

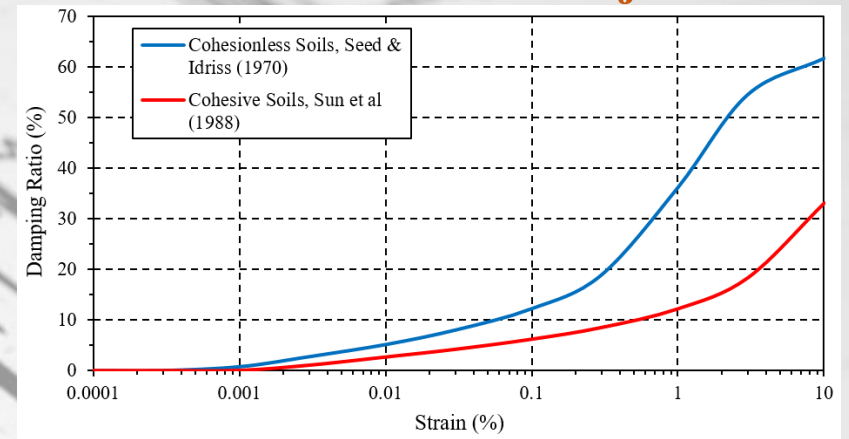
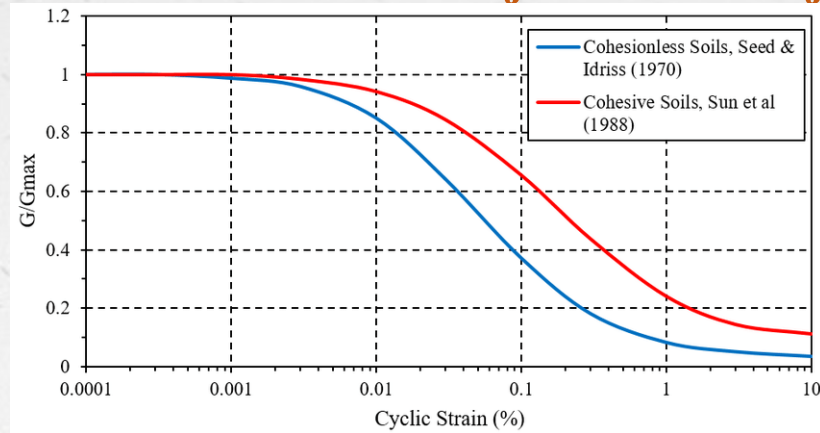
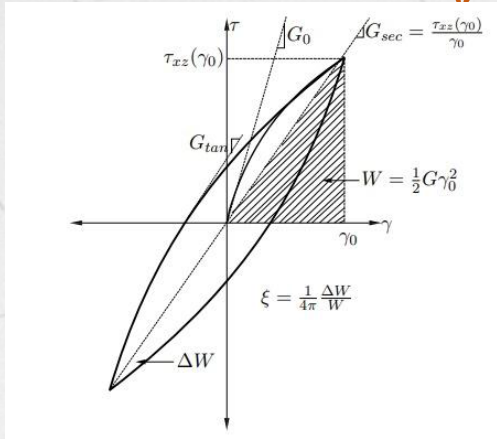
**Seizmička otpornost "lifeline" konstrukcija  
(putevi, željeznice, vodovodi, gasovodi itd.)**



Zemljotres u Turskoj i Siriji, 06.02.2023. god.

# DINAMIČKE KARAKTERISTIKE TLA

- Brzina prostiranja smičućih seizmičkih talasa, krutost (modul klizanja), prigušenje odnosno relativno prigušenje i smičuća čvrstoća pri dinamičkom opterećenju.
- Dinamičke karakteristike tla zavise od nivoa ostvarenih (generisanih) smičućih deformacija u tlu.
- Male deformacije  $\leq 10E-5$        $10E-5 < \text{Srednje deformacije} < 10E-3$       Velike deformacije  $\geq 10E-3$



## Domen malih deformacija

### Terenske metode

Metoda seizmičke refleksije

Metoda seizmičke refrakcije

Seizmička cross-hole i down-hole metoda

### Laboratorijske metode

Metoda rezonantnog stuba

Metoda sa piezoelektričnim bender elementom

## Domen srednjih i velikih deformacija

### Terenske metode

Penetracioni testovi SPT i CPT

Test pljosnatim dilatometrom

Test presiometrom

### Laboratorijske metode

Test ciklične triakcijalne komp.

Test cikličnog direktnog smicanja

Test ciklične torzije

# ANALIZA SEIZMIČKOG HAZARDA

- Kvantitativna procjena seizmičkog hazarda određene lokacije (područja) – kvantitativna procjena parametara oscilovanja tla (prevashodno PGA-max hor. ubrzanje) na toj lokaciji (području).
- Cilj analize seizmičkog hazarda – definisanje ulaznih podataka tj. "podloga" za seizmičko projektovanje objekata na određenoj lokaciji (području, regionu) – karte seizmičkog hazarda.
- Analizi seizmičkog hazarda prethodi identifikacija i karakterizacija (geometrija i maksimalna moguća magnituda) svih mogućih izvora seizmičke aktivnosti na određenom području.

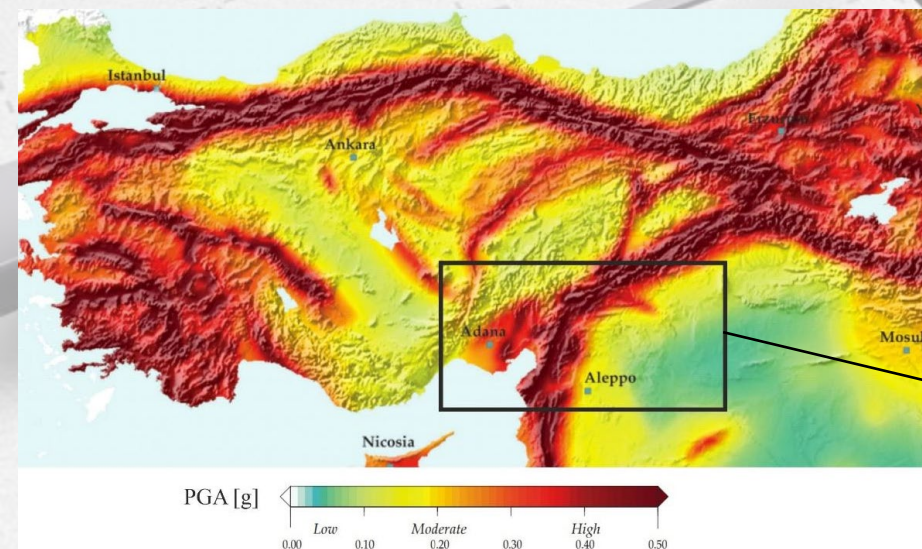
## Analiza seizmičkog hazarda

### Deterministička analiza (DSHA)

- Konkretni seizmički događaj
- Određivanje "najgoreg slučaja" seizmičke pobude

### Probabilistička analiza

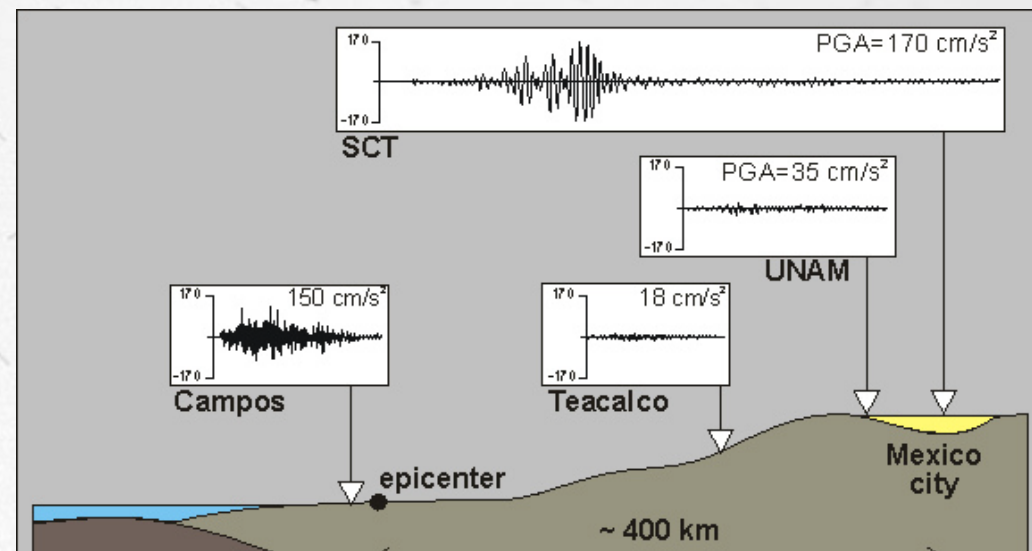
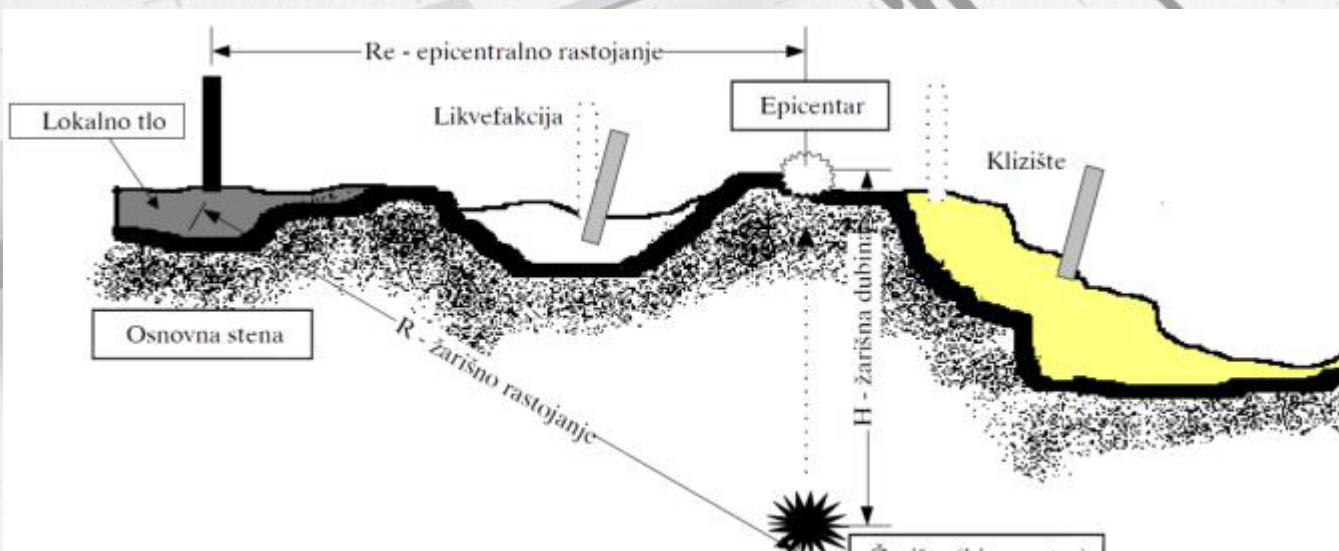
- Primjena teorije vjerovatnoće
- Uzimaju se u obzir neodređenosti prisutne prilikom određivanja jačine, mjesta i učestanosti pojavljivanja zemljotresa



Područje u Turskoj pogođeno razornim zemljotresom  
06.02.2023. godine

# SEIZMIČKI ODGOVOR TLA – UTICAJ LOKALNIH GEOTEHNIČKIH USLOVA

- Karakteristike depozita tla iznad osnovne stijene debljine "svega" nekoliko desetina metara može imati presudan uticaj na karakteristike (intezitet) seizmičke pobude kojoj su objekti izloženi.
- Uticaj prepoznat od strane seizmičkih pravilnika – kategorije temeljnog tla – spektri odgovora.
- Čvrstoća, krutost, prigušenje i vrijednost sopstvene periode oscilovanja depozita tla.
- Amplifikacija seizmičkog ubrzanja (npr. zemljotres u Meksiko City-ju 1985. godine).
- Gubitak nosivosti ili krutosti temeljnog tla – likvefakcija (npr. zemljotres u Niigata-i 1964. godine).
- Seizmička mikrojejonizacija Crne Gore iz 1981. godine – izračunate vrijednosti DAF-a (dinamički faktor amplifikacije) za mnoge lokacije iz uglavnom urbanih područja Crne Gore i prepoznate lokacije moguće pojave likvefakcije tokom zemljotresa.





# SEIZMIČKI ODGOVOR TLA – UTICAJ LOKALNIH GEOTEHNIČKIH USLOVA

## Analiza seizmičkog odgovora tla

### Linearna analiza

- Krutost i prigušenje konstantni
- Linearna veza napona i deformacija

### Ekvivalentna linearna analiza

- Iterativno određene vrijednosti  $G$  i  $\xi$  na osnovu zadatih  $G/G_{max-g}$  i  $\xi-g$  krivih ( $\xi$  relativno prigušenje)
- Linearna veza napona i deformacija

### Nelinearna analiza

- Nelinearni materijalni model tla
- Nelinearna veza napona i deformacija

Tlo tipa B (EC8)

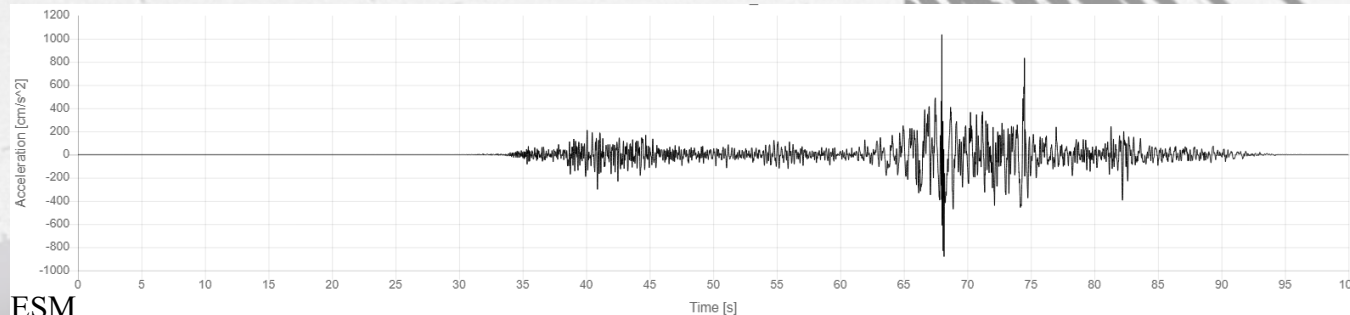
$V_s=555\text{m/s}$

$R=36.7\text{km}$

”Free-field” zapis

Top. klasa T1

**PGA=1.05g**



Zemljotres Turskoj i  
Siriji 06.02.2023. god.

**PGA=0.16g**

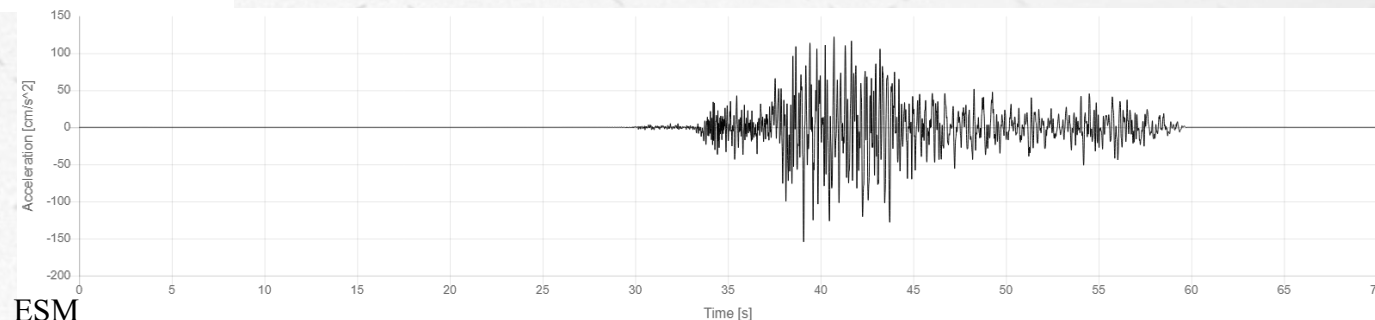
Tlo tipa B (EC8)

$V_s=523\text{m/s}$

$R=39.1\text{km}$

”Free-field” zapis

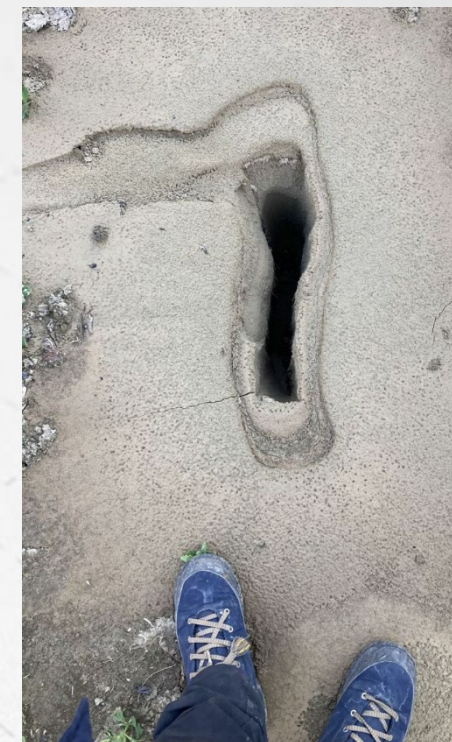
Top. klasa T1



Da li seizmički pravilnici uzimaju sve  
relevantne uticaje u obzir?

# LIKVEFAKCIJA

- Geolozi pod likvefakcijom podrazumijevaju sve načine manifestovanja prekomjernog povećanja pornih pritisaka u zasićenom tlu koje je izazvano seizmičkim vibracijama tla.
- Građevinski inženjeri pod likvefakcijom podrazumijevaju potpuni gubitak čvrstoće i krutosti zasećenog uglavnom pijeskovitog tla usljed povećanja pornih pritisaka i smanjenja efektivnih napona, te njegov prelazak iz čvrstog u gusto tečno stanje tokom zemljotresa.
- Procjena osjetljivosti tla na pojavu likvefakcije
- Fundiranje objekata na tlu koje je sklono likvefakciji.

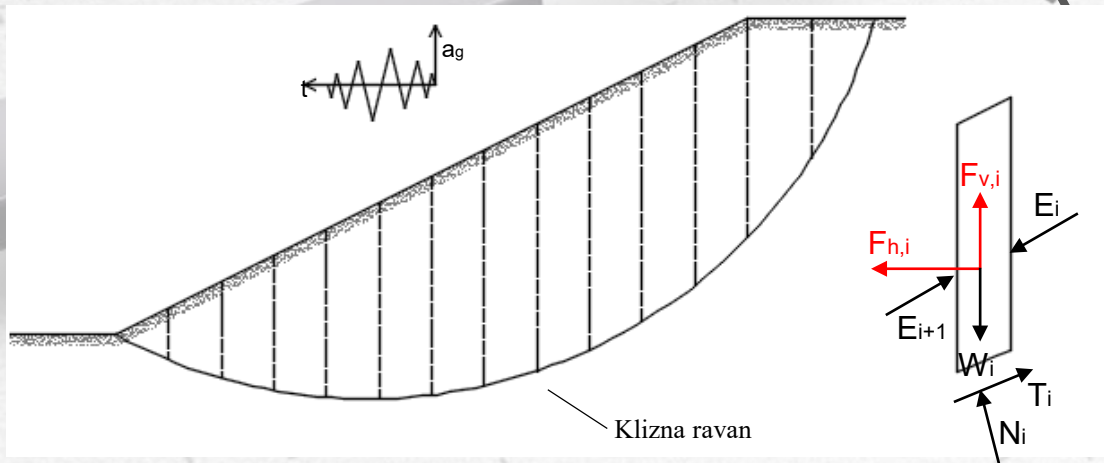


Zemljotres u Turskoj i Siriji, 06.02.2023. god.

# STABILNOST KOSINA PRI DEJSTVU ZEMLJOTRESA

- U XX vijeku tokom dejstva zemljotresa odnosno od posljedica dejstva zemljotresa preminulo je oko 1.5 miliona ljudi. Oko 6% je stradalo usljed pojave klizišta tokom tih zemljotresa.
- Kod pojedinih zemljotresa glavni uzrok velikih materijalnih gubitaka su bila klizišta koja su se desila tokom tih zemljotresa (npr. Aljaska, 1964).

## Analize stabilnosti kosina pri dejstvu seizmičkog opterećenja



## Analize inercijalne stabilnosti kosina

- Smičuća čvrstoća konstantna tokom dejstva zemljotresa
- Metoda granične ravnoteže (metoda lamela)
- Klasična pseudostatička seizmička analiza
- Newmark-ova pseudostatička analiza
- Naponsko-deformacijske analize (primjenom numeričkih metoda)

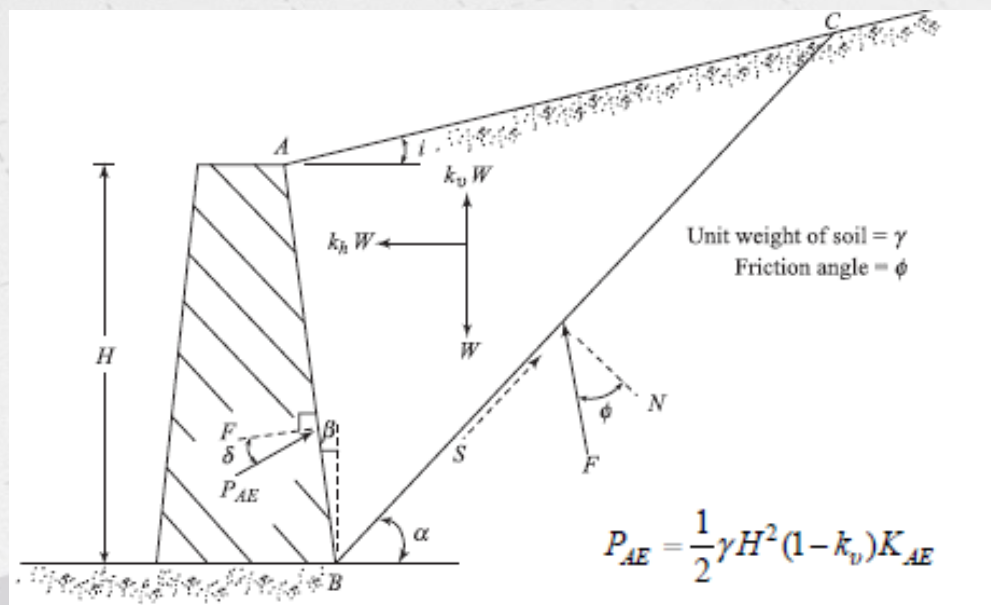
## Analize stabilnosti kosina sa omakšanjem tla

- Likvefakcija odnosno smanjenje smičuća čvrstoća tla tokom potresa
- Analize za slučaj fluidne likvefakcije (velika permanentna bočna pomjeranja kosine)
- Analize za slučaj ciklične likvefakcije (veća bočna pomjeranja kosine na "mahove" odnosno "pulseve").

# SEIZMIČKO PROJEKTOVANJE POTPORNIH ZIDOVA

- Primjena pseudostatičkih seizmičkih analiza.
- Procijena vrijednosti bočnih pritisaka tla na zid pri dejstvu seizmičkog opterećenja.
- Mononobe-Okabe-ova metoda aktivnih seizmičkih pritisaka za nekoherentna i koherentna tla.

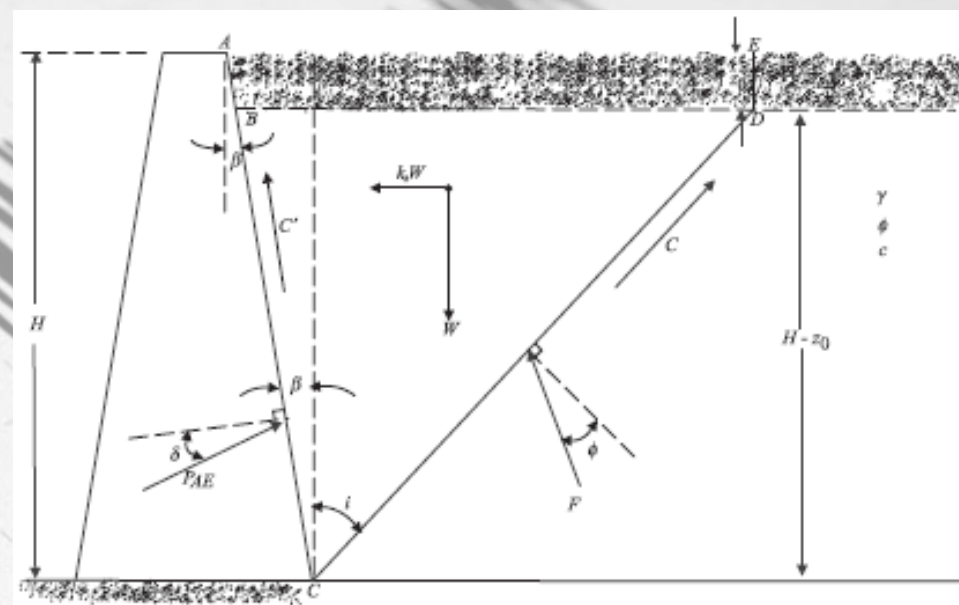
## Nekoherentno tlo



$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{k_h}{1 - k_v} \right)$$

## Koherentno tlo



$$z_0 = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}}$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$P_{AE} = \gamma (H - z_0)^2 N'_{ay} - c (H - z_0) N'_{ac}$$

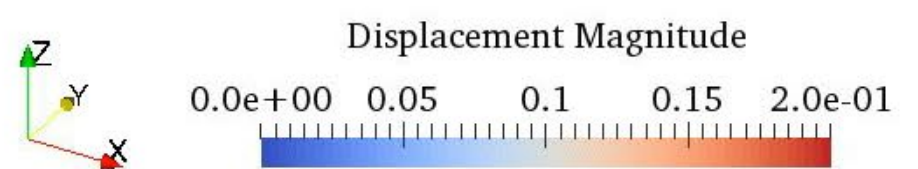
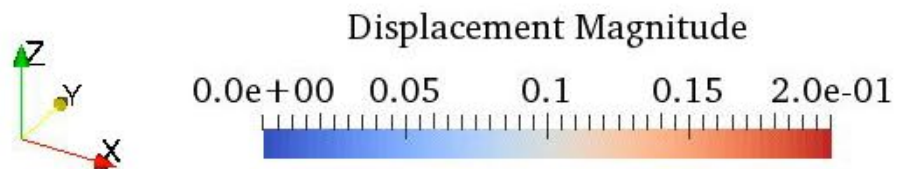
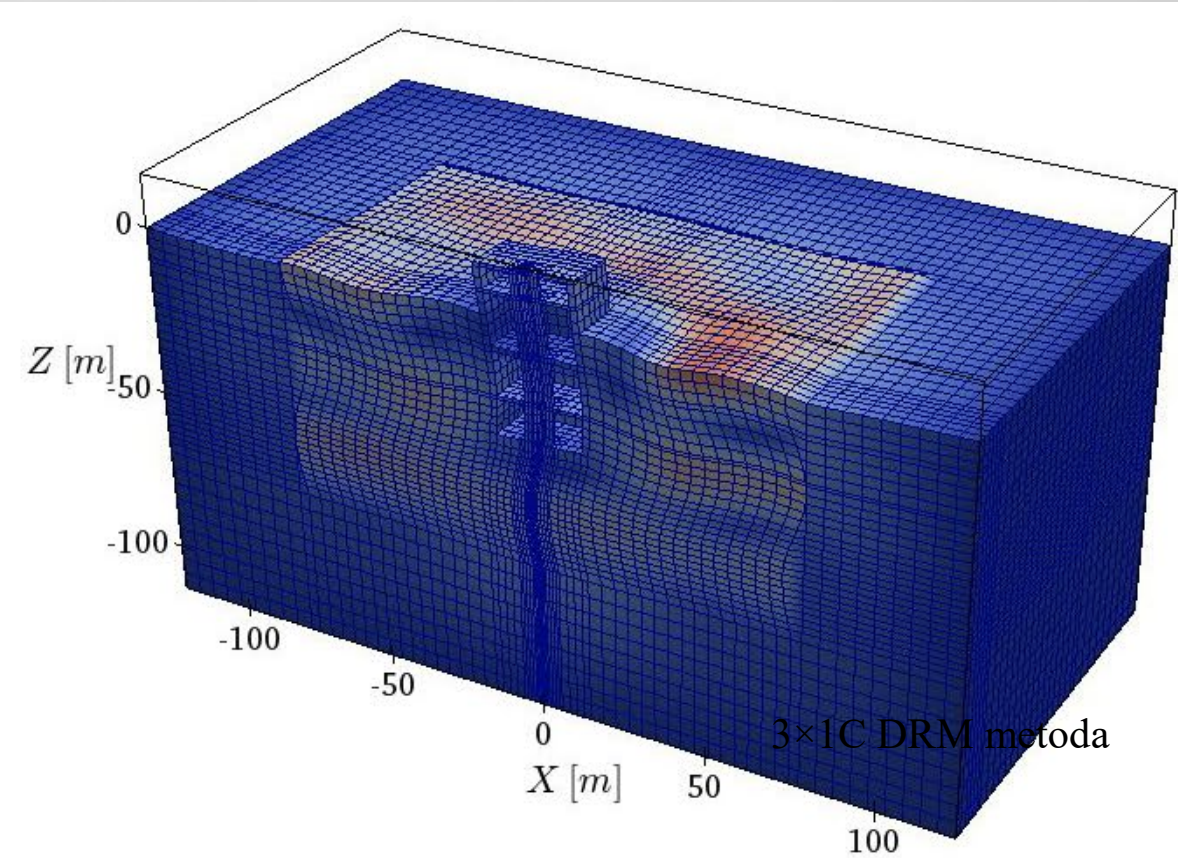
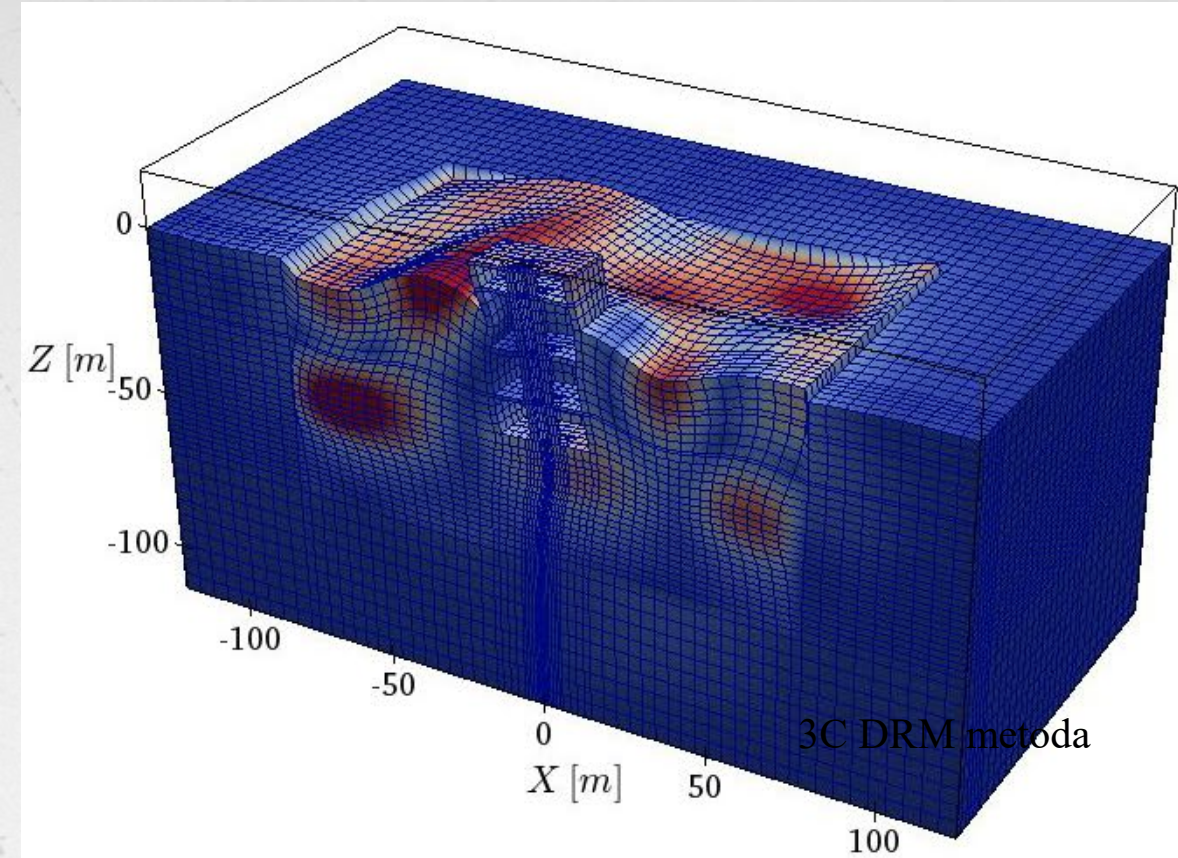
$$N'_{ac} = \frac{\cos \eta' \sec \beta + \cos \phi' \sec i}{\sin(\eta' + \delta)}$$

$$N'_{ay} = \frac{[(n + 0.5)(\tan \beta + \tan i) + n^2 \tan \beta] [\cos(i + \phi) + k_h \sin(i + \phi)]}{\sin(\eta' + \delta)}$$

$$\eta' = \beta + i + \phi$$

$$n = \frac{z_0}{H - z_0}$$

# INTERAKCIJA TLA I KONSTRUKCIJE

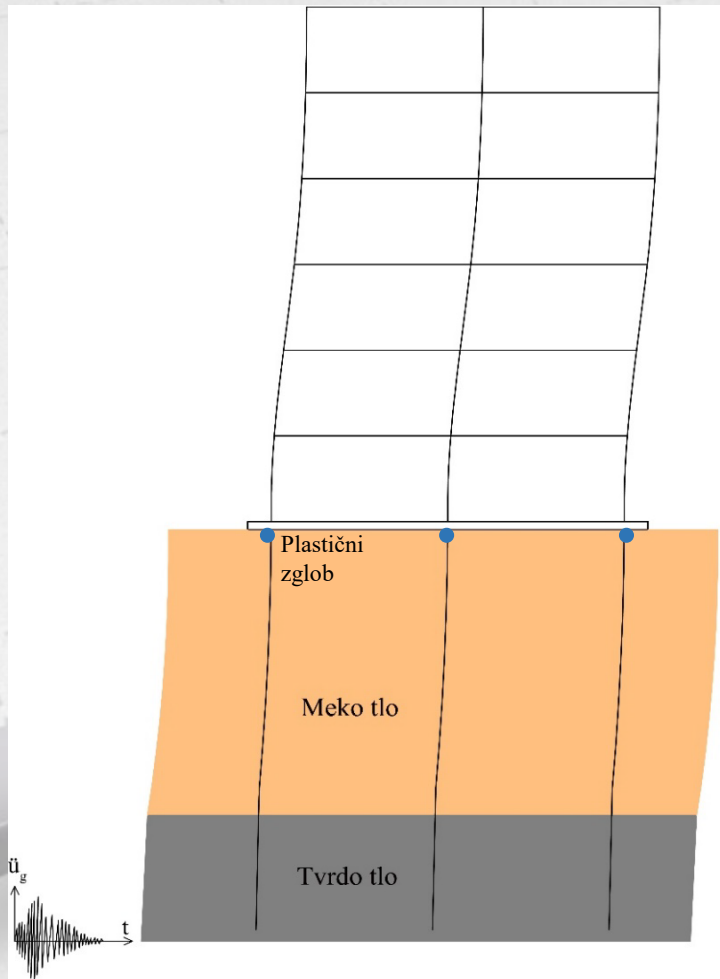


Jeremić et al. (2020)

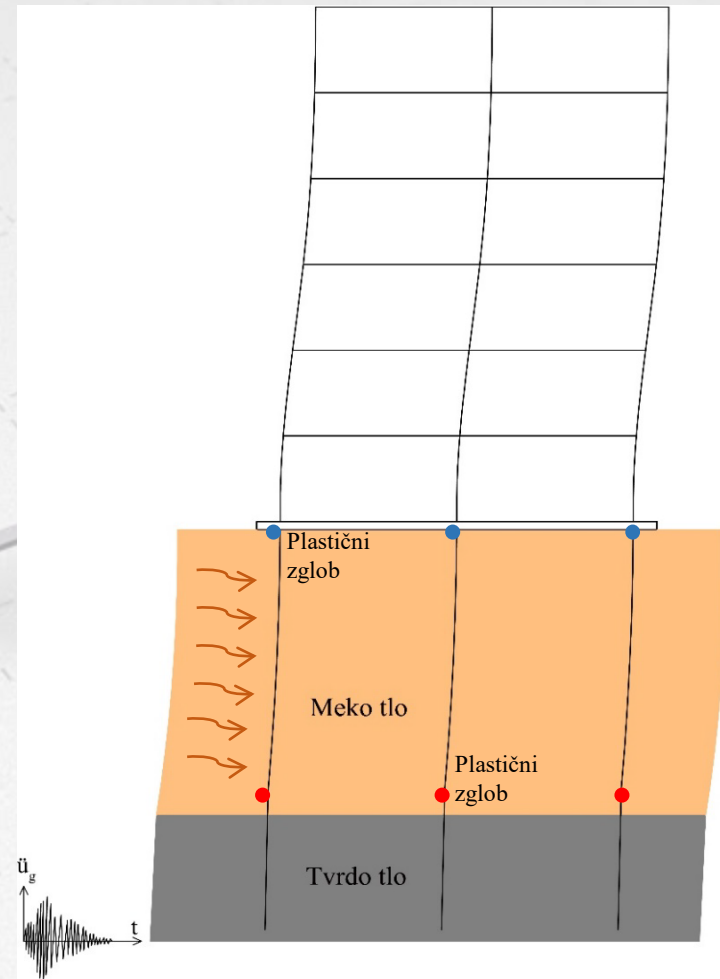
**DRM-METOD REDUKCIJE DOMENA**

# SEIZMIČKA OTPORNOST TEMELJA NA ŠIPOVIMA

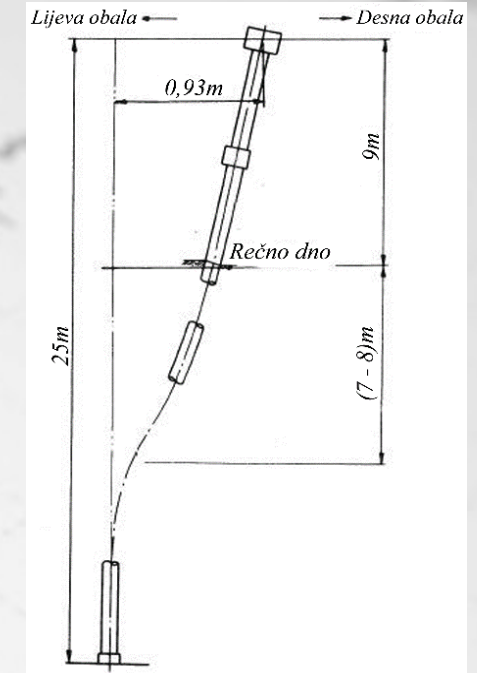
- Idealan, teško ostvarljiv i suviše rigorozan scenario – pri dejstvu snažnih zemljotresa šipovi se ponašaju linearno-elastično.



**Povoljan (dopušten) seizmički odgovor temelja na šipovima**



**Nepovoljan seizmički odgovor temelja na šipovima**



# SEIZMO-GEOTEHNIČKI ASPEKTI PROSTORNOG PLANIRANJA

- PROSTORNIM PLANOM CRNE GORE MORAJU SE MAPIRATI ZONE IZRAŽENOG SEIZMO-GEOTEHNIČKOG HAZARDA I PREMA TIM ZONAMA SE ODGOVORNO ODREDITI SA ASPEKTA GRAĐENJA OBJEKATA.
- ODGOVORNO SE ODREDITI – IMATI SENZIBILITETA ZA POTREBE DRUŠTVA U CIJELINI, ALI NE PRAVITI NAUČNO I STRUČNO NEUTEMELJENE KOMPROMISE KADA JE SEIZMIČKI RIZIK U PITANJU.
- OČUVANJE ŽIVOTA LJUDI – PRVI I OSNOVNI PRIORITET.
- IZRADI PROSTORNOG PLANA MORA PRETHODITI IZRADA KARTA (MAPA) POTENCIJALNIH KLIZIŠTA I ODRONA U CRNOJ GORI PREVASHODNO U URBANIM ZONAMA I DUŽ PRIORITETNIH SAOBRAĆAJNICA.
- PROSTORNI PLAN CRNE GORE MORA "PREPOZNATI" ZONE I PODRUČJA , GDJE SU GEOLOŠKI USLOVI TLA SA ASPEKTA SEIZMIČKOG RIZIKA NEPOVOLJNI (MEKA TLA SKLONA SLIJEGANJU, TLA SKLONA LIKVEFAKCIJI).

A 3D rendered scene featuring a pen nib in the lower-left foreground, positioned as if it has just finished drawing a line. The line is drawn on a light gray background with a faint, dashed grid pattern. The line itself is composed of multiple overlapping, slightly jagged strokes, giving it a hand-drawn or digital brushstroke appearance. The line starts near the pen nib and extends diagonally towards the upper-right corner of the frame. The lighting is soft and even, creating subtle shadows and highlights on the pen nib and the grid lines.

**HVALA NA PAŽNJI**



**INŽENJERSKA KOMORA CRNE GORE**

**MEĐUNARODNA KONFERENCIJA**

# **SEIZMIČKI RIZIK U CRNOJ GORI DANAS**

**GEOTEHNIČKI ASPEKT SEIZMIČKOG PROJEKTOVANJA**

**Autori:**

**Prof. dr Zvonko Tomanović, dipl.inž.građ.**

**MSc Borko Miladinović, spec.sci.građ.**

**Podgorica, mart 2023. godine**