

# Eurokod 8: seizmički dizajn u geoinženjerstvu okoliša

---

Vrček, Dorotea

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:934928>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Dorotea Vrček

**EUROKOD 8: seizmički dizajn u  
geoinženjerstvu okoliša**

DIPLOMSKI RAD

Varaždin, rujan 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 20. 09. 2021. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 06. 09. 2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Saufja Karač

#### Članovi povjerenstva

- 1) Doc. dr. sc. Miro Gvardek
- 2) izr. prof. dr. sc. Krešo Ivandić
- 3) izr. prof. dr. sc. Boris Kurur

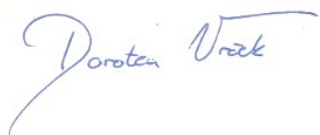
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**EUROKOD 8: seizmički dizajn u  
geoinženjerstvu okoliša**

Ime i prezime

Dorotea Vrčec

A handwritten signature in blue ink that reads "Dorotea Vrčec". The signature is written in a cursive style with a large initial 'D'.

Mentor

Doc.dr.sc. Mario Gazdek

Varaždin, rujan 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: DOROTEA VRČEK  
Matični broj: 283 - 2019./2020.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

EUROKOD 8: SEIZMIČKI DIZAJN U GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Potres  
3. Seizmički hazardi  
4. Seizmički dizajn  
5. Eurokod  
6. Eurokod 8  
7. Zaključak

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 08.03.2021.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:

*M. Gazdek*

Doc.dr.sc. Mario Gazdek



Predsjednik Odbora za nastavu:

*S. Kovač*

Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### **EUROKOD 8: SEIZMIČKI DIZAJN U GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA**

---

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **Doc.dr.sc. Mario Gazdek**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 30.8.2021

DOROTEA VRČEK

(Ime i prezime)

*Vrček Dorotea*

(Vlastoručni potpis)

## IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

EUROKOD 8: SEIZMIČKI DIZAJN U GEOINŽENJERSTVU OKOLIŠA

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 30. 8. 2021.

Doc. dr. sc. MARIO GAZDEK  
(Mentor)

M. Gazdek

(Vlastoručni potpis)

## ZAHVALA

---

*Zahvaljujem doc.dr.sc. Mariu Gazdeku na mentorstvu, podršci i velikom razumijevanju tokom izrade ovog diplomskog rada te uloženom trudu tokom cijelog mog studiranja.*

*Također veliko hvala svim profesorima na uloženom trudu i želji za prenošenjem znanja.*

*Hvala svim kolegama i kolegicama, prijateljima i prijateljicama koji su uljepšali i olakšali tijek mog studiranja te ga učinili ljepšim.*

*Hvala svim kolegama i kolegicama iz poduzeća „Pipo Perutnina Ptuj“ na podršci, gdje sam tokom studiranja radila preko student servisa.*

*Ponajviše se zahvaljujem svojoj obitelji i najboljem prijatelju na bezuvjetnoj podršci, motiviranju, razumijevanju i upućivanju na pravi put te na velikim odricanjima da bi mi olakšali studiranje.*

*Veliko HVALA svima!*



**SAŽETAK:** Eurokod 8: seizmički dizajn u geoinženjerstvu okoliša

**Ime i prezime:** Dorotea Vrčec

U ovome diplomskom radu se obrazlažu seizmičke aktivnosti i seizmička djelovanja prema Eurokodu 8, odnosno prema važećem nacionalnom dodatku HRN EN 1998-5/NA: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 5. dio: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja.

Sam rad obuhvaća načela seizmičkog projektiranja na relativno jasan i kratak način te ih povezuje sa odredbama Eurokoda 8. Pomno obrađuje temeljne pojmove vezane uz seizmičke aktivnosti, seizmičke hazarde (primjerice likvefakcija, slijeganje tla), tipove lokalnog tla, seizmičku analizu, utjecaj seizmičkih djelovanja na konstrukcije, projektiranje s obzirom na Eurokod 7 (HRN EN 1997): Geotehničko projektiranje, te na samome kraju obrađuje specifičnosti Eurokoda 8.

Eurokod 8 se temelji na svjetskom znanju i europskim iskustvima vezanim uz protupotresnu gradnju te je uz kombinaciju znanja i iskustva o seizmičkoj aktivnosti pojedine države, moguće do sigurne mjere zaštititi građevine i spriječiti ljudske i ekonomske gubitke prouzročene seizmičkim djelovanjima.

**KLJUČNE RIJEČI:** seizmička djelovanja, seizmički hazardi, seizmički dizajn, spektar odziva potresa, Eurokod 8

**SUMMARY:** Eurocode 8: seismic design in geoenvironmental engineering

**Name and surname:** Dorotea Vrček

This master thesis explains seismic activities to Eurocode 8, according to the valid national appendix HR EN 1988-5 / NA: Design of seismic resistance of structures - part 5: Foundations, supporting structures, and geotechnical questions.

The paper covers the principles of seismic design in a relatively clear and concise manner and connects them with the provisions of Eurocode 8. It also carefully deals with basic concepts related to seismic activities, seismic hazards, such as liquefaction, subsidence, local soil types, seismic analysis, the impact of seismic actions on structures design concerning Eurocode 7 HRN EN1977: Geotechnical design, and finally deals with the specifics of Eurocode 8.

Eurocode 8 is based on world knowledge and European experience related to earthquake construction, and with a combination of knowledge and experience on the seismic activity of each country, it is possible to safely protect buildings and prevent human and economic losses caused by seismic actions.

**KEYWORDS:** seismic actions, seismic hazards, seismic design, earthquake response spectrum, Eurocode 8

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. POTRES.....  | 3  |
| 2.1    Lociranje potresa i mjerenje potresa .....                         | 4  |
| 2.1.1. Lociranje potresa.....   | 4  |
| 2.1.2. Mjerenje potresa .....   | 5  |
| 2.2. Vrste seizmičkih valova.....   | 8  |
| 2.3. Seizmičnost.....   | 10 |
| 2.4. Lokalna svojstva tla .....   | 10 |
| 2.4.1. Lokalni utjecaji tla u rasjednim zonama .....                      | 11 |
| 2.4.2. Lokalni utjecaj geomedija kod postojanih pukotina i šupljina ..... | 12 |
| 2.4.3. Lokalni utjecaj tla s obzirom na topografiju.....                  | 12 |
| 2.5. Dinamička svojstva geomedija .....                                   | 13 |
| 3. SEIZMIČKI HAZARDI.....   | 16 |
| 3.1. Podrhtavanje tla .....   | 16 |
| 3.2. Izdizanje, spuštanje i rasjedanje.....                               | 17 |
| 3.3. Likvefakcija tla .....   | 18 |
| 3.4. Klizišta .....   | 21 |
| 3.5. Slijeganje .....   | 23 |
| 3.6. Strukturna oštećenja.....  | 24 |
| 4. SEIZMIČKI DIZAJN GRAĐEVINA .....                                       | 26 |
| 4.1. Spektar odziva potresa .....   | 26 |
| 4.1.1. Maksimalno ubrzanje geomedija (PGA) .....                          | 29 |
| 4.2. Dinamička svojstva građevina .....                                   | 31 |
| 4.2.1. Prirodni period .....  | 34 |
| 4.2.2. Modalni oblici građevine .....                                     | 36 |
| 4.2.3. Prigušenje.....  | 36 |
| 4.2.4. Duktilnost i nosivost građevine .....                              | 38 |
| 4.3. Ponašanje građevina tijekom seizmičkih aktivnosti .....              | 40 |
| 5. EUROKOD.....   | 42 |
| 5.1. Eurokod 7.....   | 43 |
| 5.1.1. Provjera dosezanja graničnih stanja.....                           | 45 |
| 5.1.2. Proračun prema Eurokodu 7 .....                                    | 47 |
| 6. EUROKOD 8.....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 6.2. Projektiranje protupotresne gradnje.....        | 50 |
| 6.3. Granična stanja prema Eurokodu 8.....           | 52 |
| 6.4. Vrste tla definirane Eurokodom 8.....           | 53 |
| 6.4.1. Brzina posmičnog vala $V_{s,30}$ .....        | 55 |
| 6.5. Elastični pojednostavljeni spektri .....        | 55 |
| 6.6. Projektni spektri.....                          | 55 |
| 6.6.1. Elastični projektni spektri .....             | 58 |
| 6.7. Seizmičke aktivnosti .....                      | 61 |
| 6.8. Primjena Eurokoda 8 u Republici Hrvatskoj ..... | 61 |
| 7. ZAKLJUČAK.....                                    | 65 |
| 8. LITERATURA.....                                   | 66 |
| 9. POPIS TABLICA.....                                | 70 |
| 10. POPIS SLIKA.....                                 | 71 |

# 1. UVOD

Potresi spadaju među najraširenije prirodne hazarde s enormnim posljedicama. Događaju se svakodnevno u rasjednim zonama te na krajevima litosfernih ploča. Kroz prošlost su bili među glavnim uzročnicima šteta u naseljenim područjima te su povećavali smrtnost stanovništva. Također, potresna djelovanja uvelike mogu promijeniti krajobraz i njegove vrijednosti.

Poznato je da se tokom potresa oslobađa velika količina uskladištene energije u oblicima potresnih valova koji mogu biti prostorni i površinski. Prostorni seizmički valovi se u principu šire iz žarišta, odnosno hipocentra potresa kroz samo tijelo Zemlje, dok se površinski valovi šire po samom rubu Zemljine kore i to na kontaktu tla, odnosno geomedija i zraka. Površinski valovi uzrokuju veće štete i njihovo se djelovanje na površini manifestira kao seizmički hazard. Na djelovanje potresa i njegovo širenje uvelike utječu lokalna svojstva tla, odnosno topografija i vrsta tla. Seizmički se valovi u principu sporije šire kroz nehomogeni i rastresiti geomedij.

Seizmički hazard spada u najraširenije i najznačajnije prirodne hazarde. Oni se manifestiraju u oblicima podrhtavanja tla, izmjene krajobraza (primjerice u obliku rasjedanja i izdizanja terena), pojave likvefakcije te strukturnih oštećenja, odnosno oštećenja objekata. Likvefakcija je zanimljiv i važan seizmički hazard, jer uzrokuje slijeganje tla i prevrtanje građevina. Oštećenja objekata manifestiraju se u obliku pukotina na građevinama te smanjenju konstrukcijske stabilnosti. U seizmičkih aktivnostima ponajviše stradaju građevine od opeke i to u siromašnijim područjima, odnosno državama, kao što je primjerice Haiti. U tim su područjima građevine napravljene od pretežito prirodnih materijala te ne sadrže armirani beton i čelik. Zapravo, oštećenja građevina su ta koja uzrokuju smrt i stradanje ljudi.

Radi očuvanja građevina i smanjenja njihovih negativnih utjecaja na ljudske živote, inženjeri proučavaju potresna djelovanja, njihove aspekte i posljedice. Pokušavaju računski opisati djelovanje potresa na konstrukcije i to u oblicima dinamičkih svojstava građevina i spektra odziva potresa. Ponajviše zagovaraju korištenje duktilnih materijala.

Radi očuvanja građevina, inženjeri su u Europskoj uniji radi projektiranja na osnovi svjetskih iskustava i opažanja, ustanovili program Eurokoda. U geoinženjerstvu okoliša najbitniji su Eurokod 7 i Eurokod 8. Eurokod 7 je u principu namijenjen projektiranju geotehničkih konstrukcija, a bazira se na pseudo-statičkim proračunima, dok je Eurokod 8 namijenjen projektiranju građevina tijekom seizmičkih djelovanja te se bazira na pseudo-dinamičkim uvjetima i proračunima. Tema ovog diplomskog rada je seizmički dizajn u geoinženjerstvu okoliša izveden iz Eurokoda 8, odnosno važnost razumijevanja seizmičkog djelovanja na tlo i stijene u kojima se izvode inženjerski zahvati.

## 2. POTRES

Potres (engl. earthquake) se najčešće definira kao iznenadna i kratkotrajna pojava podrhtavanja tla pod utjecajem naglog oslobađanja elastične energije u Zemljinoj unutrašnjosti. Uzrok tome su pomaci duž tektonskih ploča gdje se akumulira velik udio elastične energije radi povećanja posmičnih naprezanja. Poznato je da kada posmično naprezanje premaši posmičnu čvrstoću (primjerice, na krajevima tektonskih ploča), dolazi do stanja sloma stijenske mase, pri čemu se oslobađa enormna količina akumulirane elastične energije. Osim potresa tektonske geneze, postoje i potresi nastali vulkanskim erupcijama te inducirani potresi, odnosno potresi nastali antropogenim djelovanjima, kao što su primjerice prekomjerna eksploatacija mineralnih sirovina te miniranje. (Kramer, 1996.)

Oslobodena energija pri slomu stijenske mase u potresima tektonske geneze ovisi o mehaničkim svojstvima geomedija uzduž rasjeda. Uskladištena energija znatno je manja u duktilnom i slabom geomediju u odnosu na geomedij koji je kruti i čvrsti. Krući i čvršći geomedij ne može primiti značajnu plastičnu deformaciju bez sloma te radi toga u takvom geomediju dolazi do bržeg oslobađanja akumulirane energije u obliku seizmičkih valova, u odnosu na duktilan i slab geomedij (Kramer, 1996.).

Potresna djelovanja, širenje seizmičkih valova te njihov utjecaj na Zemljinoj površini proučava geofizička disciplina seizmologija (grč. seismos – potres; grč. logos – znanost). Seizmologija se uglavnom bavi problematikom nastanka, odnosno procesa koji izazivaju seizmičke aktivnosti, procesa koji se javljaju tokom potresnog djelovanja te posljedicama ili mogućim hazardima izazvanih potresima. Također se bavi i karakterizacijom potresa, lociranjem te mjerenjem intenziteta i magnitude potresa. Seizmologija kao geofizička disciplina se primjenjuje u građevini (protupotresno inženjerstvo), procjeni hazarda i rizika od potresa. (Hrvatska Enciklopedija)

## 2.1 Lociranje potresa i mjerenje potresa

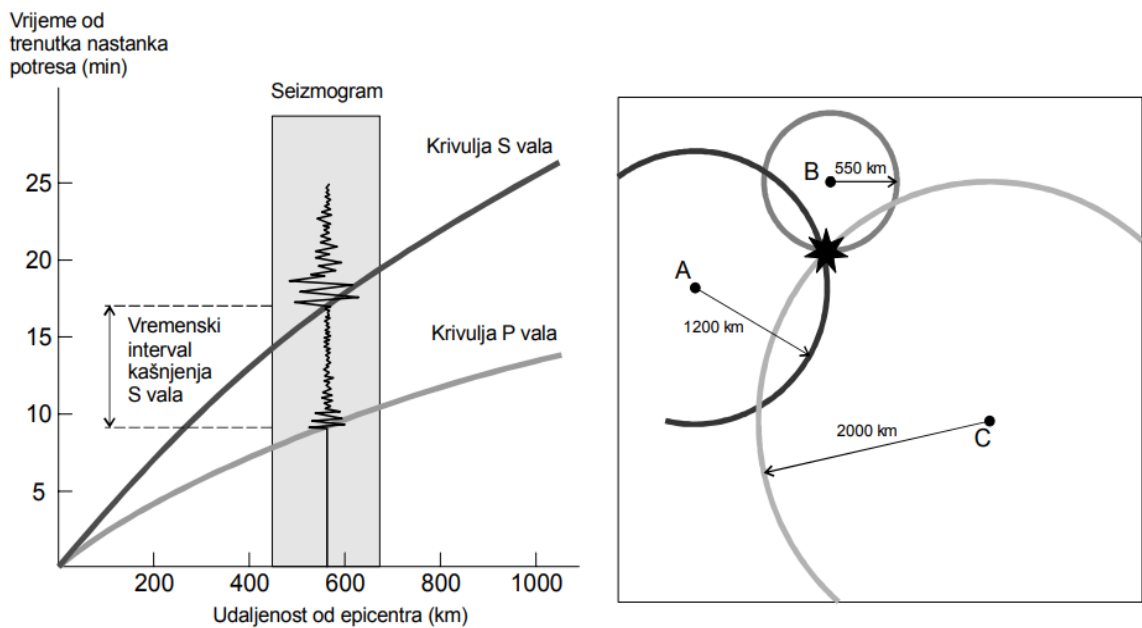
### 2.1.1. Lociranje potresa

Pretpostavlja se radijalno širenje seizmičkih valova poput koncentričnih kružnica od hipocentra do epicentra. Hipocentar se definira kao prostor u Zemljinoj unutrašnjosti u kojem nastaje fizičko-mehanički poremećaj geomedija (stijena) radi naglog oslobađanja elastične energije koja se širi u obliku prostornih mehaničkih valova. Uglavnom se nalazi na većim dubinama i do 700 km. Epicentar se definira kao projekcija žarišta (hipocentra) na Zemljinoj površini. Pomoću epicentra postoji mogućnost lociranja potresa čije se djelovanje registrira u seizmološkim stanicama. Lociranje potresa je najtočnije kada postoje podatci zabilježeni u tri seizmološke stanice i to pomoću triangulacije. (IRIS, 2007.)

Postupak lociranja epicentra potresa pomoću triangulacije (slika 1):

- I. mjeri se vrijeme potrebno da primarni i sekundarni valovi prođu neku udaljenost do pojedine seizmološke stanice,
- II. koristi se dijagram odnosa vremena i udaljenosti te se iz njega očita udaljenost od epicentra (za svaku vrstu vala posebno),
- III. na kraju se na topografskoj karti konstruiraju kružnice oko seizmoloških stanica: radijus kružnica predstavlja aproksimiranu udaljenost pojedine stanice od epicentra potresa, a sjecište predstavlja mjesto epicentra.





**Slika 1.** Lociranje potresa (PMF, geologija)

### 2.1.2. Mjerenje potresa

Potres se detektira pomoću seizmometra, odnosno uređaja za detektiranje gibanja tla i seizmičkih valova. Sam instrument radi na principu inertne mase koja je elastično i prigušeno ovješena u odnosu na kućište seizmografa, a bilježi se gibanje mase relativno prema kućištu kao posljedica gibanja tla. Uređaj koji zapisuje gibanje tla detektirano seizmometrom je seizmograf, a sam zapis seizmičkih valova naziva se seizmogramom (Hrvatska Enciklopedija).

Osim lociranja potresa, potrebno je kvantificirati jačinu potresa, odnosno magnitudu i intenzitet potresa:

#### A. magnituda potresa

Jakost potresa temelji se na magnitudi potresa, odnosno veličini koja je razmjerna energiji seizmičkih valova oslobođenih u hipocentru i jednaka je na svim seizmološkim postajama koje bilježe podatke o seizmičkim gibanjima. Magnituda potresa određuje se

Richterovom ljestvicom (Tablica 1) koja je logaritamska, što znači da svako povećanje jedinične vrijednosti na ljestvici odgovara povećanju amplitude seizmičkih valova od deset puta. Ljestvica je konstruirana prema kalkulaciji amplituda primarnih i sekundarnih seizmičkih valova registriranih na seizmografu (Lee S. J. i dr., 2011.).

**Tablica 1.** Richterova ljestvica magnituda potresa (Encyclopaedia Britannica, Richter Scale)

| <b>Razina</b> | <b>Richterove magnituda</b> | <b>Opis potresa</b> | <b>Šteta kao posljedica djelovanja potresa</b>                  |
|---------------|-----------------------------|---------------------|---|
| <b>1</b>      | > 1 – 2,9                   | Mikro               | Uglavnom se ne osjete, ali bilježe ih seizmografi.              |
| <b>2</b>      | 3,0 – 3,9                   | Manji               | Osjeti ih mnogo ljudi, ne uzrokuju štetu.                       |
| <b>3</b>      | 4,0 – 4,9                   | Lagani              | Osjete ih svi ljudi, a uzrokuju manje štete.                    |
| <b>4</b>      | 5,0 – 5,9                   | Umjereni            | Nastaje šteta na slabijim građevinama.                          |
| <b>5</b>      | 6,0 – 6,9                   | Jaki                | Umjerena šteta u naseljenim područjima.                         |
| <b>6</b>      | 7,0 – 7,9                   | Veliki              | Velika šteta na velikim područjima, uključuje i gubitak života. |
| <b>7</b>      | 8,0 >                       | Razarajući          | Ogromna šteta i znatan broj žrtava na velikim područjima.       |

#### B. Intenzitet potresa

Intenzitetom potresa opisana je veličina rušilačkih djelovanja na površini Zemlje, a određuje se prema seizmičkim ljestvicama. Najčešće se koristi Merkalijeva ljestvica (MCS ljestvica, odnosno Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica), čiji je raspon od 1 do 12 stupnjeva. Merkalijeva seizmička ljestvica (Tablica 2) je linearna i numerički izražava

intenzitet potresa te njegove posljedice. Intenzitet potresa varira s obzirom na udaljenost od epicentra (PMF, geofizika ).

**Tablica 2.** Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS) ljestvica intenziteta potresa (PMF, seizmološka služba, 2020.)

| Stupanj potresa | Naziv potresa       | Opis šteta kao mjera učinka potresa  |
|-----------------|---------------------|--|
| I               | Nezamjetljiv potres | Bilježe ga jedino seizmografi.   |
| II              | Vrlo lagan potres   | U višim katovima stambenih zgrada osjete ga vrlo senzibilni ljudi.   |
| II              | Lagan potres        | Podrhtavanje tla kao pri prolazu automobila. U unutrašnjosti zgrada osjeti ga više ljudi.  |
| IV              | Umjeren potres      | U zgradama ga osjeti više ljudi, a na otvorenome samo pojedinci. Budi neke spavače. Trese vrata i pokućstvo. Prozori, staklenina i posude zveče kao pri prolazu teških kamiona.              |
| V               | Prilično jak potres | Osjeti ga više ljudi na otvorenom prostoru. Budi spavače; pojedinci bježe iz kuća. Njišu se predmeti koji slobodno vise, zaustavljaju se ure njihalice.                                      |
| VI              | Jaki potres         | Ljudi bježe iz zgrada. Sa zidova padaju slike, ruše se predmeti, razbija se posuđe, pomiče ili prevrće pokućstvo. Zvone manja crkvena zvona. Lagano se oštećuju pojedine dobro građene kuće. |
| VII             | Vrlo jaki potres    | Crjepovi se lome i kližu s krova, ruše se dimnjaci. Oštećuje se pokućstvo u zgradama. Ruše se slabije građene zgrade, a na jačima nastaju oštećenja.   |
| VIII            | Razoran potres      | Znatno oštećuje do 25% zgrada. Pojedine se kuće ruše do temelja, a velik ih je broj neprikladan za stanovanje. U tlu nastaju pukotine, a na padinama klizišta.                               |

|     |                            |   |
|-----|----------------------------|---|
| IX  | Pustošan potres            | Oštećuje 50% zgrada. Mnoge se zgrade ruše, a većina ih je neupotrebljiva. U tlu se javljaju velike pukotine, a na padinama klizišta i odroni.   |
| X   | Uništavajući potres        | Teško oštećuje 75% zgrada. Velik broj dobro građenih kuća ruši se do temelja. Ruše se mostovi, pucaju brane, savijaju željezničke tračnice, oštećuju putevi. Pukotine u tlu široke su nekoliko decimetara. Urušavaju se špilje, pojavljuje se podzemna voda |
| XI  | Katastrofalan potres       | Gotovo sve zgrade ruše se do temelja. Iz širokih pukotina u tlu izbija podzemna voda noseći mulj i pijesak. Tlo se odronjava, stijene se otkidaju i ruše.   |
| XII | Velik katastrofalan potres | Sve što je izgrađeno ljudskom rukom ruši se do temelja. Reljef mijenja izgled, zatrpavaju se jezera, rijeke mijenjaju korito.   |

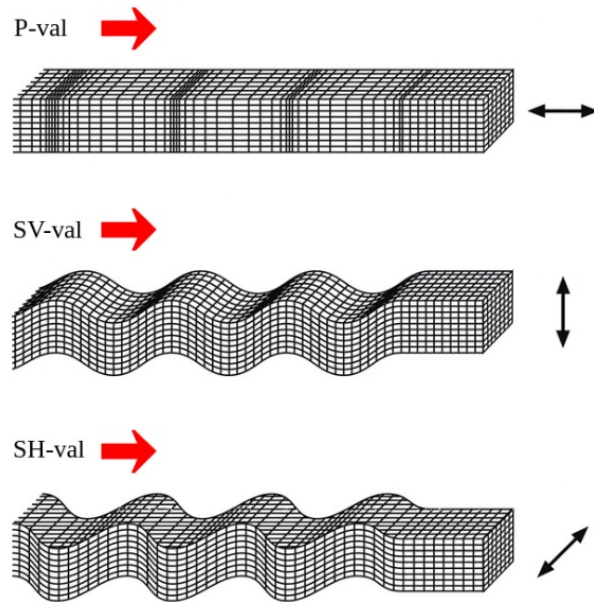
## 2.2. Vrste seizmičkih valova

Seizmički valovi nastaju na plohama loma geomedija te se dijele se na dvije osnovne skupine: prostorni i površinski valovi. Prostorni valovi se šire unutar Zemljine kore, dok se površinski šire po površini Zemljine kore. (PMF, geofizika)

Prostorni valovi se dijele na P valove i S valove. P valovi se još nazivaju primarnim, kompresijskim i longitudinalnim valovima. Ti valovi se prvi registriraju te uključuju uzastopno zbijanje i rastezanje materijala kroz koji prolaze pa izazivaju tlačna i vlačna naprezanja. Jedna „individualna čestica“ u P valu giba se paralelno smjeru širenja poremećaja (naprezanja ili deformacije), što se može poistovjetiti sa zvučnim valovima. S valovi nazivaju se i posmičnim, sekundarnim ili transverzalnim valovima. Širenjem kroz geomedij uzrokuju deformacije smicanja. Smjer gibanja „individualnih“ čestica u S valovima je okomit na smjer širenja. S valovi se dijele prema ravnini pomaka čestice pa se razlikuje SV val (gibanje u vertikalnoj ravnini) i SH val (gibanje u horizontalnoj ravnini).

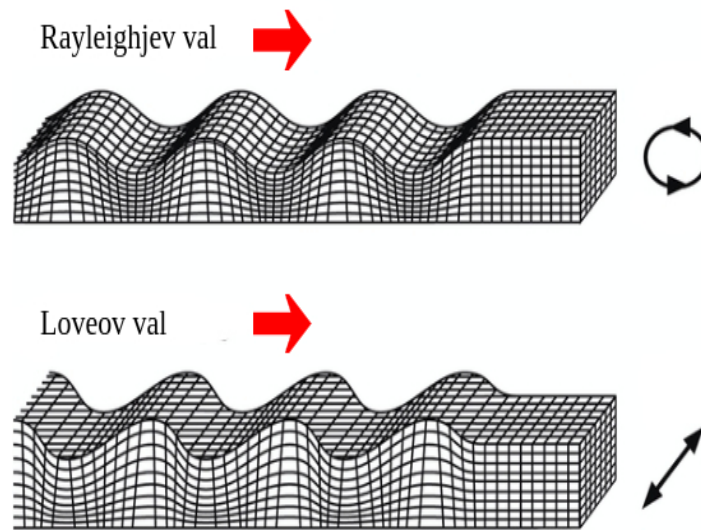
U zbijenim tlima, brzina seizmičkih valova je veća što su elastična svojstva pogodnija. (Kramer, 1996.)

Slika 2 prikazuje vrste prostornih valova te smjerove i ravnine širenja poremećaja.



**Slika 2.** Prostorni valovi (PMF, geofizika)

Osim prostornih valova postoje i površinski valovi. Oni su rezultat interakcije prostornih valova s površinom te površinskim slojevima. Šire se duž površine s amplitudama koje se smanjuju približno eksponencijalno s dubinom. Zbog prirode interakcije (geomedij - zrak) koja je potrebna za njihovo stvaranje, površinski valovi su istaknutiji na udaljenijim mjestima od izvora vala. Najbitniji površinski valovi su Rayleighovi (R valovi) i Loveovi (L valovi) valovi. Rayleighovi valovi nastaju interakcijom P valova i SV valova sa zemljinom korom u kojoj se javlja vertikalno i horizontalno gibanje čestica. Loveovi valovi su rezultat SH valova s mekim površinskim slojem, te nemaju vertikalnu komponentu čestičnog gibanja. Slika 3 prikazuje površinske valove. Ubrazanje seizmičkih valova mjeri se akcelometrom. Sam uređaj funkcionira prema definiciji II. Newtonovog zakona gibanja:  $\mathbf{a}=\mathbf{F}/\mathbf{m}$ , gdje je  $\mathbf{a}$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] akceleracija (ubrzanje),  $\mathbf{F}$  [N] sila, a  $\mathbf{m}$  [kg] masa. Akcelerogram pak predstavlja zapis akcelometra, kojim se dobiva niz podataka o svojstvima gibanja tla, iz čega je moguće konstruirati spektar odziva tla na potresno gibanje. (Kramer, 1996.)



**Slika 3.** Površinski valovi (PMF, geofizika)

### 2.3. Seizmičnost

Seizmička aktivnost nekog mjesta na kojem se ono istražuje, definira se kao seizmičnost te predstavlja važan parametar za procjenu potresnih djelovanja. Uglavnom se odnosi na frekventnost i repetaciju pojave potresa u nekom traženom razdoblju. Seizmička aktivnost obuhvaća magnitudu i intenzitet, odnosno parametre jakosti potresa na nekom području.

### 2.4. Lokalna svojstva tla

Seizmička djelovanja utječu na sve konstrukcije. Sam učinak potresnih djelovanja na konstrukcije bitan je za način projektiranja, posebno u područjima kojima prijeti opasnost od pojave potresa. Prema tome, opis lokalnih svojstava geomedija je nužan, jer lokalna svojstva tla i stijena značajno utječu na ponašanje konstrukcija pod potresnim opterećenjem. Istraživanja, odnosno ispitivanja lokalnog terena daju ključne informacije o

mogućnosti poboljšanja tla, što je potaklo razvoj i ugradnju akcelerometara (uređaj za zapisivanje brzine širenja seizmičkih valova). Velik utjecaj na širenje seizmičkih valova i njihovo djelovanje na temelj neke konstrukcije imaju postojanost diskontinuiteta u stijenskoj masi, uslojenost, stupanj trošnosti te reljef. (Kramer, 1996.)

Gibanje geomedija koje se odvija na površini terena moguće je opisati kao rezultat niza pojava, a to su mehanizam nastanka potresa (primjerice u rasjednim zonama, kod erupcije vulkana), širenje seizmičkih valova kroz čvrstu stijenu do granice s lokalnim tlom te dinamička svojstva tla. Većina promjena seizmičkih komponenti (amplituda, frekvencija i period) odvija se zbog utjecaja svojstava lokalnog tla. Opseg njihovog utjecaja ovisi o svojstvima i geometriji geomedija te topografiji (Kramer, 1996.). Također, do samih promjena seizmičkih komponenti dolazi i kod širenja seizmičkih valova od izvora pa kroz čvrstu stijenu do granice čvrste stijene i lokalnog tla. Geometrijski učinci također mogu utjecati na kretanje tla (Panzera i dr., 2013.).

Učinci tla odvijaju se kao rezultat nekoliko fizičkih fenomena koji utječu na upadnu valnu frontu, a to su: višestruka refleksija i difrakcija, rezonancija i slično. Oni su posljedica mehaničkih svojstava tla, heterogenosti i prisutnosti diskontinuiteta u geomediju, te geometrije i topografskih nepravilnosti područja (Panzera i dr., 2013.).

#### **2.4.1. Lokalni utjecaji tla u rasjednim zonama**

Rasjedne zone sastoje se od većeg skupa rasjeda, odnosno većeg skupa međusobno pomaknutih i gotovo usporednih ploha. Karakteristika rasjednih zona je niska brzina obavijenih zonama čvrstih stijena s visokim brzinama. Same rasjedne zone proizvode amplifikaciju (povećanje) gibanja tla prouzrokovanog potresnim djelovanjima, pritom dolazi do amplifikacije horizontalne komponente seizmičkog vala (Kramer, 1996.).

### **2.4.2. Lokalni utjecaj geomedija kod postojanih pukotina i šupljina**

Geomedij uglavnom sadrži diskontinuitete koji mogu predstavljati veliki problem tokom seizmičkih aktivnosti, pošto može doći do sloma duž njihovih ploha. Geomedij koji sadrži šupljine također može predstavljati veliki problem ukoliko se tijekom potresa dogodi urušavanje. Nailaskom seizmičkih valova na pukotine i šupljine u geomediju, dolazi do difrakcije i disperzije valova (Liang i dr., 2012.).

### **2.4.3. Lokalni utjecaj tla s obzirom na topografiju**

Postoji mogućnost proučavanja lokalnih utjecaja tla s obzirom na topografiju. Reljef se može podijeliti na dvije skupine: i) doline, i ii) uzvisine:

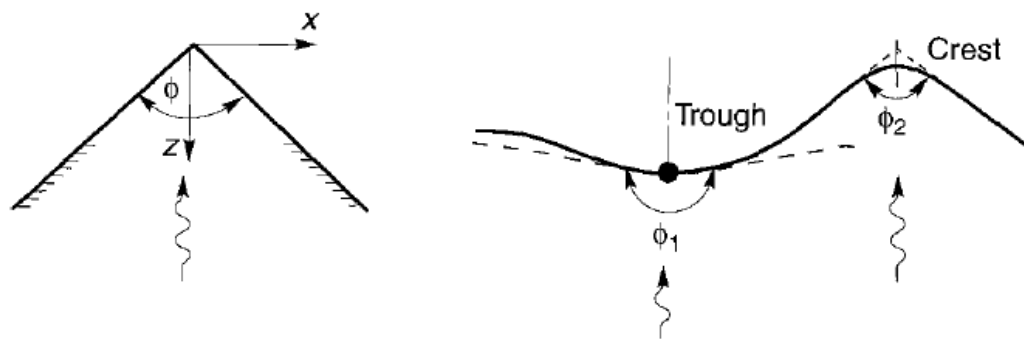
#### **i. Doline**

Doline mogu biti ispunjene aluvijalnim tlom koje uvelike utječe na parametre gibanja tla. Takav tip tla u geomtrijskom obliku doline može „zarobiti“ prostorne seizmičke valove te time izazvati stvaranje površinskih valova. Budući da se mnogi veći gradovi nalaze u aluvijalnim dolinama ili pak u njihovoj blizini, geometrija samih dolina je dosta bitna. Površinski valovi sami po sebi predstavljaju najveću opasnost za građevine koje se nalaze na aluvijalnom tlu. Amplifikacija parametra gibanja u dolinama znatno ovisi o debljini slojeva, te je gibanje tla veće na rubovima ili je podjednako kroz cijelu širinu doline ovisno geometriji doline (široke ili izdužene). Ovisno o obliku doline ovakav primjer utjecaja lokalnog tla može proizvesti veoma kompleksna, čak i kaotična gibanja. (Kramer, 1996.)



## ii. Uzvisine

Utjecaj amplifikacije vezan za topografiju se obično odnosi na fokalizaciju seizmičkih valova na vrhu uzvisine, zbog pojave difrakcije, refleksije i konverzije upadnih valova. Amplifikacija pomaka uslijed djelovanja seizmičkih valova na vrhu uzvisine primarno ovisi o vrhu uzvisine, odnosno geometriji vrha (slika 4). Ukoliko je vrh uzvisine manjih dimenzija (šiljasti kut), tada on proizvodi znatno veću amplifikaciju u odnosu na vrhove s većim dimenzijama (tupi kut). Amplifikacije su veće ako je udaljenost od seizmičkog izvora do vrha manja. (Panžera i dr., 2013.)



Slika 4. Geometrija uzvisine (Kramer, 1996.)

## 2.5. Dinamička svojstva geomedija

Površina terena može biti različitog geološkog sastava, s različitim stanjima trošnosti, s mogućim naslagama i složenog reljefnog oblika. Radi toga, kod opisivanja gibanja tla prouzročenih potresnim djelovanjem, potrebno je uzeti u obzir mehanička stanja lokalnog tla. Utjecaji stanja lokalnog tla na parametre gibanja tla mjere se dinamičkim svojstvima tla. Sam proces određivanja parametara veoma je kompleksan, odnosno povezan je s mnogobrojnim disciplinama poput seizmologije, geofizike, geotehničkog potresnog inženjerstva te inženjerske i strukturne geologije. (Kramer, 1996.)

Dinamička svojstva predstavljaju dio fizičko-mehaničkih i inženjersko-geoloških svojstava geomedija kojima se može definirati i opisati odnos različitih dinamičkih opterećenja i različitih vrsta mehanizama koji dovode do sloma u pojedinim vrstama tla i stijena. Uglavnom se određuju parametri kojima se opisuje odnos dinamičkih naprezanja i deformacija u geomediju. Parametri se mogu podijeliti na parametre velikih i malih deformacija. (Sachan, 2015)

Parametri malih deformacija uglavnom se odnose na deformacije uslijed prolaska valova visokih frekvencija i kraćeg prirodnog perioda. U te parametre se ubrajaju Poissonov koeficijent  $\nu$ , gustoća geomedija  $\rho$ , krutost  $\mathbf{K}$  i prigušenje  $\zeta$ . Parametri velikih deformacija odnose se na deformacije nastale uslijed prolaska valova niskih frekvencija i duljeg prirodnog perioda. Krutost i prigušenje ( $\mathbf{K}$ ,  $\zeta$ ) se također ubrajaju i u parametre srednjih do velikih deformacija. Sama krutost se određuje modulom posmika  $\mathbf{G}$ . Ujedno, ovi parametri utječu i na brzinu širenja P i S valova. (GeoSci Developers, 2017.)

Pošto geomedij može biti čvrsta stijena u različitim stanjima trošnosti ili različita vrsta tla, seizmičke brzine i deformacije geomedija variraju. Kriteriji sloma geomedija neposredno su vezani uz definicije posmične čvrstoće i parametre koji ih određuju. Kada razina posmičnog naprezanja dosegne vrijednosti posmične čvrstoće, posmična naprezanja i posmične deformacije prouzročene seizmičkim valovima predstavljaju problem. Kod relativno malih deformacija, odnos naprezanje-deformacija je u području elastičnosti pa se kao parametar za definiranje posmične čvrstoće uzima maksimalni modul posmika  $\mathbf{G}_{max}$ . Vrijednost tog modula može se odrediti iz seizmičkih metoda određivanjem brzine S vala pomoću formule (Kramer, 1996.):

$$\mathbf{G}_{dyn} = \rho \cdot V_S^2 \equiv \mathbf{G}_{max}$$

gdje su  $\mathbf{G}_{dyn}$  dinamički modul posmika pri vrlo malim deformacijama,  $\rho$  gustoća geomedija, a  $V_S$  brzina posmičnih SH valova. Također, postoji veza između brzine P valova  $V_P$ , modula vezanih uz elastičnosti geomedija i gustoće. Formula glasi sljedeće:

$$V_P = \sqrt{(K + (4/3) \cdot G) / \rho}$$

gdje su  $K$  modul stišljivosti,  $G$  modul posmika i  $\rho$  gustoća geomedija. (GeoSci Developers, 2017.)

U ovakvim analizama, polazna se pretpostavka bazira na svojstvima elastičnosti, saturiranosti i homogenosti geomedija. Kramer (1996.), tlo definira kao nelinearan sustav odnosa naprezanje- deformacija, gdje se tlo ponaša plastično. Kod većih je deformacija tla, sama krutost tla najmanja, dok je prigušenje valova najveće, pošto se kod ovih deformacija zbijenost tla smanjuje, te analogno tome krutost tla opada, a prigušenje raste. S geotehničkog gledišta, projektiranje potresnih temelja zahtijeva podatke o dinamičkim svojstvima geomedija. Prigušenje i krutost geomedija su bitni za proučavanje svojstva odziva slojeva tla i stijenske mase. Čvrstoća geomedija je bitna za analizu stabilnosti nekog temelja, dok plastična deformacija daje informacije za procjenu pomaka i stabilnosti. Postoji mnoštvo terenskih i laboratorijskih metoda za određivanje dinamičkih svojstava geomedija. Primjeri terenskih metoda su seizmička refrakcija i refleksija, analize spektra površinskih valova, SPT (standardni penetracijski pokus), CPT (statički penetracijski pokus), dilatometar i presiometar, dok su primjeri laboratorijskih metoda ispitivanja triaksijalna čvrstoća, ciklički test izravnog posmika, ultrazvuk uzorka, i piezoelektrični bender test. (Kramer, 1996.)

### **3. SEIZMIČKI HAZARDI**

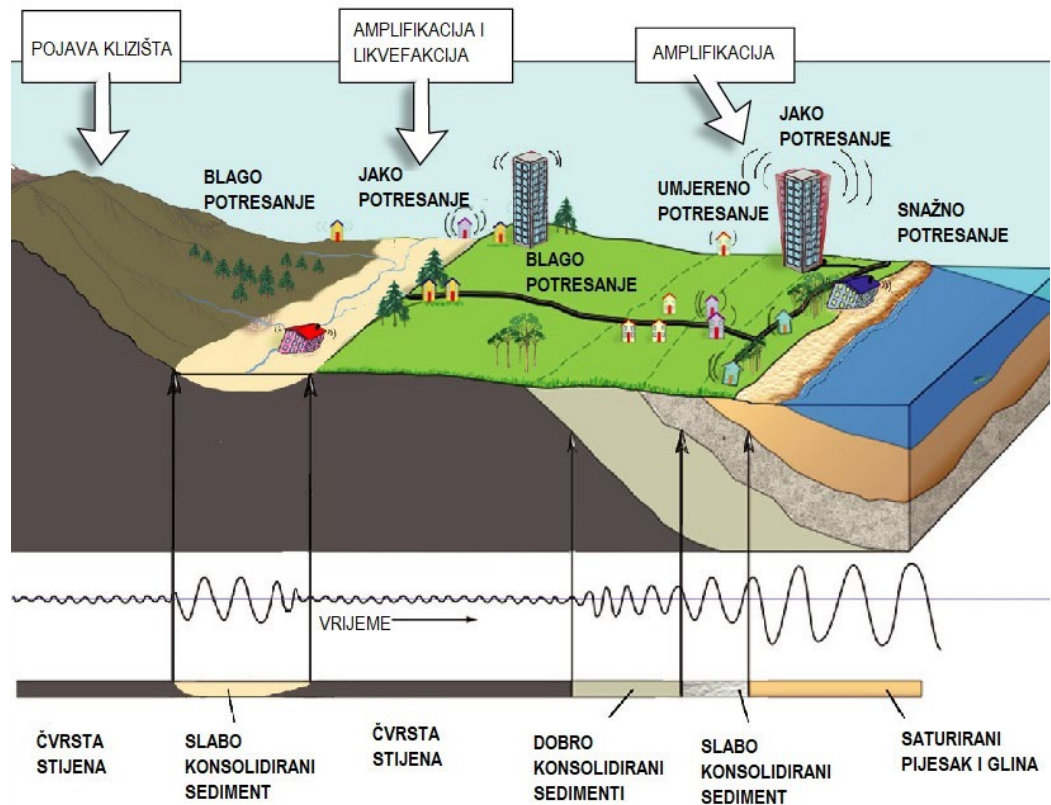
Niz prirodnih događaja poput seizmičkih djelovanja (potresa), tornada, poplava, mogu prouzročiti velike štete na građevinama te izazvati ljudske žrtve. Opasnosti povezane s potresnim djelovanjima nazivaju se seizmičkim hazardima. Potresno inženjerstvo uključuje identifikaciju i ublažavanje seizmičkih opasnosti. U sljedećim poglavljima su opisani neki od najzastupljenijih i najbitnijih seizmičkih hazarda.

#### **3.1. Podrhtavanje tla**

Pri samom nastanku potresa, seizmički valovi se šire dalje od izvora (hipocentra) i brzo putuju kroz zemljinu koru (do epicentra). Kada ti valovi dođu do površine, uzrokuju podrhtavanje tla koje može trajati nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Jačina i trajanje podrhtavanja tla na nekoj lokaciji ovisi o veličini potresa i o lokaciji epicentra te o karakteristikama same lokacije. Postoji mogućnost nastanka velikih šteta pod utjecajem podrhtavanja tla kod mjesta koje je bliže epicentru velikog potresa. Podrhtavanje tla se može smatrati jednim od najvećih seizmičkih hazarda, budući da dolazi do pojave drugih hazarda (primjerice do pojave klizišta, likvefakcije i naglog slijeganja tla). Tamo gdje je razina podrhtavanja tla manja, ti drugi hazardi su znatno manji. (Kramer, 1996.)

Seizmički valovi se šire kroz geomedij od hipocentra do epicentra, a zadnji dio puta čini tlo ili stijena blizu površine, zbog čega su njihova inženjerska svojstva vrlo važna, jer određuju posljedice podrhtavanja temeljne zone inženjerskih konstrukcija, odnosno prirodnih struktura. Slojevi tla „filtriraju“ seizmičke valove prigušujući širenje valova određenih frekvencija te pojačavajući utjecaj drugih, najčešće valova nižih frekvencija. Kako se karakteristike tla dramatično razlikuju na malenim udaljenostima, razina podrhtavanja tla se također može razlikovati u malom području. Jedan od najbitnijih aspekata geotehničkog potresnog inženjerstva uključuje evaluaciju efekata svojstava lokalnog tla na jaka gibanja, odnosno podrhtavanja tla. (Kramer, 1996.)

Slika 5 prikazuje podrhtavanje tla s obzirom na vrstu geomedija te nastanak mogućih seizmičkih hazarda. Također, prikazano je širenje seizmičkog vala kroz pojedinu vrstu tla i čvrste stijene.



**Slika 5** Podrhtavanje tla u različitim tipovima geomedija, odnosno tla (EarthScope ANGLE, 2019.)

Prolaskom seizmičkog vala kroz čvrste stijene, val ima malu amplitudu i visoku frekvenciju, dok u slabijem i manje konsolidiranom geomediju seizmički valovi izazivaju vibracije (podrhtavanje ili trešnju) s većim amplitudama i nižom frekvencijom.

### 3.2. Izdizanje, spuštanje i rasjedanje

Izdizanje, spuštanje i rasjedanje Zemljine kore nastaju prilikom endodinamičkih procesa te su posljedica seizmičkih aktivnosti prouzročenih pomacima litosfernih ploča.

Vertikalni pomak litosfere te kontinentalne, odnosno oceanske kore izazvan je međudjelovanjem površinskih i tektonskih procesa. Površinski se procesi nazivaju i egzogenim procesima, odnosno kod njih dolazi do trošenja već postojećih stijena, transporta tog rastrošenog materijala te pritom nastaju slojevi sedimenta. (Kramer, 1996.) Prilikom gibanja tektonskih ploča dolazi do sloma stijenske mase, pri čemu se oslobađa akumulirana energija u samoj stijenskoj masi. Pomaci koji nastaju prilikom gibanja tektonskih ploča, općenito su vertikalnog i horizontalnog karaktera. Što se tiče rasjedanja Zemljine kore, do sloma geomedija dolazi unutar glavnog rasjeda, pri čemu se razvijaju sustavi pukotina. Najveći se pomaci pojavljuju na glavnom rasjedu.

### **3.3. Likvefakcija tla**

Pojam „likvefakcija“ prvotno su upotrijebili Mogami i Kubo 1953.<sup>1</sup> godine, a danas se koristi u kombinaciji kod opisivanja različitih pojava koje uključuju deformacije tla uzrokovane potresnim djelovanjima u saturiranim nekoherentnim tlima gdje prevladavaju nedrenirani uvjeti. Ova je pojava svojstvena kod saturiranih nekoherentnih tala, jer se pod utjecajem dodatnog opterećenja ta tla mogu zbijati pri čemu dolazi do generiranja dodatnog tlaka porne vode. Posljedica toga je prijenos opterećenja s čvrstih čestica na pornu vodu u nedreniranim uvjetima. Prilikom rasta tlaka porne vode, dolazi do smanjenja čvrstoće tla. Ovaj proces se može usporediti s Darcyevim zakonom koji vrijedi kod realnog stanja tla, odnosno tečenje vode kroz tlo. (Kramer, 1996.)

Prema Krameru (1996.), likvefakcija tla se u inženjerskom smislu može podijeliti na tri glavne grupe: tečenje likvefabilnog tla (engl. flow liquefaction), cikličku mobilnost (engl. cyclic mobility) te površinsku likvefakcija (engl. ground level liquefaction).

Prilikom tečenja likvefabilnog tla, odnosi između naprezanja i deformacije tokom likvefakcije ne ovise o brzini ni o vremenu njihove promjene. Prema tome, ovakvo stanje

---

<sup>1</sup> Autore navodi Kramer (1996.) u poglavlju 9. „Liquefaction“, str.349.

neovisnosti o vremenu naziva se „statičkim“ stanjem. Tečenje likvebafilnog tla može prouzročiti devastirajuća klizišta kada su u pitanju kosine, odnosno uzvisine. Do ovakve pojave može doći samo u sitnozrnim, rahlim tlu kao što su, primjerice, glina i silt (Kramer, 1996.).

Ciklička mobilnost javlja kada dolazi do smanjenja posmičnog naprezanja s obzirom na statičku posmičnu čvrstoću. Što se tiče cikličke posmične čvrstoće, ona povremeno ili pak trenutačno premašuje vrijednosti statičke posmične čvrstoće. Prilikom toga, dolazi do inkrementalnog razvijanja deformacija, koje pod utjecajem seizmičkih aktivnosti, na samome kraju postaju značajne. Ciklička mobilnost se općenito javlja kod rahlih i zbijenih pijesaka. Pri ovoj vrsti likvefakcije tlo pod seizmičkim djelovanjima postaje sve gušće, odnosno zbijenije te se pri tome deformacija tla smanjuje (Kramer, 1996.).

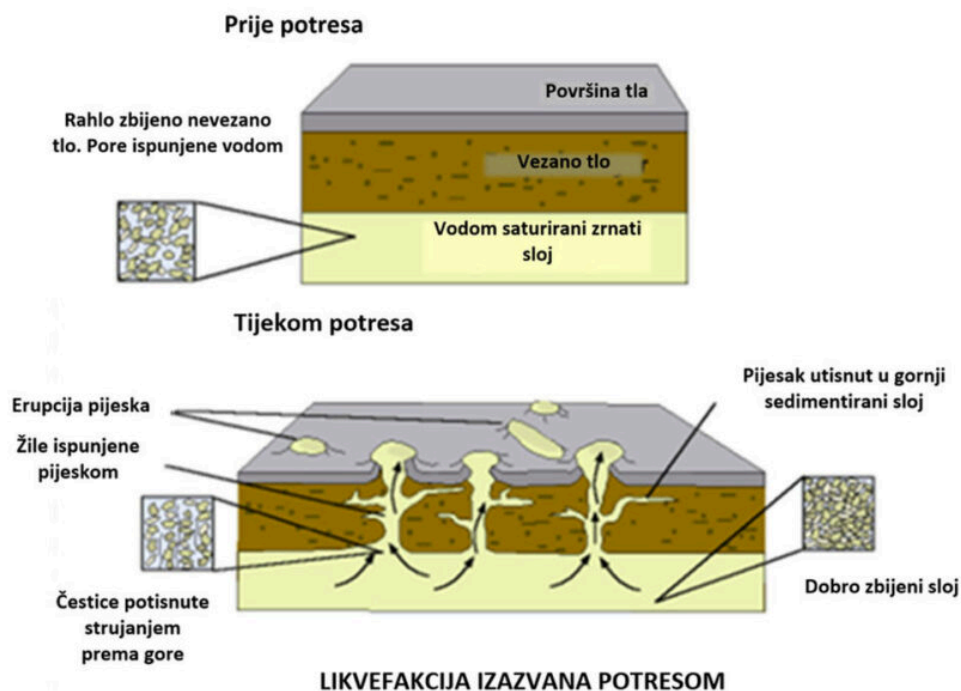
Površinska likvefakcija, slika 6, javlja se kada je cikličko opterećenje, odnosno naprezanje, dostatno da proizvede velik udio dodatnog porednog tlaka (engl. high excess pore pressure), iako pritom ne postoje nikakva druga eksterna statička opterećenja. Ova se pojava manifestira kao post-seizmičko slijeganje, pri čemu dolazi do hidrauličkog sloma u pijescima. Opisno se može predočiti kao „vrenje pijeska“, odnosno pijesak „izbija“ na površinu. Površinska likvefakcija se javlja u saturiranim rahlim i zbijenim tlima. Horizontalni pomaci su kod ove vrste likvefakcije relativno mali s obzirom na one subvertikalne (Kramer, 1996.). Ovakva pojava mogla se zapaziti na području Petrinje 2020. godine kao posljedicu potresa.

Prema pojedinoj vrsti likvefakcije, nastoji se definirati sklonost nekog tla likvefakciji. Ona ponajviše ovisi o geotehničkom stanju samog tla, odnosno o stanju zbijenosti i naprezanja (gustoća tla) prilikom seizmičkih aktivnosti.

Veoma je važno definirati i procijeniti sam potencijal likvefakcije koja uključuje seizmičko opterećenje u sklopu s otpornosti nekog tla prema likvefakciji (tečenju). Otpornost se može

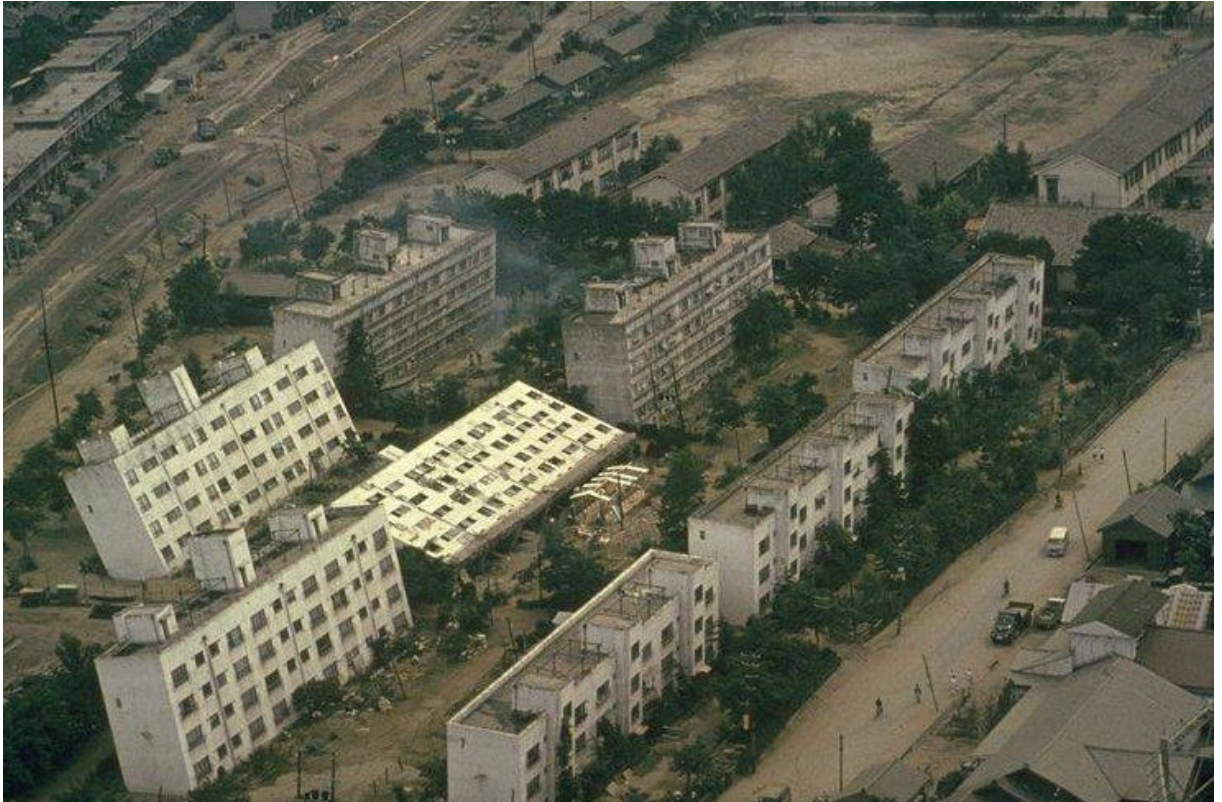
definirati kao broj ciklusa nekog dinamičkog opterećenja, u obliku definirane razine cikličkog posmičnog naprezanja, koje je potrebno za nastajanje sloma tla određene zbijenosti i gustoće. (Panzera i dr., 2013.)

Otpornost likvefakciji se ispituje laboratorijski i in-situ (SPT, CPT, geofizičke metode za određivanje brzine posmičnih valova). Likvefakcija značajno mijenja frekvenciju i amplitudu gibanja površinskog tla prilikom seizmičkih aktivnosti. Prilikom porasta dodatnog tlaka porne vode tlo omekšava, što dovodi do povećanja pomaka na površini. Ciklički pomaci u saturiranim pijescima pospješuju zbijenost površinskog sloja, a to dovodi do slijeganja koja mogu nastati za vrijeme, ali i nakon potresa. Slijeganje ovisi o gustoći i zbijenosti tla, odnosno geomedija te o trajanju potresanja i amplitudi pomaka (Kramer, 1996.). Prilikom duljeg potresanja te pri velikim amplitudama, slom tla koji nastaje horizontalnim pomacima pri površinskoj likvefakciji, uzrokuje velike konačne pomake te enormne štete, a može uzrokovati i prevrtanje građevina (Slika 7).



Slika 6 Površinska likvefakcija (Logično, 2021.)





**Slika 7** Prevrtnje građevina uzrokovano likvefakcijom tla (Geotech, 2019.)

### **3.4. Klizišta**

Kramer (1996.) daje opis i značajke klizišta iniciranih potresom. Povijesno gledano, klizišta i odroni stijena spadaju u najštetnije i najraširenije geološko-geotehničke hazarde koji mogu značajno izobličiti okoliš te se manifestiraju na prirodnim i umjetnim kosinama. Na njihov nastanak utječu geološki, hidrološki, topografski i rastrošbeni uvjeti te način korištenja zemljišta. Klizišta se mogu klasificirati prema vrsti geomedija, načinu gibanja, dubini i stupnju pomaka, prisutnosti vode te brzini klizanja.

Također, klizišta stvaraju velike materijalne štete te predstavljaju prijetnju i opasnost po ljudske živote. Većina se klizišta stvara na prirodnim kosinama i to u uvjetima nedostatne posmične sile trenja na samoj kliznoj plohi koja sprječava klizanje mase niz padinu. Glavni uzročnici pojave klizišta mogu biti promjene režima tečenja i razine podzemne vode,

odnosno promjene uvjeta na kontaktnim plohama dvaju različitih geomedija. Uzrok pojavama klizišta su i seizmička djelovanja, odnosno djelovanja horizontalnih seizmičkih sila. Klizišta uzrokovana potresnim djelovanjem mogu se podijeliti u tri kategorije: isprekidana klizišta i parcijalni odroni, kontinuirana klizišta te klizišta lateralnog širenja i tečenje na likvefabilnom tlu. (Petrović I., 2020.)

Analiza povijesnih podataka omogućuje procjenu minimalne magnitude potresa potrebne za pokretanje različitih tipova klizišta i maksimalne udaljenosti do koje se mogu očekivati klizišta u potresima različitih magnituda. Klizišta nastaju pri uvjetima kada posmična naprezanja dostignu ili pak premaše posmičnu čvrstoću tla na kliznoj plohi pri čemu je potrebno relativno malo dinamičko naprezanje. Prema tome je seizmička stabilnost kosine uvjetovana statičkom stabilnošću klizne plohe. (Petrović I., 2020.)

Klizišta uzrokovana potresima (slika 8), analiziraju se uglavnom pseudo-statički, a takve analize raščlanjuju učinak potresa primjenom statičkih horizontalnih i/ili vertikalnih ubrzanja na potencijalno nestabilnu kliznu plohu. One ipak nisu prikladne za tla u kojima dolazi do pojave velikih porednih tlakova ili za ona koja pokazuju degradaciju čvrstoće uslijed potresa za više od 15%. Stabilnost se izražava u smislu pseudo-statičkog faktora sigurnosti izračunatog postupcima granične ravnoteže. Odabir odgovarajućeg pseudo-statičkog ubrzanja zahtijeva veliku pažnju, a obično se koriste vrijednosti znatno manje od vršnog ubrzanja klizne mase. (Keefter, 1984.)



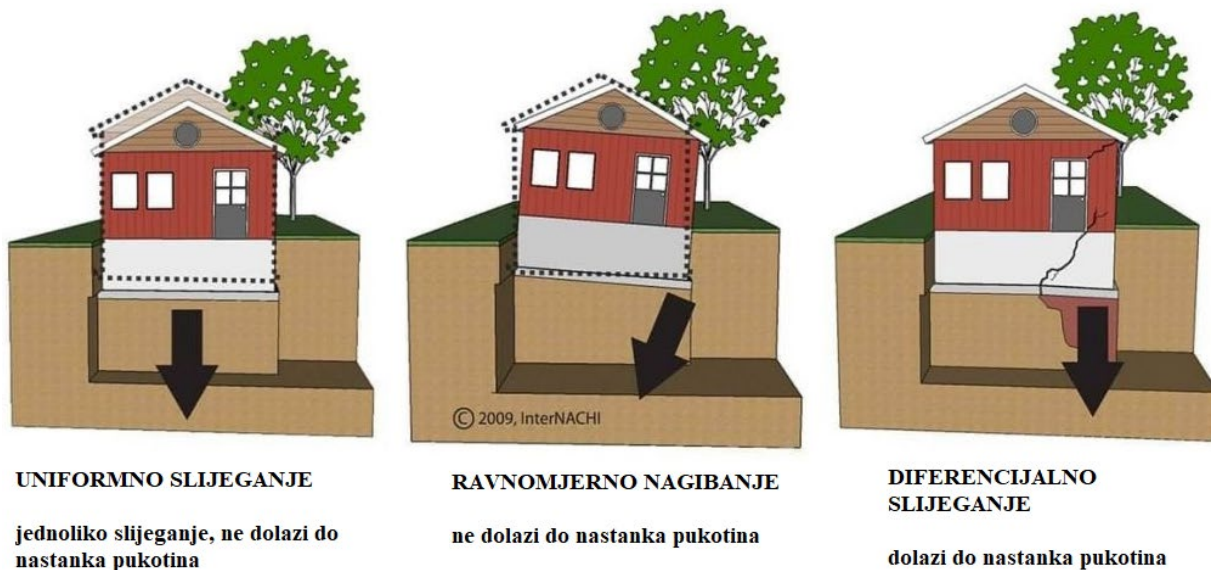
**Slika 8** Klizišta prouzrokovana seizmičkim aktivnostima na Hokkaidu, Japan  
(European Geosciences Union, 2018.)

### 3.5. Slijeganje

Prema Krameru (1996.), slijeganje uzrokovano vibracijama potresa je također važan seizmički hazard. Slijeganje može biti diferencijalno (kod kojeg se pojedini dijelovi površine ispod bilo kakve građevine sliježu različito) te uniformno (cijela se površina jednolično sliježe). Posljedice slijeganja su različite materijalne štete na konstrukcijama, a diferencijalno slijeganje može prouzročiti veće štete na građevinama, jer se jedan dio građevine sliježe više u odnosu na drugi dio. Slijeganje se općenito javlja na rahlom i rastresitom tlu. Slika 9 prikazuje osnovne vrste slijeganja građevina te prikaz nastanka šteta.



## VRSTE SLIJEGANJA



Slika 9 Vrste slijeganja građevina (Geotech)

### 3.6. Strukturna oštećenja

Najdramatičniji seizmički hazard se bez sumnje odnosi na građevine, na sve konstrukcije općenito. Uslijed potresnog djelovanja može doći do rušenja nearmiranih stambenih građevina te do šteta na modernim, armiranim građevinama. Strukturna oštećenja glavni su uzrok smrtnosti i gospodarskog gubitka. Građevina ne moraju kolabirati da bi prouzročile smrt. Padajući predmeti poput opeke i parapeta s vanjske strane građevine ili teških slika i policia unutar građevine uzrokovali su žrtve u mnogim potresima. Unutarnji dijelovi građevina, kao što su sustavi cjevovoda, rasvjete i skladištenja također mogu biti oštećeni tijekom potresa.

Tijekom godina ostvaren je znatan napredak u projektiranju konstrukcija otpornih na potrese, a zahtjevi za seizmičkim projektiranjem u građevinskim normama konstantno se poboljšavaju. Kod koncepta protupotresne gradnje, najveći se naglasak stavlja na čvrstoću

i duktilnost građevina. U sadašnjoj projektnoj praksi, inženjer je odgovoran za osiguravanje odgovarajućih projektiranih gibanja (pomaka) konstrukcije.

## 4. SEIZMIČKI DIZAJN GRAĐEVINA

Odziv građevine na seizmičke aktivnosti javlja se tijekom potresa u nekoliko sekundi. U tom periodu dolazi do kombiniranog djelovanja nekoliko vrsta seizmičkih valova, a posljedica je vibracija (trešnja) građevine ovisno o jačini potresa. Značajke svake građevine su različite, bilo po veličini, konfiguraciji, materijalu, konstrukcijskom sustavu, načinu analize, starosti ili kvaliteti konstrukcije. Svaka od tih značajki utječe na odziv građevine. Unatoč složenosti interakcije između građevina i tla tijekom nekoliko sekundi trešnje, postoji velik spektar nedostatka u projekciji (predviđanju) kako će različite vrste građevina funkcionirati u različitim uvjetima potresanja.

### 4.1. Spektar odziva potresa

Potrebno je definirati pojam „spektar“ da bi se moglo uopće raspravljati o spektru odziva geomedija na djelovanje potresa. Spektar se definira kao raspodjela intenziteta neke mjerene fizikalne veličine s obzirom na neku drugu veličinu, primjerice masu ili frekvenciju.

U potresnom inženjerstvu, spektar odziva potresa predstavlja pogodan inženjerski „alat“ za kvantifikaciju raznih svojstava potresa bitnih za projektiranje, građenje i analizu oštećenja, a po potrebi se može dovesti u vezu i s različitim ekonomskim pokazateljima. Spektar odziva potresa predstavlja obrađeni zapis potresa u kojem se prikazuje ovisnost odziva konstrukcije na potresno djelovanje o periodu vibracija i/ili prigušenju same konstrukcije ( $S_T$ ,  $S_\zeta$ ). Prigušenje neke konstrukcije definira se kao smanjenje vrijednosti neke fizikalne veličine čija je oznaka  $c$  ili  $\zeta$ , a mjerna jedinica [%]. Također se može definirati i kao zapis potresa iskazanog u obliku toka ubrzanja ovisno o vremenu trajanja samog potresa. Metoda spektra odziva potresa temelji se modelu superpozicije (zbrajanje seizmičkih valova koje ovisi o relativnoj fazi dva vala). (Grandić, 2015.)

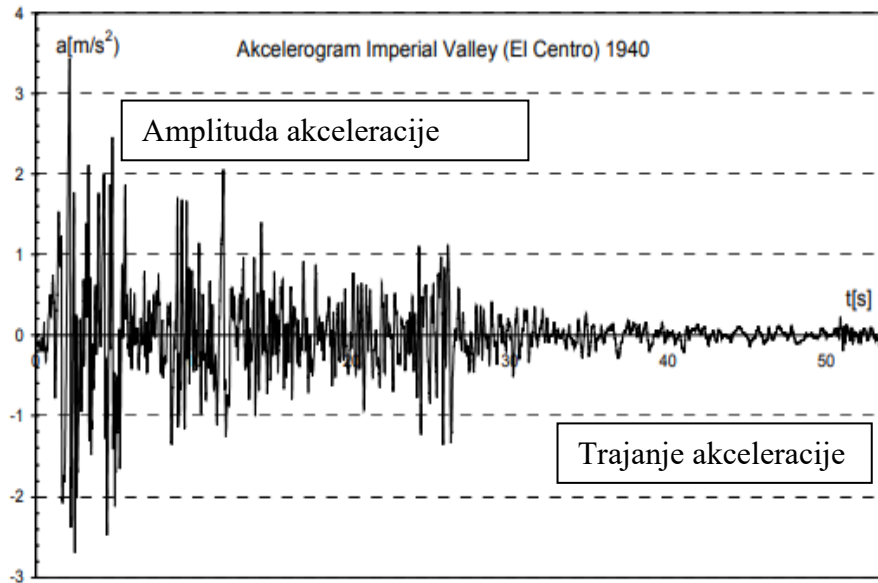
Spektri odziva potresa definiraju se pomoću pomaka, brzine ili akceleracije, odnosno pomoću maksimalnih odziva sustava s jednim stupnjem slobode gibanja neke mase u obliku akcelerograma potresa (Slika 10). Spajanjem maksimalnih odziva dinamičke analize dobiva se krivulja spektra odziva na potres.

Da bi se analizirao neki spektar odziva na potres, potreban je akcelerogram nekog potresa iz povijesti, koji je ujedno i ulazni podatak za sam proračun spektra odziva. Akcelerogram predstavlja aplicirano opterećenje za nosivi sustav s jednim stupnjem slobode (u nastavku: 1SS), za koji se proizvoljno bira vrijednost prigušenja. Krutost sustava bira se tako da se postigne željena veličina (duljina) perioda  $T$ . Nakon toga se provodi linearna dinamička analiza za određeni vremenski interval, a to je uglavnom duljina trajanja ubrzanja, odnosno akcelerograma. (Hrasnica, 2002.)

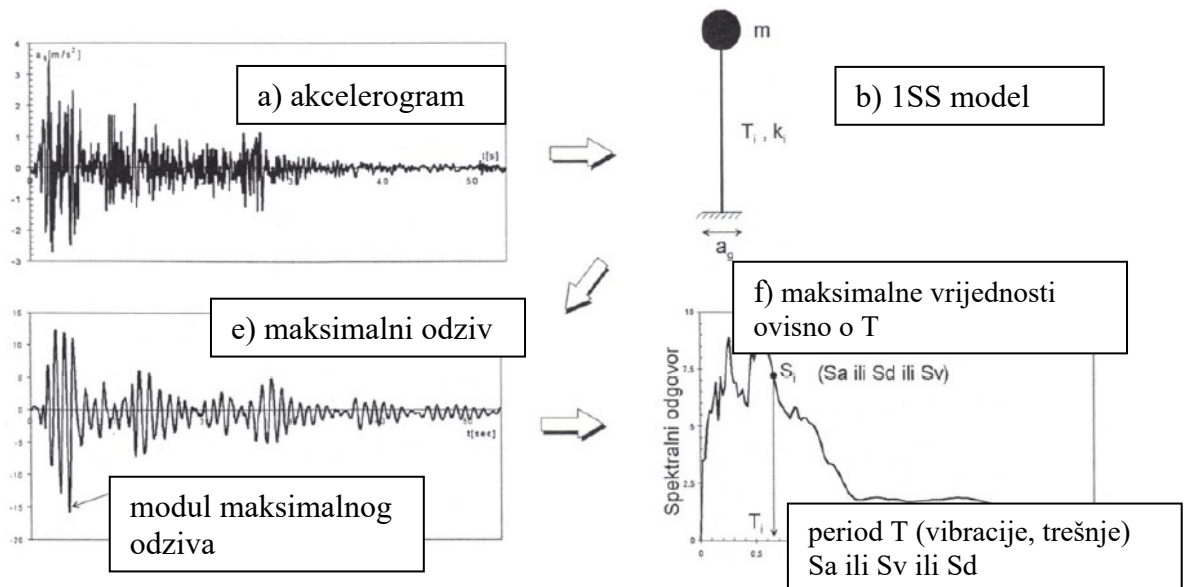
Postupak proračuna spektra odziva na potres ima sljedeći tok (Slika 11):

- a) akcelerogram potresa (Slika 10),
- b) sustav s jednim stupnjem slobode (1SS)
- c) linearna dinamička analiza sustava,
- d) određivanje prirodnog perioda oscilacije  $T$ ,
- e) apsolutna vrijednost maksimalnog odziva,
- f) unos vrijednosti u spektralni dijagram.

Sam rezultat ovog postupka je spektar ubrzanja potresa za neko prigušenje, primjerice za ono od 5% (Slika 12).

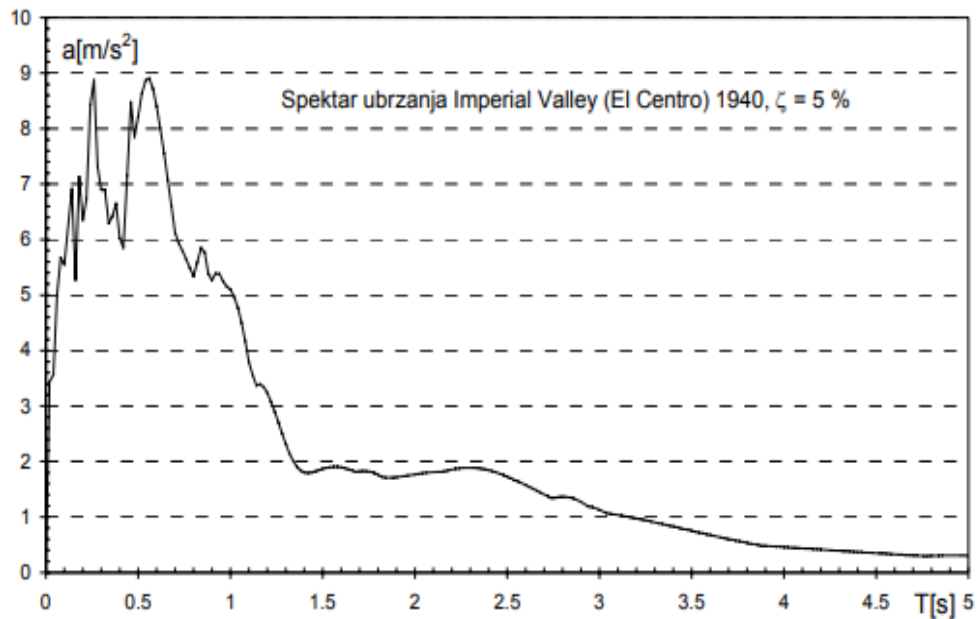


Slika 10 Primjer akcelerograma (Hrasnica, 2002.)



Slika 11 Postupak proračuna spektra odziva potresa (Hrasnica, 2002.)





Slika 12 Spektar ubrzanja potresa za prigušenje od 5% (Hrasnica, 2002.)

Iz ovog spektra odziva ubrzanja na potres vidljivo je da je maksimalno spektralno ubrzanje i do 2,5 puta veće od maksimalnog ubrzanja potresa za period  $0,25 \leq T \leq 0,65$  [s] (vrijednosti s približno 3,5 rastu na približno  $9 \text{ m/s}^2$ ).

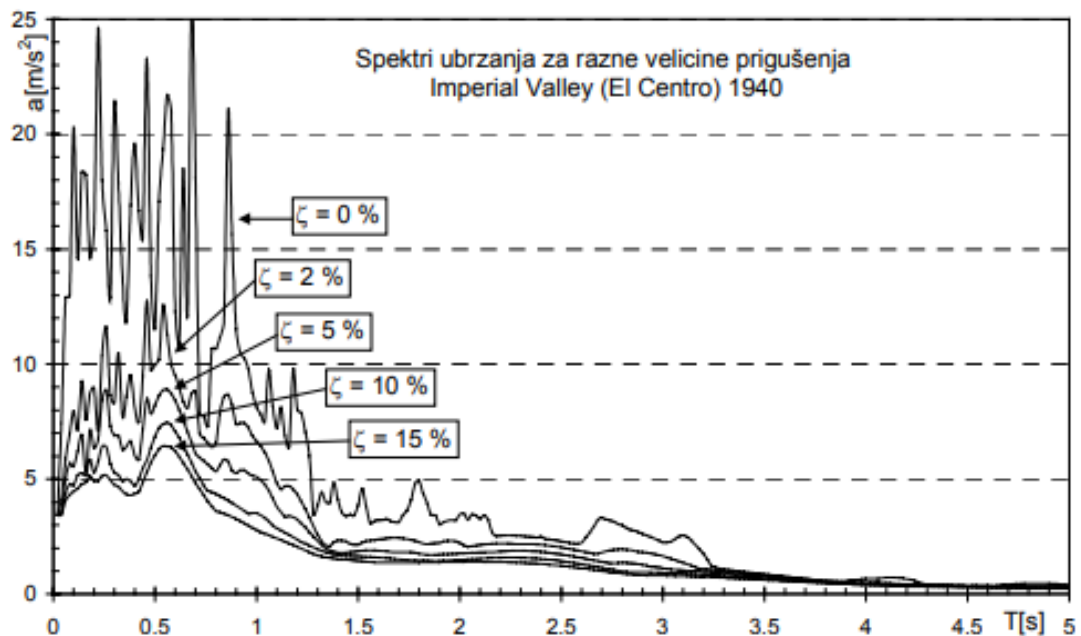
Postupak dobivanja spektra odziva potresa ponavlja se više puta za razne vrijednosti prigušenja čime se dobiva familija krivulja. Također, mogu se kreirati i spektri odziva potresa za razne akcelerograme (ulazni podaci različitih potresa), a za neku realnu veličinu prigušenja (Slika 13). Vidljivo je da kada period  $T$  teži nuli, veličina spektralnog ubrzanja postaje gotovo jednaka maksimalnom ubrzanju tla (PGA).

#### 4.1.1. Maksimalno ubrzanje geomedija (PGA)

Kod određivanja spektra odziva potresa bitno je posvetiti pažnju određivanju maksimalnog, odnosno vršnog ubrzanja geomedija. Maksimalno ubrzanje geomedija (PGA, engl. peak

ground acceleration) je zapravo maksimalno (apsolutno) ubrzanje tla tijekom potresa, a ono je jednako amplitudi najvećeg apsolutnog ubrzanja zabilježenog na akceleroogramu na mjestu tijekom određenog potresa. Mjerna jedinica maksimalnog ubrzanja geomedija je  $[m/s^2]$  ili u jedinicama akceleracije sile teže, odnosno  $[g]$ . 1 g je ekvivalentan  $9,81 m/s^2$ . (Murty i dr., 2012.)

PGA ovisi i o vrsti i svojstvima geomedija. Kod projektiranja građevina i ispitivanja terena, u geotehnici, kao i u građevinarstvu se koristi pojednostavljeni oblik spektra odziva potresa koji je ujedno i najjednostavniji oblik prikazivanja spektra.



**Slika 13.** Spektri ubrzanja potresa za više veličina prigušenja (Hrasnica, 2002.)

O pojednostavljenom elastičnom spektru odziva potresa, kao i ostalim spektrima, raspravljati ćemo u odjeljcima 6.5 i 6.6. Kod samog proračuna potrebne su brzine posmičnih valova karakterističnih slojeva, gustoće tla i nelinearni odnosi modula posmika i prigušenja s posmičnom deformacijom, dubina profila (amplituda) i primarni, odnosno prirodni period. (Choudhury, 2017.)

## 4.2. Dinamička svojstva građevina

Građevine tijekom seizmičke aktivnosti vibriraju pri čemu različite građevine pokazuju različite značajke vibracija (slika 14). Ponašanje građevina tijekom dinamičkih opterećenja određeno je dinamičkim parametrima, kao što su intenzitet, period te veličina inducirane inercijske sile. Bitni dinamički parametri su modul osciliranja i prigušenje  $\zeta$ . Modul osciliranja se određuje pomoću primarnog (osnovnog) perioda ( $T_1$ ) i deformacija. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

Opisno, dinamička gibanja (pomaci) građevina se mogu usporediti s njihanjem na ljuljački (slika 15). Kada se dijete prvi puta odgurne nogama o podlogu, ono mora procijeniti (odmjeriti) dovoljnu silu da bi se ljuljačka pokrenula. Prvi odraz nogama o podlogu mora po mogućnosti biti što bliži primarnom periodu njihanja, odnosno osciliranja.



Slika 14 Građevine različitih dimenzija (BigRentz, Inc.)



**Slika 15.** Dinamička kretanja građevina možemo poistovjetiti s ljuľjanjem djevojčice na ljuľjački vezanoj za granu drveta (Fahmy, A.)

Ako odraz zadovoljava taj uvjet, onda nije potrebna velika energija i rad da bi se ljuľjačka pokrenula. Isto tako, kada građevina pod utjecajem seizmičkog djelovanja počinje vibrirati, ona se giba u dominantnom pravcu progresivno i regresivno (prema „naprijed i nazad“), jer nastoji dostići primarni, prirodni period.

Promjene dinamičkih svojstava potresa iniciraju promjene i oštećenja u/na građevini. Dinamička svojstva građevina određena su svojstvima građevnih materijala, njenom geometrijom i položajem s obzirom na pravac dominantnog seizmičkog djelovanja. Ta se svojstva koriste za određivanje učinkovitosti analitičkih modela i djelovanja seizmičkih sila na građevinu. Ovakva analiza ovisi o vrijednosti primarnog, odnosno prirodnog perioda. Dinamička svojstva i ponašanje neke građevine se mogu odrediti analitičkim modeliranjem te određivanjem njene vlastite frekvencije (perioda). (Murty i dr., 2012.) Vrijednost primarnog perioda za građevine, koje su izgrađene prema tehničkim standardima kao što je Eurokod 8, može se odrediti iz dimenzija građevine.

Tokom dinamičkog opterećenja građevine se ponašaju nepravilno. Osim tih nepravilnosti, pojavljuju se i nepravilnosti u parametrima koji služe za određivanje dinamičkog ponašanja. (Murty i dr., 2012.)

Dinamička svojstva građevina određuju se numerički (analitički) i/ili eksperimentalno. U numeričkim analizama konstruira se model konačnih elemenata s prikladnim svojstvima materijala i rubnim uvjetima, te se procjenjuju vlastite frekvencije. Primjenom numeričkih podataka u svrhu određivanja seizmičkog ponašanja građevine, mogu se pojaviti i netočne analize. Radi mogućnosti pojave netočnosti u analizama, potrebno je provoditi eksperimentalna ispitivanja koja potvrđuju numeričke analize za ispitivanje i određivanje dinamičkih svojstava građevina. Eksperimentalna ispitivanja se izravno primjenjuju na građevine, a dobivena dinamička svojstva prikazuju realno stanje građevina. (Grandić, 2015.)

Za rješavanje problema ponašanja građevina tokom seizmičke aktivnosti, frekvencije i periodi se određuju primjenom jednadžbe slobodnih neprigušenih vibracija (Kramer, 1996.):

$$K - \omega^2 \cdot m = 0$$

gdje je  $m$  masa, a  $K$  je krutost.

Rješavanjem te jednadžbe dobiju se neprigušene prirodne kružne frekvencije ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ ), čiji broj odgovara pojedinom stupnju slobode  $n$ . Za svaku vrijednost frekvencije određuje se oblik koji građevina poprima tokom dinamičkih opterećenja pomoću sljedeće jednadžbe (Kramer, 1996.):

$$(K - \omega^2 \cdot m) \Phi = 0$$

gdje je  $\Phi$  vektor čiji su članovi modalni pomaci točaka za pojedini oblik vibracije.

Vlastite frekvencije građevina poredane su od najmanje prema najvećoj, a minimalna frekvencija je postavljena kao osnovna frekvencija, dok se modalni oblik koji odgovara toj frekvenciji naziva prvim modalnim oblikom.

Drugo dinamičko svojstvo građevine je njezin koeficijent prigušenja. Prema Eurokodu 8, (više u poglavlju 6), prihvatljivi koeficijent prigušenja u projektiranju konstrukcija za idealni elastični spektar ubrzanja iznosi 5%. Koeficijent prigušenja se određuje iz Fourierovog spektra (zapisa) ubrzanja tla tijekom potresa. Vlastita frekvencija vibracije je ona frekvencija u kojoj amplituda spektra ubrzanja postiže svoj maksimum. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

Svrha dinamičkog ispitivanja je određivanje dinamičkih svojstava građevine: i) dinamičkog koeficijenta za određeno opterećenje, ii) frekvencije vibracija, iii) amplitude vibracija, iv) veličine maksimalnog naprezanja u građevini (tokom dinamičkog djelovanja) te v) utvrđivanje stanja građevine i dinamičkih svojstava građevnih materijala. (Meštrović, 2016.)

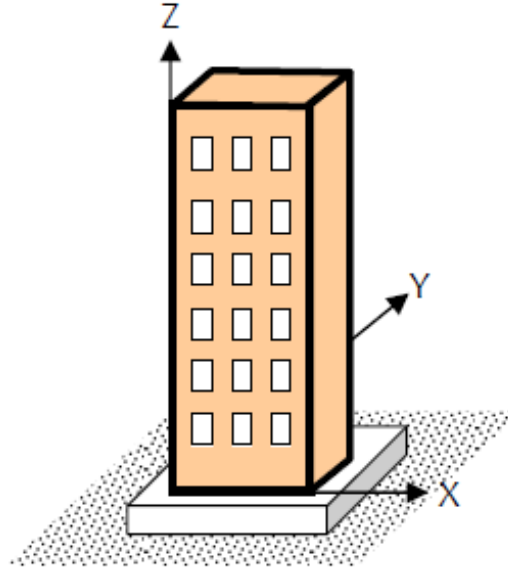
#### 4.2.1. Prirodni period

Radi samog opisivanja ponašanja građevina tokom seizmičke aktivnosti potrebno je definirati prirodni period. Oznaka prirodnog, odnosno primarnog perioda je  $T_1$  [s]. Sam prirodni period se definira kao vrijeme jednog punog ciklusa slobodnih vibracija građevine. Prirodni period definira se pomoću mase  $m$  i krutosti  $K$  (Murty i dr., 2012.):

$$T_1 = 2 \pi \sqrt{(m/K)}.$$

Iz ovog izraza je vidljivo da ako je masa  $m$  veća, a krutost  $K$  manja, veći je prirodni period i obrnuto: ako je masa građevine manja, a krutost veća, manji je prirodni period. Građevine realno vibriraju u trodimenzionalnom sustavu (Slika 16), odnosno dolazi do

translacije u smjerovima  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi te rotacije oko  $x$ ,  $y$ , i  $z$  osi. Također, javlja se i kombinacija ovih događaja. (Murty i dr., 2012.)



**Slika 16.** Građevina vibrira translirajući se u  $x$ ,  $y$ ,  $z$  smjeru, a rotira oko  $x$ ,  $y$ ,  $z$  osi (Murty i dr., 2012.)

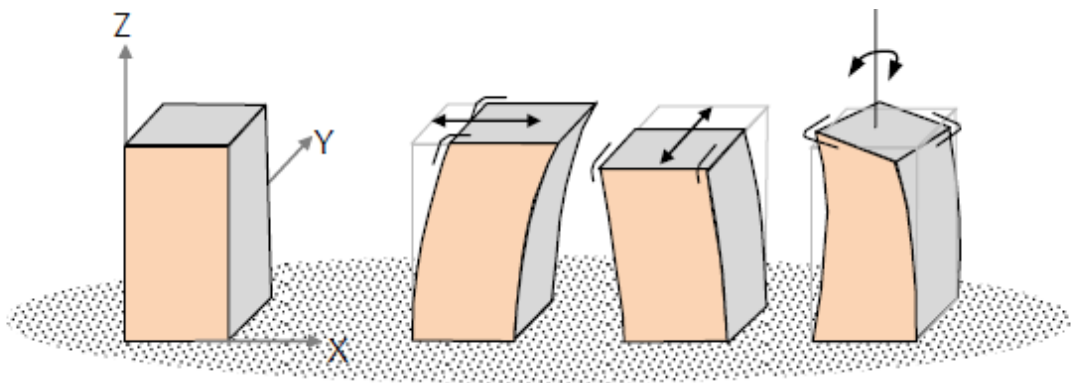
Kod projektiranja građevine, kao ulazni podatak se uzima prirodni period  $T_1$ . Frekvencija se ne uzima kao ulazni podatak (da ne bi došlo do zabune), jer se kod potresnog djelovanja javlja rezonantna frekvencija, odnosno rezonanca. Rijetko kada se kod vibracija građevina javlja rezonantna frekvencija, odnosno frekvencija pri kojoj amplituda vibracija doseže prirodnu frekvenciju građevine te se aplicira na produljeni period. Faktori koji utječu na veličinu prirodnog perioda su: i) dimenzije građevine, ii) vrsta građevinskog materijala, iii) opterećenje te iv) jedinična težina (odnosno masa) same građevine. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

### 4.2.2. Modalni oblici građevine

Modalni oblik građevine je režim gibanja (vibriranja/titranja) sustava pri vlastitoj frekvenciji. To je zapravo opis stvarnih pomaka bilo koje točke građevine koji su uvijek kombinacija svih modova. Njime se opisuju relativni pomaci svih dijelova konstrukcije i dinamičko ponašanje konstrukcije. Kod modalnih oblika bitne su deformacije građevine, jer se pri vibracijama građevine očekuju deformacije konstrukcije. (Murty i dr., 2012.)

Osnovni modalni oblici pravilnih građevina su (Slika 17):

- čista translacija u smjeru osi x,
- čista translacija u smjeru osi y,
- čista rotacija oko osi z.



Slika 17. Dvije translacije u smjerovima osi x i y te jedna rotacija oko osi z (Murty i dr., 2012.)

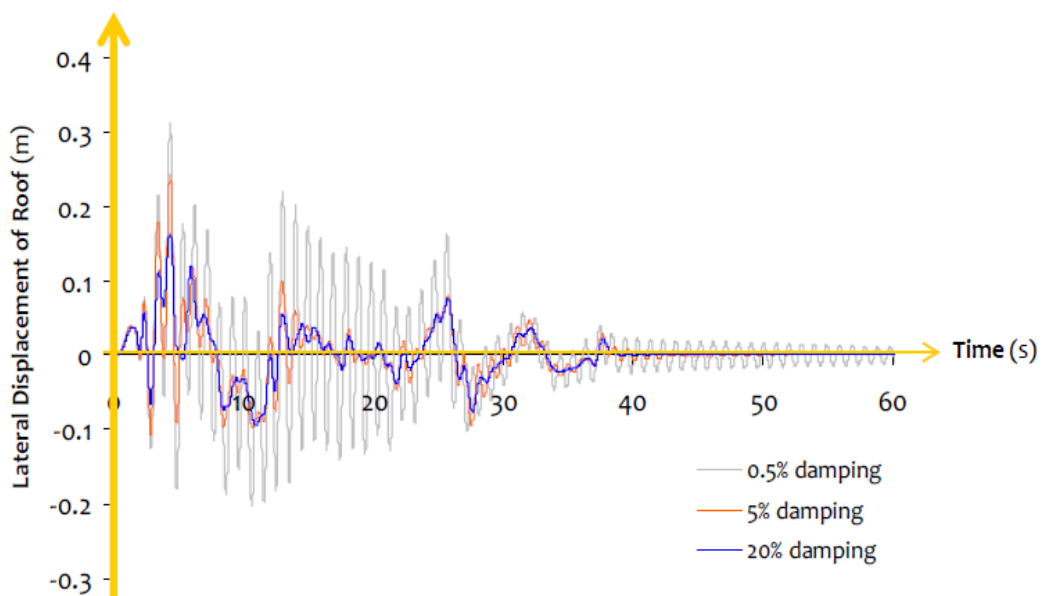
### 4.2.3. Prigušenje

Oznaka za prigušenje je  $\zeta$ , dok je mjerna jedinica prigušenja [%]. Samo prigušenje je mjera disperzije energije u građevini. Iz iskustva se zna da se konstrukcija, odnosno građevina, nakon nekog vremena prestane njihati što je znak gubitka energije unesene energije: u tom trenutku su sve njene vibracije prigušene. Funkcija prigušenja ovisi o



svojstvima okruženja za vrijeme vibracije građevine, jer uvijek postoji neka vrsta otpora, primjerice otpor zraka ili otpor trenja. Samo prigušenje ima velik utjecaj na amplitudu vibriranja pa se s povećanjem prigušenja građevine amplituda smanjuje (Slika 18). Kao osnovno prigušenje uzima se ono od 5% za betonske konstrukcije, dok se 3% prigušenja uzima za čelične konstrukcije. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

Postoji više vrsta prigušenja, a neka od njih su: i) strukturno prigušenje, ii) histerežno prigušenje, iii) viskozno prigušenje i iv) kritično prigušenje. (Šimunić i Dolanjski, 2007.) Prigušenje u strukturi se javlja kod normalnih uvjeta vibracije zgrade radi otpora zraka, sloma dijelova konstrukcije ili zbog trenja između različitih dijelovima građevine (npr. trenje između betona i čelika).



**Slika 18** Utjecaj prigušenja na amplitudu vibracije (Murty i dr., 2012.)

Histerežno prigušenje uglavnom je izazvano neelastičnim ponašanjem građevine. To je zapravo pravo konstrukcijsko prigušenje, jer se pri vanjskom dinamičkom opterećenju pojavljuju deformacije konstrukcije koje mogu biti plastične, elastične ili viskoelastične.

Kada se u protupotresnoj gradnji kao seizmički izolatori rabe elastomerni ležajevi<sup>2</sup>, koji se ponašaju viskoelastično pod djelovanjem dinamičke sile, deformacije se nakon rasterećenja ne vraćaju odmah u prvotno stanje nego tek nakon nekog vremena. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

Viskozno prigušenje nastaje zbog viskoznosti materijala, a proporcionalno je relativnoj brzini vibracija i raste s povećanjem frekvencije. Često se primjenjuje kod svih konstrukcija i relativno se jednostavno može uključiti u matematički model, a koristi se i za modeliranje drugih tipova prigušenja, pod uvjetom da se primjenjuju ekvivalentni koeficijenti prigušenja. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

Kritično prigušenje je najbrže moguće prigušenje vibrirajućeg sustava pri kojem sustav prestaje titrati prije nego što obavi cijeli titraj.

#### **4.2.4. Duktilnost i nosivost građevine**

Tokom potresanja tla u građevini se javljaju inercijske sile koje izazivaju naprezanja u konstrukcijskim elementima građevine. Kada bi se građevine projektirale tako da se ponašaju potpuno elastično tijekom potresa, takva bi građevina bila ekonomski neisplativa (vrlo skupa). Stoga se građevine projektiraju tako da pretrpe najmanju moguću štetu, a da pritom disipiraju energiju. Pri projektiranju građevina otpornih na potresna djelovanja potrebno je zadovoljiti četiri osnovna uvjeta: i) seizmička konfiguracija, ii) horizontalna krutost, iii) horizontalna čvrstoća i iv) duktilnost. (Šimunić i Dolanjski, 2007.)

---

<sup>2</sup> Elastomerni ležajevi su deformabilni elementi koje koriste za prijenos opterećenja s jednog elementa konstrukcije na druge dijelove; primjenjuju se u mostogradnji, visokogradnji i industrijskim građevinama; svojstvo: i) istovremena translacija u dva okomita smjera, ii) istovremena rotacija u tri horizontalne ravnine, iii) preuzimanje vertikalnih opterećenja, i iv) preuzimanje horizontalnih opterećenja. (Polirol, 2016)

Kod proračuna otpornosti građevine na slom tokom potresanja tla u obzir se uzima horizontalna sila. Vrijednosti horizontalnih sila određuju se iz spektralnog odziva potresa, odnosno maksimalne vrijednosti (PGA) i spektralnog odziva akceleracije koji odgovara periodu prirodnog titranja građevine.

Čvrstoća nekog elementa, grupe elemenata koji čine jedan skup, odnosno građevine predstavlja otpornost, mjeru kojom se definira prag opterećenja koje može pretrpjeti do zadane/trazene deformacije bez sloma. Čvrstoća je kriterij-funkcija koja ovisi o vrsti nanesenog opterećenja. Svojstva koja utječu na horizontalnu čvrstoću su: i) strukturna konfiguracija, ii) duktilnost i čvrstoća materijala, iii) veličina pojedinih elemenata, iv) armatura, v) čvrstoća i krutost vezivnih elemenata. Prema tome, nosivost predstavljaju sile, odnosno opterećenje koje neka građevina tokom seizmičkih djelovanja može podnijeti bez značajnijih oštećenja, odnosno ukupnu silu koju promatrana građevina može sigurno preuzeti. (Grandić, 2015.)

Osim maksimalne horizontalne sile koja se javlja tijekom potresa, važnu ulogu ovdje ima i duktilnost materijala. Duktilnost je svojstvo nelinearnog odziva nosive konstrukcije u seizmičkom području te je jedno od glavnih svojstava koja građevina mora posjedovati: sposobnost neelastičnog deformiranja. Ovo svojstvo je bitno, jer se veći dio seizmičke energije koji se unosi u građevinu tijekom potresa, disipira, odnosno „troši“ na plastičnu deformaciju. Nelinearno ponašanje konstrukcije ovisi o svojstvima građevnih materijala, načinu konstruiranja i oblikovanja detalja u konstrukciji. (Choudhury, 2017.)

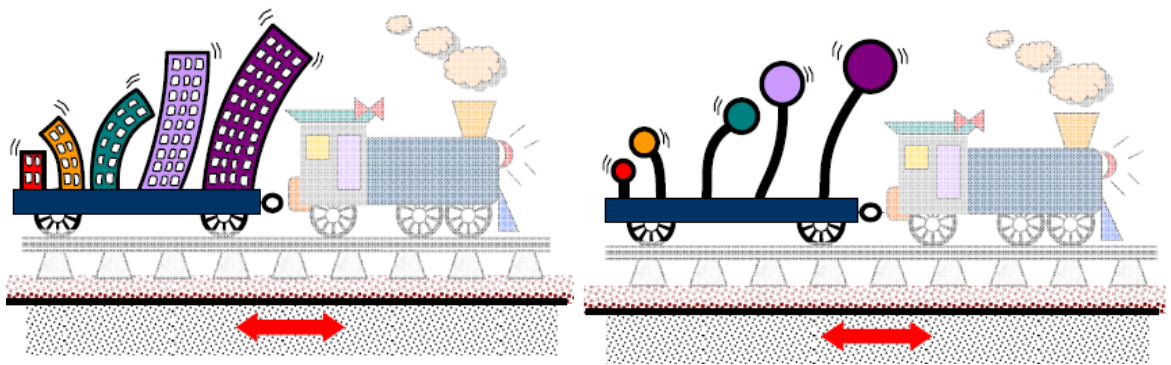
Ista građevina može se projektirati s velikom nosivošću i malom duktilnošću i obratno, pa je potrebno osigurati dovoljnu duktilnost za disipaciju energije (Slika 19). Također, umjerenost u razini (veličini) duktilnosti je neophodna, jer kombinacija niske nosivosti i visoke duktilnosti znači i velike trajne pomake katova u višim građevinama, odnosno zgradama. (Grandić, 2015.)



Slika 19. Odnos između duktilnosti i nosivosti građevine (Grandić, 2015.)

### 4.3. Ponašanje građevina tijekom seizmičkih aktivnosti

Građevine se tijekom potresnih djelovanja „njišu“, odnosno vibriraju. Takvo se njihanje, vibracija, može predočiti kao gibanje kuglica na elastičnom štapu za vrijeme vožnje vlakom (Slika 20). Svaka kuglica i štap različitih su dimenzija, što predstavlja konstrukcijsku različitost građevina. Građevine različitih dimenzija imaju različite značajke vezane uz vibracije: više građevine vibriraju s višom frekvencijom i imaju veći prirodni period, dok niže građevine vibriraju sporije, s nižom frekvencijom i imaju manji prirodni period. Vibracije ovise o dinamičkim svojstvima građevina. (Murty i dr., 2012.)



Slika 20 Ovisnost odziva potresa o prirodnom periodu i „njihanje“ građevina (Murty i dr., 2012.)

## 5. EUROKOD

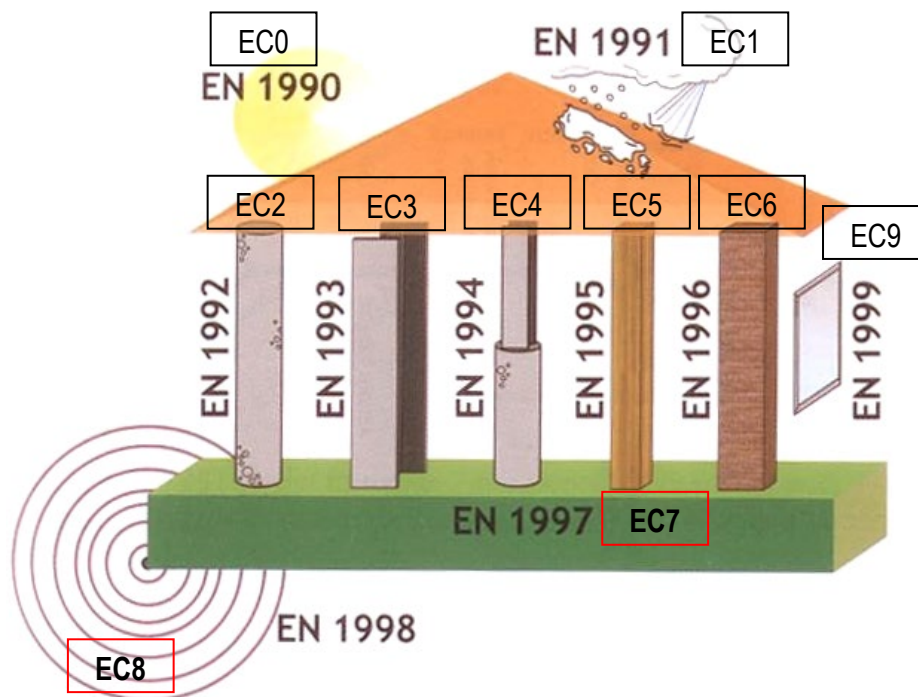
U geoinženjerstvu, odnosno geotehnici, potrebno je radi projektiranja inženjerskih konstrukcija poznavati utjecaj potresnih djelovanja na građevine te njihova svojstva kao i svojstva temeljnog tla. Radi toga je i osmišljen, odnosno ustanovljen Eurokod.

Komisija Europske unije je 1975. godine donijela odluku o programu djelovanja na području građevinskog inženjerstva. Sam cilj programa temeljio se na uklanjanju tehničkih prepreka ugovaranju i izvedbi nekog građevinskog projekta. U okviru tog programa, Europska unija je pokrenula uspostavljanje skupina usklađenih tehničkih pravila za proračune u građevini. Razvijanjem tih pravila u periodu od petnaestak godina, nastao je program Eurokodova, preteča prvoj generaciji Eurokodova iz osamdesetih godina prošloga stoljeća. Europska unija je razvijanje normalizacijskih pravila 1989. godine prepustila CEN-u (franc. Comité Européen de Normalisation). (Petrović I., 2020.)

Prema definiciji, Eurokod je zapravo propis Europske unije, odnosno skup pisanih normi s odgovarajućim osnovnim pravilima i načelima, pomoću kojih se nastoji ujednačiti način projektiranja, proračuna i gradnje na području Europske unije. Sastavljen je od deset normi (EN je kratica za europsku normu, odnosno standard), a to su redom (Camilleri i dr., 2015.):

- 1) EN 1990, Eurokod 0: Osnove projektiranja konstrukcija
- 2) EN 1991, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije
- 3) EN 1992, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija
- 4) EN 1993, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija
- 5) EN 1994, Eurokod 4: Projektiranje čelično-betonskih spregnutih konstrukcija
- 6) EN 1995, Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija
- 7) EN 1996, Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija
- 8) **EN 1997, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje**
- 9) **EN 1998, Eurokod 8: Projektiranje konstrukcija otpornih na potres**
- 10) EN 1999, Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija

Sustav ovih normi, odnosno namjenu Eurokodova prezentacijski prikazuje Slika 21.



Slika 21 Sustav Eurokodova (Petrović I., 2020.)

U Republici Hrvatskoj se sustav Eurokodova koristi od 2008. godine.

## 5.1. Eurokod 7

Jedan od najznačajnijih dijelova sustava Eurokodova je Eurokod 7 (EN 1997 EC7): Geotehničko projektiranje. Eurokod 7 (EC7) sastoji se od dva glavna dijela, a to su (tablica 3):

- I. Geotehničko projektiranje - 1.: Opća pravila
- II. Geotehničko projektiranje - 2.: Istraživanje i ispitivanje tla.

Opća pravila (I. dio) se odnose na geotehničko projektiranje, nadzor kod izvođenja, opažanje i održavanje, poboljšanje i armiranje tla, granične vrijednosti deformacija konstrukcija i pomicanja temelja. Istraživanje i ispitivanje tla (II. dio) se odnosi na različite aspekte kriterija provođenja geotehničkih ispitivanja, planiranja i interpretiranja pojedinih vrsta geotehničkih radova (Szavits-Nossan i Ivšić, 2006.)

**Tablica 3** Sastavni dijelovi Eurokoda 7 i englesko nazivlje (Petrović I., 2020.)

| Oznaka norme                       | Izvorni naslov norme  |
|------------------------------------|---|
| HRN EN 1997-1: 2008<br>engl. naziv | Eurokod 7 – Geotehničko projektiranje<br>1.dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004)<br>Eurocode 7: Geotechnical design<br>Part 1: General rules (EN 1997-1:2004)                                |
| HRN EN 1997-2: 2008<br>engl. naziv | Eurokod 7 – Geotehničko projektiranje<br>2.dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnoga tla (EN 1997-2:2007)<br>Eurocode 7: Geotechnical design<br>Part 2: Ground investigation and testing |

Prema općim principima projektiranja, odnosno EN 1990 (EC0), postoji podjela na šest elemenata (Szavits-Nossan i Ivšić, 2006.) :

- I. osnovni zahtjevi,
- II. princip projektiranja prema graničnim stanjima,**
- III. definicija osnovnih varijabli,
- IV. modeliranje konstrukcije proračunom i ispitivanjem,
- V. provjera doseganja graničnih stanja metodom parcijalnih faktora,**
- VI. upravljanje pouzdanošću s obzirom na radove pri izgradnji.



U geoinženjerstvu okoliša, najzanimljiviji elementi EN 1990 (EC0) su principi projektiranja prema graničnim stanjima te provjera dosezanja graničnih stanja metodom parcijalnih faktora. Princip projektiranja prema graničnim stanjima se uglavnom odnosi na dokaze o nemogućnosti izlaganja građevine pojedinim graničnim stanjima. Provjera dosezanja graničnih stanja metodom parcijalnih faktora pak se odnosi na postupak provjeravanja učinaka koji mogu doprinijeti, ali ne ugrožavanju otpornosti građevine, odnosno konstrukcije ili pojedinih dijelova same konstrukcije.

### 5.1.1. Provjera dosezanja graničnih stanja

Prema Szavits-Nossan i Ivšić (2006.), kod provjere dosezanja graničnih stanja, prvo je potrebno izabrati projektnu situaciju. Projektna situacija je zapravo segment o trajnosti konstrukcije u koji spadaju geometrijski podaci, odnosno sam oblik i smještaj nekog objekta, pripadajuća opterećenja i utjecaji te njihova međudjelovanja i kombinacije. Ovdje također spadaju i svojstva samog građevnog materijala, odnosno podaci i ovisnost o nekom vremenskom periodu. Projektne se situacije uglavnom dijele na trajne, prolazne, slučajne i potresne.

Što se tiče graničnih stanja, one se dijele prema štetnosti koja nastaje njihovim prekoračenjem, a u njih spadaju:

- A. **granična stanja uporabivosti:** odnose se na korisnu upotrebljivost konstrukcije,
- B. **granična stanja nosivosti:** odnose se na pojavu sloma i rušenje konstrukcije.

Dokazivanje stabilnosti i uporabivosti te opseg istražnih radova veoma je složen postupak, te se dijeli na tri geotehničke kategorije (Szavits-Nossan i Ivšić, 2006.):

**I. geotehnička kategorija 1:**

- najjednostavnije konstrukcije: primjerice niski zidovi, nasipi i temelji jednokatnica,
- istražni radovi su podosta jednostavni: pretežno provjera terena te primjena iskustva sa susjednih objekata,

**II. geotehnička kategorija 2:**

- ovdje spadaju rutinski geotehnički radovi,
- koristi se kod većine geotehničkih projekata,

**III. geotehnička kategorija 3:**

- obuhvaća vrlo složene i visokorizične zahvate (npr. temeljenje na rahlom tlu, složene građevne jame u blizini već postojećih objekata, sanacija klizišta, tunelogradnja, itd.),
- ne sadrži posebna uputstva za projektiranje i gradnju,
- prisutnost strožih kriterija i postupaka istražnih radova i monitoringa sa strane geotehničara.

Općenito, granična stanja nosivosti se dijele na (Camilleri i dr., 2015.):

- **(EQU):** gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla razmatranog kao kruto tijelo, čvrstoća elementa ne pridonosi otpornosti,
- **(STR):** slom ili velika deformacija betonske, metalne, drvene ili zidane konstrukcije ili njenog elementa, čvrstoća elementa pridonosi otpornosti,
- **(GEO):** slom ili velika deformacija tla pri kojoj čvrstoća tla ili stijene bitno pridonosi na otpornost, čvrstoća elementa pridonosi otpornosti,
- **(UPL):** gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla uslijed uzgona vode ili drugih vertikalnih sila,
- **(HYD):** hidrauličko izdizanje, odnosno slom, interna erozija uzrokovana hidrauličkim gradijentima.

Kod seizmičkih aktivnosti najbitnija granična stanja nosivosti su „STR“ i „GEO“. Granično stanje „STR“ uključuje temelje, pilote, sidra i potporne zidove, dok se granično stanje „GEO“ odnosi na geomedij na i u kojem se gradi.

### 5.1.2. Proračun prema Eurokodu 7

Osnovne varijable koje se koriste u analizi neke konstrukcije su djelovanja, odnosno sile  $F$ , svojstva materijala  $X$  i geometrijski podaci  $a$ . Osnovnim varijablama dodjeljuju se indeksi  $k$  koji prezentiraju karakteristične vrijednosti, prema tome slijedi:  $F_k$ ,  $X_k$  i  $a_k$ .

Sama djelovanja mogu imati raznovrsne oznake ovisno o kakvom se djelovanju radi:

- trajna djelovanja (oznaka  $G$ ) kao što je vlastita težina, pritisak vode, pritisak tla i slično
- djelovanja prednapinjanja (oznaka  $P$ )
- promjenjiva djelovanja (oznaka  $Q$ ) kao što su prometna opterećenja, opterećenja od temperature i slično
- slučajna djelovanja (oznaka  $A$ ) kao što je eksplozija, pad kamenja i slično
- **djelovanja od potresa (oznaka  $AE$ ).**

Provjera dosezanja graničnih stanja metodom parcijalnih faktora je formalni postupak kojim se provjerava da učinci djelovanja ( $E_d$ ) ne prelaze dizajnirane otpornosti ( $R_d$ ) ( $R_d > E_d$ ), gdje se dizajnerske otpornosti dobivaju iz reprezentativnih djelovanja, dizajnerskih svojstava i dizajnerskih geometrijskih podataka umanjenim (podijeljenim) za parcijalne faktore koji opisuju otpornost. (Petrović I., 2020.)

Postoje tri projektna pristupa (Tablica 4). Svaki pristup sadrži kombinaciju parcijalnih faktora koji se koriste u proračunu. Parcijalni faktori podijeljeni su u skupine za svaki projektni pristup, gdje skupina A predstavlja djelovanja, skupina M svojstva materijala, a skupina R otpornosti.

Izbor projektnog pristupa ovisi o samoj državi u kojoj se primjenjuje Eurokod 7. Ne postoji pravilo unutar Europske unije koje obavezuje zemlje članice da koriste određeni projektni pristup. Prema nekim analizama, pokazuje se da su razlike između projektnih pristupa je minimalne, ali ovise o građevini, odnosno konstrukciji koja se projektira.

**Tablica 4** Projektni pristupi prema Eurokodu 7 (Petrović, 2020.)

| <b>Projektni pristup</b> | <b>Kombinacija</b>    |
|--------------------------|-----------------------|
| 1                        | A1 + M1 + R1          |
|                          | A2 + M2 + R1          |
| 2                        | A1 + M1 + R2          |
| 3                        | (A1 ili A2) + M2 + R3 |

## 6. EUROKOD 8

Eurokod 8 (EC8, EN 1998) se primarno koristi za konstruiranje i izgradnju objekata u zonama kojima prijete seizmički hazardi. Seizmički utjecaji se u numeričkim analizama konstrukcija, odnosno građevina, predstavljaju s jednim ili s više sustava opterećenja u kombinaciji s dodatnim opterećenjima u skladu s uputama sadržanim u EC8. Objekti koji se projektiraju su uobičajene, tipične građevine. Za građevine koje mogu prouzročiti velike negativne posljedice za ljude i okoliš uslijed njihovog sloma, poput nuklearnih elektrana, velikih brana ili građevina neposredno uz obalu, zahtijevaju posebne dodatne mjere koje nisu propisane Eurokodom 8. Jedna od polaznih tema Eurokoda je opisivanje seizmičke aktivnosti. Ono što se nastoji postići tijekom i nakon potresa je zaštita života ljudi, smanjenje štete i očuvanje objekata koji osiguravaju zdravstvenu i opću civilnu zaštitu. Zbog ovih razloga, veoma je važno točno i pravilno odrediti pripadne seizmičke utjecaje za primjenu u inženjerskoj praksi. (European Standard, 2004.)

Eurokod 8 sastoji se od šest osnovnih dijelova koji ovise o tipu konstrukcije, odnosno građevine za koju se provode istraživački radovi (Hrasnica i dr., 2018):

- I. EN1998-1: Opća pravila, pravila i radnje za zgrade,
- II. EN1998-2: Mostovi,
- III. EN1998-3: Procjena i dogradnja zgrada,
- IV. EN1998-4: Silosi, spremnici i cjevovodi,
- V. EN1998-5: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnički aspekt,
- VI. EN1998-6: Tornjevi i dimnjaci.

### 6.1. Osnovi ciljevi Eurokoda 8

Eurokod 8 pridaje veliku važnost pravilnom projektiranju i izvođenju građevina otpornih na djelovanje potresa pri čemu su glavni ciljevi (CEN, 2004.):

- zaštita ljudskih života,

- održavanje rada kritičnih postrojenja (npr. nuklearne elektrane),
- ograničenje nastanka šteta na građevinama i imovini.

Ovi primarni ciljevi ponajviše ovise o vrsti građevine koja se projektira te se moraju proučavati jedan ovisno o drugome. Uglavnom se može zahtijevati ispunjenje sva tri cilja kod iste građevine, ali je za svaki od njih pojedinačno mjerodavna različita učestalost pojave potresa, što je dalje bitno za određivanje seizmičkog opterećenja na konstrukciju, koje ovisi o dinamičkim svojstvima sustava građevine. (Hrasnica i dr., 2018)

Građenje takvih nosivih konstrukcija koje imaju sposobnost podnošenja seizmičke aktivnosti bez da dolazi do rušenja tokom trajanja potresa bitno je kod uobičajenih građevina. Prema tome, za razliku od dimenzioniranja za svakodnevna opterećenja, dopušta se da kod jakih potresa dijelovi nosive konstrukcije, odnosno građevine imaju mogućnost ulaska u nelinearno područje odziva, a na nekim mjestima doseći i razinu granične nosivosti. U tu se svrhu primjenjuju pravila i upute metode kapacitativnog dimenzioniranja, pri čemu je potrebno koristiti duktilnost konstrukcije te se mora postići disipacija energije. Treba iskoristiti duktilna svojstva nosive konstrukcije i postići disipaciju energije u sustav unijete seizmičkim djelovanjima. (Hrasnica i dr., 2018)

## **6.2. Projektiranje protupotresne gradnje**

Kod projektiranja građevine neminovno se moraju imati na umu moguće posljedice seizmičkih aktivnosti, u svim fazama njene izvedbe i eksploatacije. Prema tome, potrebno je oblikovati takav sustav koji će biti ekonomski prihvatljiv s naglaskom da zadovoljava osnovne zahtjeve pravilnog projektiranja nosivih konstrukcija.

Eurokod 8 izdvaja dva različita zahtjeva vezana uz razinu zaštite građevine, a to su „near collapse“ (blizu/do kolapsa) i „damage limitation“ (ograničenje štete). Prema prvome

zahtjevu, nosive konstrukcije moraju biti projektirane i izvedene tako da izdrže i seizmička (dinamička) opterećenja do granice kolapsa (kolaps nije dozvoljen), s obzirom na najjači mogući potres na lokalnome terenu na kojem se grade. Drugi se osnovni zahtjev Eurokoda 8 odnosi na ograničavanje mogućih oštećenja. Sama konstrukcija bi kao sustav morala moći evakuirati oštećenja u neopasna (nenosiva) područja, a pri tome izdržati referentni potres koji ima znatno veću vjerojatnost pojave od projektiranog potresa na granici oštećenja. (Bisch i dr., 2011.)

Osnovni principi projektiranja seizmički otpornih konstrukcija, odnosno građevina su (Hrasnica i dr., 2018):

- **jednolikost (uniformnost), simetrija, statička neodređenost:** gledano po visini građevine, jednolik ili pravilan raspored nosivih elemenata, tako da je put prijenosa inercijskih sila potresa relativno kratak i neposredan te ne dolazi do nastanka ekcentriciteta;
- **konstruktivna jednostavnost:** jasni i direktni pravci širenja posmičnih sila;
- **nosivost i krutost moraju biti u dva horizontalna pravca** radi sprječavanja većih pomaka;
- **torzijska nosivost i krutost:** dostatnost torzijske nosivosti i krutosti,
- **adekvatno temeljenje** radi osiguravanja izloženosti građevine seizmičkim aktivnostima,;
- **mogućnost postizanja krutih dijafragmi u katovima građevina:** stropne konstrukcije djeluju poput horizontalnih dijafragmi koje prenose inercijske sile potresa na vertikalne nosive elemente, te ih shodno tome povezuju tako da djeluju kao neka cjelina.

Građevinu je potrebno projektirati prema određenim kriterijima prema kojima će ona biti pravilna te se radi toga one dijele na dvije osnovne skupine: pravilne i nepravilne konstrukcije. Sama pravilnost građevine određuje se prema visini, odnosno prema broju katova. Osim toga, potrebno je navesti i referentni faktor ponašanja  $q$  neke građevine, odnosno opis ponašanja neke konstrukcije pod seizmičkim djelovanjima.

Za (a)seizmičko projektiranje s obzirom na pravilnost konstrukcije u Eurokodu 8 se navode sljedeći aspekti protupotresne gradnje (Hrasnica i dr., 2018):

- model konstrukcije mora biti što jednostavniji kako u ravnini tako i u prostoru,
- metoda proračuna mora biti u što jednostavnijem obliku spektralne ili modalne analize,
- veličinu faktora ponašanja  $q$  moguće je umanjiti zbog nepravilnosti neke konstrukcije i to s obzirom na veličinu građevine,
- nepravilnost podjele nosivosti po visini građevine te različite otpornosti susjednih katova.

### **6.3. Granična stanja prema Eurokodu 8**

Eurokod 8 razlikuje dvije vrste graničnih stanja (European Standard, 2004.):

#### **A. „ultimate limit state“ (ULS)**

- odnosi se na očuvanje integriteta konstrukcije nakon seizmičkog potresnog djelovanja,
- temelji se na pretpostavci o dostatnosti lateralnih otpornosti i disipaciji energije čime se sprečava slom konstrukcije,
- provjerava se stabilnost elemenata s obzirom na: prevrtanje i klizanje, nosivost temeljnog tla te utjecaj ostalih elemenata radi izbjegavanja štetnih utjecaja.

#### **B. „damage limitation state“ (DLS)**

- odnosi se na osiguranje konstrukcije od sloma pod utjecajem većeg broja seizmičkih aktivnosti,
- primjenjuje se za projektiranje infrastrukture: plinovod, vodovod i slično, odnosno za elemente koji ne utječu na nosivost konstrukcije.



## 6.4. Vrste tla definirane Eurokodom 8

Vrste i lokalna svojstva tla značajno utječu na ponašanje i izdržljivost građevina izloženih seizmičkim aktivnostima. U poglavlju 2.4 opisan je utjecaj lokalnih svojstava tla na oblike i efekte seizmičkog djelovanja. Pri tome su moguće mnoge pojave, primjerice rezonancija, koja ima značajan utjecaj na posljedice seizmičkih aktivnosti unutar naseljenih područja. (Santucci, 2011.)

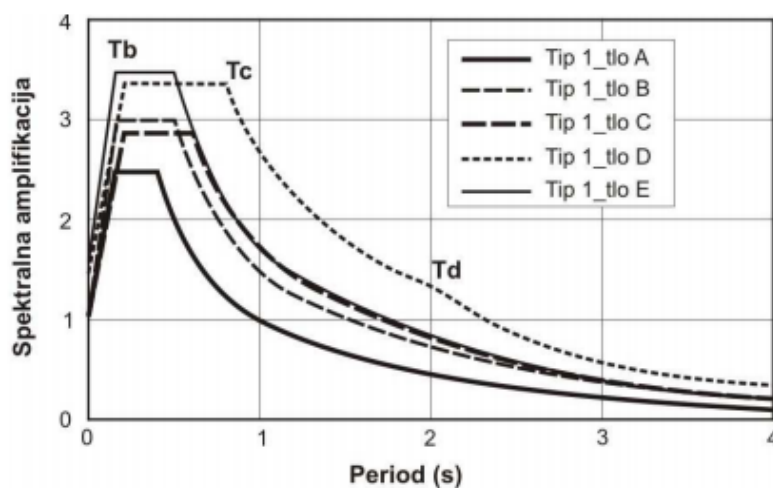
Radi sprječavanja negativnog utjecaja na građevine, potrebno je istražiti i definirati lokalna svojstva tla. Eurokod 8 dijeli lokalno tlo na sedam različitih vrsta koje su određene trima parametrima pomoću kojih se kategoriziraju: brzina posmičnog vala do dubine 30 m ( $V_{s,30}$ ), broj udaraca SPT ( $N_{SPT}$ ) i nedrenirana posmična čvrstoća ( $c_u$ ). Vrsta tla se najčešće identificira na temelju vrijednosti brzine posmičnog vala  $V_{s,30}$ . Tablica 5 sadrži EC8 vrste tla i njihove geotehničke opise prema navedenim parametrima: ( $V_{s,30}$ ,  $N_{SPT,30}$ ,  $c_{u,30}$ ). (Kvasička i dr., 2011.)

**Tablica 5** Vrste tla definirane Eurokodom 8 (Bisch i dr., 2011.)

| Vrsta tla | Opis  |
|-----------|---|
| <b>A</b>  | stijena koja uključuje 5 m tla u krovini<br>$V_{s,30} > 800 \text{ m/s}$  |
| <b>B</b>  | slojevi dobro zbijenog pijeska, šljunka ili krute gline<br>debljina najmanje desetak metara<br>postepeno poboljšanje mehaničkih svojstava na većim dubinama<br>$V_{s,30} = 360\text{-}800 \text{ m/s}$ , $N_{SPT,30} > 50$ za nekoherentna tla<br>$c_{u,30} > 250 \text{ kN/m}^2$ za koherentna tla |
| <b>C</b>  | slojevi dobro do srednje zbijenog pijeska, šljunka ili krute gline<br>debljina od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara<br>$V_{s,30} = 180 - 360 \text{ m/s}$ , $15 < N_{SPT,30} < 50$ za nekoherentna tla<br>$70 < c_{u,30} < 250 \text{ kN/m}^2$ za koherentna tla                         |
| <b>D</b>  | slojevi s niskom do srednjom kohezijom<br>ili tlo pretežno meke do čvrste konzistencije<br>$V_{s,30} < 180$ , $N_{SPT,30} < 15$ za nekoherentna tla<br>$c_{u,30} < 70 \text{ kN/m}^2$ za koherentna tla   |
| <b>E</b>  | profil tla sadrži sloj aluvija na površini s $V_{s,30}$ kao za C ili D<br>debljina slojeva varira između 5 – 20 m<br>ispod se nalaze krući slojevi s $V_{s,30} > 800 \text{ m/s}$   |

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>S<sub>1</sub></b> | slojevi s najmanje 10 m mekane gline ili praha<br>visoki indeks plastičnosti ( $I_p > 40$ )<br>visoki sadržaj vlage<br>$V_{S,30} < 100$ m/s<br>$10 < c_{U,30} < 30$ kN/m <sup>2</sup> |
| <b>S<sub>2</sub></b> | slojevi likvefabilnog tla ili senzitivne gline<br>neka druga vrsta tla koja nije u kategorijama A – E ili S <sub>1</sub>  |

Spektre odziva pojedine vrste tla prema Eurokodu 8 pri magnitudi od 5,5 po Richteru prikazuje Slika 22.



| EC8-00 TIP 1                | S    | T <sub>b</sub> | T <sub>c</sub> | T <sub>d</sub> |
|-----------------------------|------|----------------|----------------|----------------|
| tlo A $V_s > 800$ m/s       | 1,00 | 0,15           | 0,4            | 2,0            |
| tlo B $360 < V_s < 800$ m/s | 1,10 | 0,15           | 0,5            | 2,0            |
| tlo C $180 < V_s < 360$ m/s | 1,35 | 0,20           | 0,6            | 2,0            |
| tlo D $V_s < 180$ m/s       | 1,35 | 0,20           | 0,8            | 2,0            |
| tlo E ( $h < 20$ m)         | 1,40 | 0,15           | 0,4            | 2,0            |

S : spektralna vrijednost za period 0

T<sub>B</sub>, T<sub>C</sub> : granice perioda (s) za interval spektra odziva s konstantnom akceleracijom

T<sub>D</sub> : vrijednost perioda koja definira početak intervala konstantnog pomaka u spektru odziva

**Slika 22** EC8: Tip 1, spektar elastičnog odziva za 5 vrsta tala pri magnitudi 5,5 prema Richteru (ShalDYkova i dr., 2020.)

#### **6.4.1. Brzina posmičnog vala $V_{s,30}$**

Oznaka  $V_{s,30}$  predstavlja brzinu širenja posmičnih valova kroz geomedij do dubine od 30 m. Osim identifikacije koristi se i za procjenu dinamičkih svojstava određenog lokalnog tla. Krutost tla se definira pomoću modula posmika  $G_{max}$  koji se dobiva iz brzine posmičnih valova ( $V_s$ ). Deformacijska svojstva tla se generalno opisuju pomoću brzine posmičnih valova. Ovisnost brzine posmičnih valova opisana je u poglavlju 2.5. (Kvasička i dr., 2011.)

### **6.5. Elastični pojednostavljeni spektri**

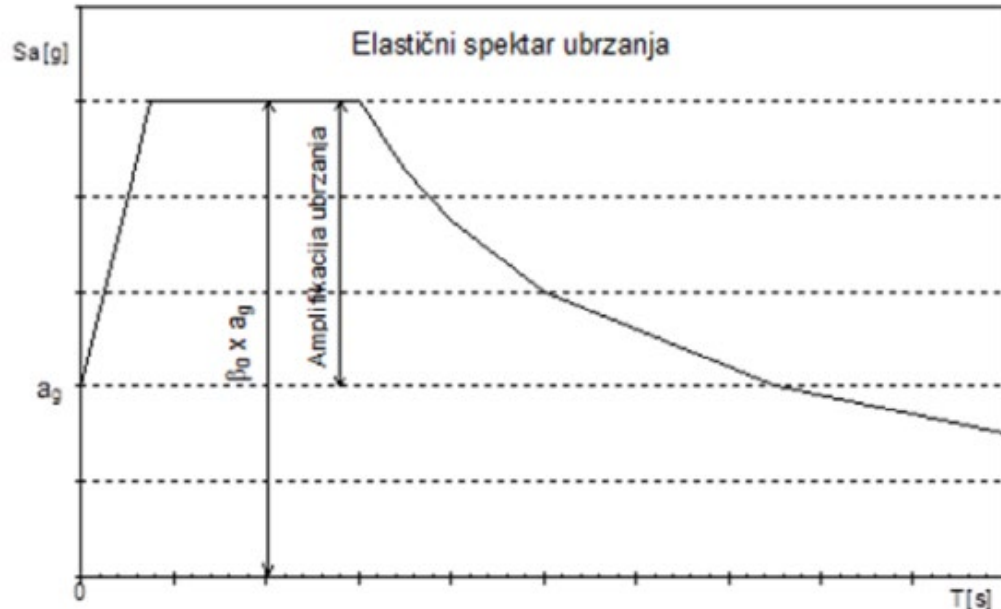
Spektar odziva geomedija na potres uglavnom je nepravilan i nepregledan, slika 12. Očitavanje rezultata, odnosno vrijednosti akceleracije, je dosta složeno, budući da znatno „osciliraju“, a ponegdje mogu biti i relativno bliske periodu vibracije (trešnje). Postoji izravna povezanost između akcelerograma i spektra odziva, odnosno jedan spektar vrijedi samo za jedan akcelerogram. Izgled samog akcelerograma nemoguće je predvidjeti, dakle prije samog seizmičkog djelovanja zapis nije poznat. Prema tome, računski je potrebno obuhvatiti mogući oblik spektra, odnosno utjecaj nekog potresa te definirati dovoljno veliki skup akcelerograma. Radi pojednostavljenja, inženjeri su odlučili kreirati „zaglađeni“ oblik, odnosno glatki spektar ubrzanja, slika 23. (Hrasnica, 2002.)

### **6.6. Projektni spektri**

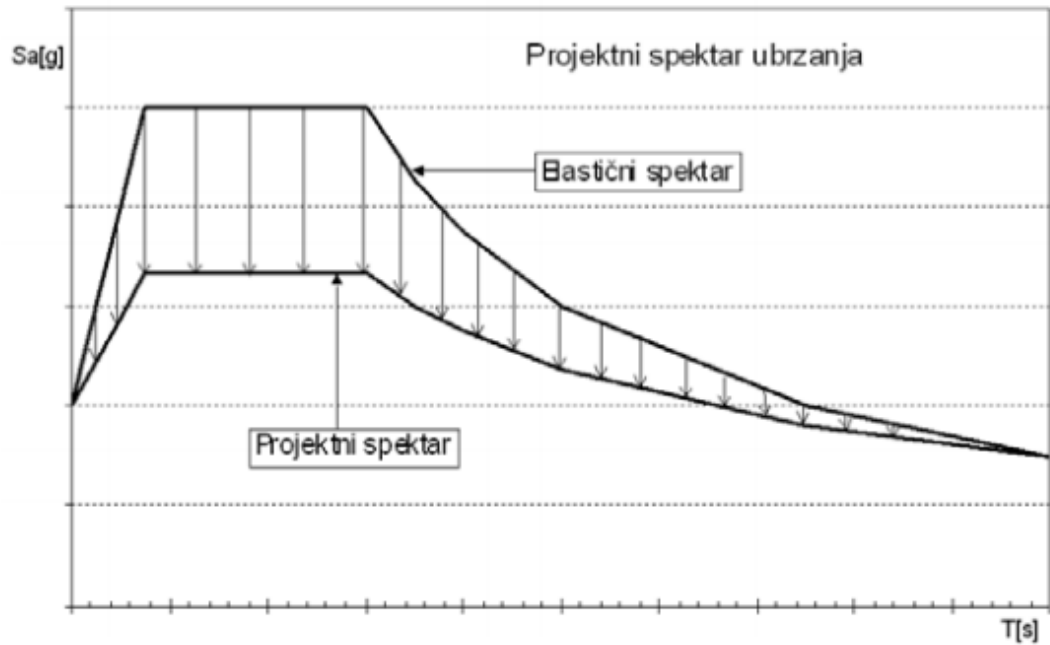
Potres se definira kao slučajno i kratkotrajno opterećenje. Tokom jačih seizmičkih djelovanja, naprezanja sastavnih dijelova (elemenata) građevine postupno se približavaju graničnoj nosivosti. Granična nosivost negdje može biti čak i dosegnuta. Ova pretpostavka realnog stanja govori o prelasku nosive konstrukcije iz linearnog u nelinearno područje spektra odziva pa je neophodno ograničenje, odnosno sigurnosni odmak od elastičnog spektra (slika 24). (Hrasnica i dr., 2018)

Seizmički odziv neke konstrukcije može se predstaviti pomoću proračunskih analiza čija je pretpostavka nelinearnost odziva pojedinih dijelova konstrukcije. Općenito, takve su vrste proračuna dosta nepraktične, pošto inženjerska praksa zahtijeva pouzdane rezultate što je prije moguće. Radi toga se u proračunске analize unosi manja nosivost nego što je realno stanje konstrukcije, da bi tokom seizmičkih aktivnosti ostala neoštećena u elastičnom dijelu odziva. (Hrasnica i dr., 2018)

Suvremeni seizmički propisi uglavnom dopuštaju projektiranje konstrukcija pomoću duktilnosti i to s različitim razinama, slika 19. Elastično ponašanje neke građevine, odnosno konstrukcije te projektni spektar izravno se tiču krutih i krutih konstrukcija. Primjerice, nosive konstrukcije poput armiranog betona i čelika mogu se projektirati tako da se u obzir uzimaju srednje i visoke razine duktilnosti. Kod srednje duktilnosti potrebno je uzeti u obzir pravila i upute navedene u Eurokodu 8, dok se kod objekata niske duktilnosti općenito primjenjuju već poznati i uobičajeni postupci dimenzioniranja i oblikovanja konstrukcija. (European Standard, 2004.)



**Slika 23** Pojednostavljeni oblik elastičnog spektra ubrzanja (Hrasnica, 2002.)



Slika 24 Projektni spektar ubrzanja (Hrasnica, 2002.)

Jedan od primarnih parametara pomoću kojih se opisuju seizmički hazardi je vršna akceleracija, odnosno PGA (engl. peak ground acceleration), koja se uzima iz karte potresnih zona. U sam proračun ulazi i projektna akceleracija tla ( $a_g$ ) koja se dobiva množenjem referentne akceleracije ( $a_{gR}$ ) s faktorom važnosti ( $\gamma_T$ ) građevine. Osim PGA, bitan je parametar i frekvencija koja ovisi o magnitudi potresa te o geotehničko-geološkim uvjetima i stanjima lokalnog tla. Projektna akceleracija tla povezana je sa svježom stijenskom masom (engl. bedrock), pa se ne odnosi na lokalno tlo u kojem može doći do amplifikacije zbog njegovih dinamičkih svojstava. (Kvasička i dr., 2011.)

Eurokodom 8 se također definira i faktor S pomoću kojeg se opisuju amplifikacijska svojstva tla, a koristi se kod spektralne analize za određene projektne spektre. Tablica 6 prikazuje faktore važnosti s obzirom na značaj i važnost građevine. (Bisch i dr., 2011.)

**Tablica 6** Faktor važnosti (Bisch i dr., 2011.)

| Kategorija građevine | Vrsta i opis građevine   | Faktor važnosti ( $\gamma_T$ ) |
|----------------------|--|--------------------------------|
| I                    | manje važne građevine<br>(poljoprivredne građevine, skladišta, itd.)   | 0,8                            |
| II                   | obične građevine   | 1,0                            |
| III                  | građevine čija seizmička otpornost je važna u pogledu posljedica uslijed kolapsa<br>(škole, dvorane, kulturne institucije, itd.) | 1,2                            |
| IV                   | građevine čiji je integritet tijekom potresa važan za civilnu zaštitu<br>(bolnice, vatrogasne stanice, elektrane, itd.)          | 1,4                            |

#### 6.6.1. Elastični projektni spektri

Prema Eurokodu 8, površina lokalnog terena opisuje se pomoću elastičnog spektralnog odziva, a njegovi su oblici jednaki za oba granična stanja. Postoje četiri vrste elastičnog projektnog spektra: i) horizontalni spektralni odziv, ii) vertikalni spektralni odziv, iii) spektralni odziv pomaka te iv) projektni spektar. (Hrasnica i dr., 2018)

U poglavlju 6.3 je pokazana važnost analize s obzirom na projektnu (projekcijsku, projektiranu) akceleraciju tla ( $a_g$ ), koja se uzima iz karte seizmičkih zona ovisno o povratnom periodu, te tip i vrstu temeljnog tla, kako su definirani europskim propisima za granično stanje „ultimate limit state“. Da bi se objasnio elastični projektni spektar odziva temeljnog tla, uvedeni su parametri triju perioda:  $T_B$ ,  $T_C$  i  $T_D$ , a također i faktor pojedinog tla  $S$ . (European Standard, 2004.)

i) Horizontalni elastični spektralni odziv služi za opisivanje horizontalne komponente gibanja tla uzrokovanog seizmičkim aktivnostima. Horizontalni elastični spektar odziva  $S_e(\mathbf{T})$  definiran je sljedećim izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

$S_e(\mathbf{T})$  predstavlja elastični spektar odziva,  $T$  period titranja sustava s jednim stupnjem slobode gibanja,  $a_g$  projektnu akceleraciju za tip tla A. Vezano uz određene tipove tla,  $T_B$  predstavlja granicu područja s konstantnom akceleracijom,  $T_C$  granicu područja s konstantnom brzinom, a  $T_D$  predstavlja granicu područja s konstantnom deformacijom.  $S$  označava faktor tla, a  $\eta$  je faktor korekcije za prigušenje s referentnom vrijednosti jednakom 1 za 5% viskozno prigušenje. Ukoliko se uzima omjer viskoznog prigušenja koji ne iznosi 5% vrijednost se uzima iz EC 8. (Bisch i dr., 2011.)

ii) Vertikalni elastični spektar odziva  $S_{ve}(\mathbf{T})$  služi za opisivanje vertikalne komponente gibanja tla, te se definira sljedećim izrazima:

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

Vrijednosti za  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  i  $a_g/a_{vg}$  mogu se pronaći u nacionalnom dodatku, odnosno propisu države u kojoj se projektira. Europska unija također definira vrijednosti vertikalne akceleracije. Oblik vertikalnog spektralnog odziva približno je isti horizontalnom spektru

s istim parametrima. Njih je moguće očitati, odnosno vidjeti u samome Eurokodu 8. Faktor  $S$  ne igra veliku ulogu kod vertikalnog gibanja tla tako da se ta vrijednost ne uzima u obzir ( $S = 1$ ). (Bisch i dr., 2011.)

iii) Elastični spektar odziva pomaka  $S_{De}(T)$  izvodi se izravno iz elastičnog spektralnog odziva horizontalne akceleracije:

$$S_{De}(T) = S_e(T) \cdot \left[\frac{T}{2\pi}\right]^2$$

Ovaj izraz se koristi ako je period titranja manji od 4 s. Kada je period dulji od 4 s postoji kompletniji izraz za elastični spektar odziva pomaka. Elastični spektar odziva pomaka definira relativni pomak između građevine i tla.

iv) Projektni spektar  $S_d(T)$  se uvodi radi izbjegavanja neelastične analize te radi uvođenja duktilnosti. Spektar odziva se smanjuje za faktor ponašanja  $q$ , koji predstavlja aproksimaciju omjera seizmičkih sila koje građevina trpi u slučaju da je odziva u potpunosti elastičan pri viskoznom prigušenju od 5%. Spektar  $S_d(T)$  za horizontalnu komponentu akceleracije dan je izrazima ( $\mathbf{a}_g = \mathbf{a}_{gH}$  horizontalna komponenta akceleracije):

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3}\right)\right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T}\right] \quad (S_d(T) \geq \beta \cdot a_g)$$

$$T_D \leq T : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2}\right] \quad (S_d(T) \geq \beta \cdot a_g)$$

Parametar  $\beta$  se tumači kao „faktor donje granice za horizontalni proračunski spektar“. Vertikalni projektni spektar se izvodi na jednak način kao i horizontalni, uvođenjem vertikalne komponente akceleracije,  $\mathbf{a}_g = \mathbf{a}_{gV}$ . (Bisch i dr., 2011.)



## 6.7. Seizmičke aktivnosti

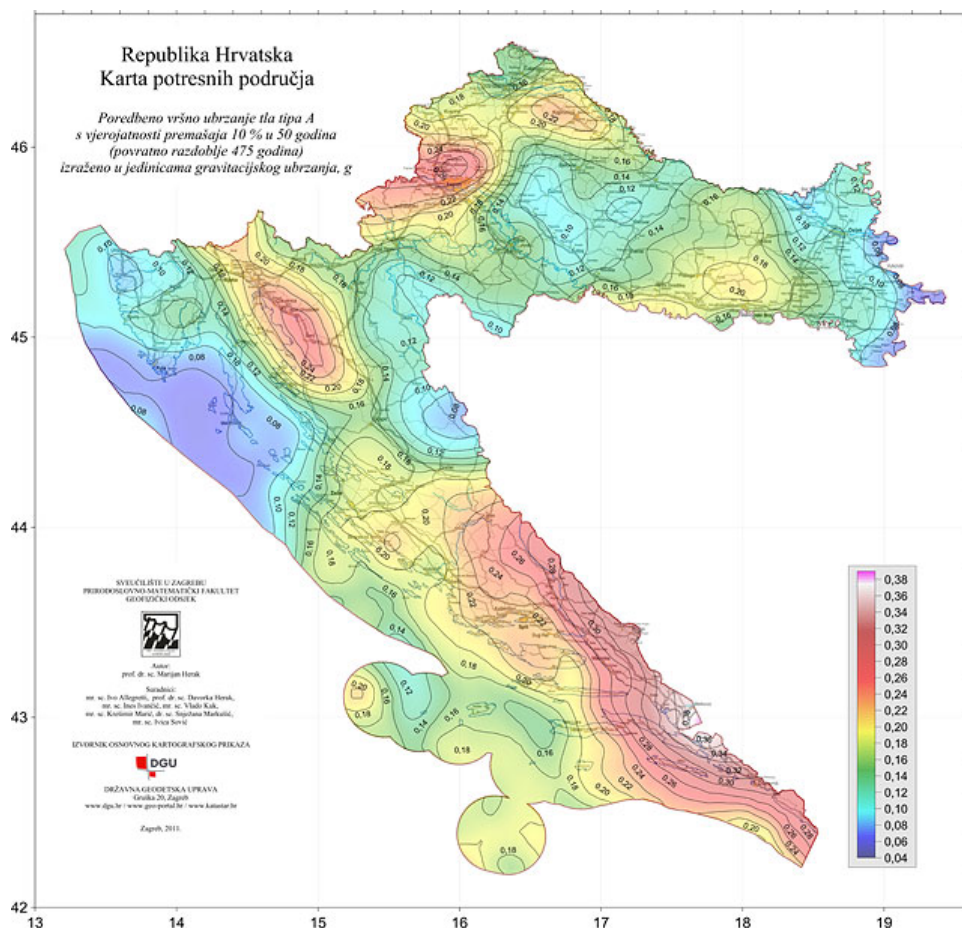
Prema prvom dijelu Eurokoda 8 (EN 1998–1, 2003), ovisno o lokalnim svojstvima tla i mogućnosti pojave različitih seizmičkih hazarda, svaka je država podijeljena na seizmička područja. Pretpostavka svake seizmičke zone je konstantnost opasnosti od hazarda, koja se opisuje kao vrijednost referentnog vršnog ubrzanja tla stijenske mase  $a_{gR}$  (ubrzanje u/na temeljnoj stijeni bez obzira na njenu dubinu zalijeganja). (Hrasnica i dr., 2018)

Eurokod 8 dijeli seizmičke aktivnosti na dva tipa potresa: i) potresi s magnitudom  $> 5,5$  po Richteru, ii) potresi s magnitudom  $< 5,5$  po Richteru. (Bisch i dr., 2011.)

Seizmička aktivnost može izazvati likvefakciju, poseban oblik seizmičkog hazarda zanimljiv i značajan za geoinženjerstvo.

## 6.8. Primjena Eurokoda 8 u Republici Hrvatskoj

Cijelo područje R Hrvatske je seizmički vrlo aktivno (Slika 25), pa su stoga seizmički utjecaji važni izvori prirodnog hazarda na kojeg se mora računati već u fazi projektiranja građevina. Sadašnjim propisima za visokogradnju glavni je cilj očuvati ljudske živote. Također se pridaje velika pažnja ekonomskim gubitcima i štetama na građevinama te stupnju uporabivosti nakon seizmičke aktivnosti. Stoga, uvođenjem Eurokoda 8, koji se temelji na svjetskom znanju i europskim iskustvima vezanim uz protupotresnu gradnju, uz kombinaciju znanja i iskustva o seizmičkoj aktivnosti u Hrvatskoj, moguće je do sigurne mjere zaštititi građevine i spriječiti ljudske i ekonomske gubitke.



**Slika 25** Seizmička karta RH (Hrvatski zavod za norme, Karte potresnih područja Republike Hrvatske)

Eurokod 8 je preporučena norma koje se neka država ne mora pridržavati, no u RH je EC8 uveden kroz Tehnički propis za građevinske konstrukcije (NN 17/2017) na temelju Zakona o gradnji (NN 153/2013) u poglavlju I.8. Projektiranje potresno otpornih građevinskih konstrukcija. Jedina bitna razlika između Eurokoda 8 i sadašnje inženjerske prakse može biti u interdisciplinarnoj ozbiljnosti provedene seizmičke analize i uvođenju lokalnih svojstava tla u proračune. (Hrvatska norma)

Prijašnje razlike opisuju Sigmund i dr. (2000.)<sup>3</sup>, pa izdvajaju način projektiranja visokogradnje s obzirom na hrvatske propise do 2008. godine (HRP08) i Eurokod 8

<sup>3</sup> Istraživanja su provedena prije uvođenja Eurokoda 8 u RH, te su financirana sa strane Ministarstva.

(EC8). Stečene navike teško se iskorjenjuju i među inženjerima pa je zato važno imati na umu način na koji se propisi i proračuni primjenjuju u praksi.

Bitna je razlika bila u tome što su HRP08 navodili na projektiranje visokogradnje tako da postoji mogućnosti nastanka šteta na nosivim konstrukcija tokom djelovanja potresa najjačeg intenziteta, pri čemu ne smije doći do rušenja. EC8 pak nalaže projektiranje i građenje na takav način da moraju biti ispunjeni uvjeti sprječavanja rušenja konstrukcije, ograničavanja stupnja oštećenja te se daje važnost objektima javne namjene koji nakon seizmičkih aktivnosti moraju biti u upotrebi. (Sigmund i dr., 2000.)

Seizmička opasnost i seizmički parametri se u principu određuju pomoću seizmičke makro i mikrorajonizacije. Osim razlike u načinu projektiranja visokogradnje, postoji razlika vezana uz seizmičnost i parametre, odnosno u parametru seizmičnosti  $q$ . Sama seizmička opasnost nastupa tokom „projektnog“ potresa, odnosno tokom djelovanja najjačeg očekivanog potresa koji u principu može pogoditi neku građevinu. Razlika u parametru seizmičnosti između HRP08 i EC8 prikazuje Tablica 7. (Sigmund i dr., 2000.) Osim o prije navedenim faktorima, važne su razlike koje nastaju zbog lokalnih uvjeta i svojstava tla. HRP08 je kao veličinu za utjecaj lokalnog tla na visokogradnju uzimao faktor seizmičnosti, što je nažalost i današnja praksa neupućenih projektanata, dok se EC8 orijentira prema maksimalnoj akceleraciji i širini spektralne akceleracije. EC8 u proračunima u obzir uzima i duktilnost cijele konstrukcije te pojedinih elemenata. (Sigmund i dr., 2000.)

Posljedice raskoraka sadržaja propisa i načina njegove provedbe u praksi su vidljive tek nakon pojave snažnijeg potresa, a do tada može biti propušteno dosta prilika za razvoj isplative i održive protupotresne gradnje.

**Tablica 7** Razlika parametra seizmičnosti  $q$  između HRP08 i EC8 (Sigmund i dr., 2000.)

| MCS  | $q$ (HRP08) | $q$ (EC8) |
|------|-------------|-----------|
| VII  | 0,025       | 0,10      |
| VIII | 0,050       | 0,20      |
| IX   | 0,100       | 0,40      |

## 7. ZAKLJUČAK

Potresna djelovanja jedna su od glavnih prirodnih hazarda današnjice, odnosno prouzrokuju štete za ljudske živote te su uzročnici oštećenja građevina.

Radi zaštite ljudskih života, održavanja rada kritičnih postrojenja (npr. nuklearne elektrane) te ograničavanja nastanka šteta na građevinama i imovini, inženjeri su pomoću svjetskih iskustava o seizmičkim aktivnostima i hazardima, kreirali europsku normu Eurokod 8. Sam Eurokod 8 je preporučena norma koje se neka država ne mora pridržavati. Što se tiče RH, uveden kroz Tehnički propis za građevinske konstrukcije (NN 17/2017) na temelju Zakona o gradnji (NN 153/2013) u poglavlju I.8. Projektiranje potresno otpornih građevinskih konstrukcija. Najveći problem korištenja Eurokoda 8 su stečene navike koje se u principu teško iskorjenjuju i među inženjerima pa je zato važno imati na umu način na koji se propisi i proračuni primjenjuju u praksi. Posljedice raskoraka sadržaja propisa i načina njegove provedbe u praksi su vidljive tek nakon pojave snažnijeg potresa, a do tada može biti propušteno dosta prilika za razvoj isplative i održive protupotresne gradnje.

## 8. LITERATURA

- [1] BigRentz, Inc. (2019.), How Earthquake-Proof Buildings Are Designed, dostupno na: <https://www.bigrentz.com/blog/earthquake-proof-buildings>
- [2] Bisch P. i dr. (2011.), Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples, Workshop „EC 8: Seismic Design of Buildings“
- [3] Camilleri D. H. i dr. (2015.), INTRODUCTION TO THE EUROCODES, Building industry
- [4] CEN (2004.), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels, Management center: rue de stassart,36
- [5] Choudhury D. (2017.), Earthquake Resistant Design of Geotechnical Structures – Theory and Practice, Dept. of Civil Engg., IIT Bombay, Mumbai, India
- [6] Civil Engineers Forum, Differential Settlement of Soil – Factors To Consider in Foundation Design, , dostupno na: <https://civilengineersforum.com/soil-settlement-foundation-design-factors/>
- [7] EarthScope ANGLE (2019.), Earthquake Hazard Maps & Liquefaction: Alaska emphasis, dostupno:[https://serc.carleton.edu/ANGLE/educational\\_materials/activities/205530.html](https://serc.carleton.edu/ANGLE/educational_materials/activities/205530.html) [30.6.2021.]
- [8] Elnashai A.S., Sarno L. Di (2008), Fundamentals of Earthquake Engineering, John Wiley and Sons
- [9] Encyclopaedia Britannica, Richter Scale, dostupno na: <https://www.britannica.com/science/Richter-scale> [5.5.2021.]
- [10] European Geosciences Union (2018.), EGU blogs, Earthquake-induced landslides and the ‘strange’ case of the Hokkaido earthquake, dostupno na: <https://blogs.egu.eu/divisions/nh/2018/10/08/earthquake-induced-landslides-and-the-strange-case-of-the-hokkaido-earthquake/> [7.7.2021.]
- [11] European Standard, EN 1998 - 5 (2004.), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, Ref. No. EN 1998-5:2004: E
- [12] Fahny, A., girl swinging and a white cat, dostupno na: <https://dribbble.com/shots/6177518-Girl-on-a-swing>

- [13] GeoSci Developers (2017.), Seismic Velocity, dostupno na:  
[https://gpg.geosci.xyz/content/physical\\_properties/seismic\\_velocity\\_duplicate.html](https://gpg.geosci.xyz/content/physical_properties/seismic_velocity_duplicate.html)
- [14] , Geotech (2019.), Foundation, dostupno: <https://www.geotech.hr/en/differential-settlements/> [3.7.2021.]
- [15] Geotech (2019.), Likvefakcija (prevrtanje građevina), dostupno:  
<https://www.geotech.hr/wp-content/uploads/2019/02/likvefakcija-naslovna.jpg>  
[20.7.2021.]
- [16] Grandić D. (2015.) Potresno djelovanje na konstrukcije i osnove proračuna i projektiranja potresno otpornih konstrukcija; Zagreb
- [17] Hrasnica M. i dr. (2018), Priručnik za Eurokodove, Eurokod 8, ISBN 978-9958-530-04-3, Hrasnica, Mustafa, COBISS.BH-ID 25695238, Prag: Češka kancelarija za standarde, mjeriteljstvo i ispitivanje, UNMZ, 2018
- [18] Hrasnica, M. (2002.), Spektri odgovora za seizmičku procjenu zgrada, Građevinar, 54 (2002) 11, 657-663
- [19] Hrvatska Enciklopedija, Potres, dostupno na:  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49792> [7.5.2021.]
- [20] Hrvatska norma ICS: 91.010.30; HRN EN 1991-1-4, drugo izdanje, prosinac 2012., zamjenjuje HRN EN 1991-1-4:2008, HRN EN 1991-1-4:2008/Ispr.1:2011
- [21] Hrvatski zavod za norme, Karte potresnih područja Republike Hrvatske, dostupno:  
<http://seizkarta.gfz.hr/>
- [22] IRIS (2007.), Epicenter: Determine Location of an Earthquake, dostupno:  
[https://www.iris.edu/hq/inclass/video/epicenter\\_determine\\_location\\_of\\_an\\_earthquake](https://www.iris.edu/hq/inclass/video/epicenter_determine_location_of_an_earthquake) [9.6.2021.]
- [23] Keefer D. K. (1984.), Landslides caused by earthquakes, Geologic Society of America Bulletin
- [24] Kim J. i Choi H. (2004.), Response modification factors of chevron-braced frames, dostupno:  
[https://www.researchgate.net/publication/222414509\\_Response\\_modification\\_factors\\_of\\_chevron-braced\\_frames](https://www.researchgate.net/publication/222414509_Response_modification_factors_of_chevron-braced_frames) [17.5.2020.]
- [25] Kramer S. L. (1996.), Geotechnical earthquake engineering; University of Washington; Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey
- [26] Kvasička P., Matešić L., Ivandić K. (2011.), Geotechnical site classification and Croatian national annex for eurocode 8, GEOFIZIKA VOL. 28, pp 83-97

- [27] Lee S. J. i dr. (2011.), Earthquake Magnitude, dostupno na:  
[https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc256/feb1\\_2012\\_magnitude](https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc256/feb1_2012_magnitude)
- [28] Liang L., Zhang J., Ba Z. (2012.), The effect of underground cavities on design seismic ground motion. Tianjin China, Tianjin University
- [29] Logično (2021.), Likvefakcija izazvana potresom, dostupno:  
<https://www.logicno.com/wp-content/uploads/2021/01/likvefakcija-izazvana-potresom-854x584.jpg> [21.6.2021.]
- [30] Meštrović D. (2016.), Potresno inženjerstvo; Zagreb
- [31] Murty C. V. R. i dr. (2012.), Some concepts in Earthquake Behaviour of Buildings, Gujarat State Disaster Management Authority, Gandhinagar
- [32] Panzera F. i dr. (2013.), Engineering seismology, Geotechnical and structural earthquake engineering, InTech
- [33] Petrović I. (2020.), Predavanja iz predmeta Mehanika tla 2, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu: Geotehnički fakultet
- [34] Poliol (2016.), Elastomerni ležajevi, dostupno:  
<https://www.poliol.com/proizvodi/konstrukcijski-lezajevi/elastomerni-lezajevi>  
[27.8.2021.]
- [35] Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizika, Seizmološki pojmovnik, dostupno na: [https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija\\_geofizike/seizmoloski\\_pojmovnik#](https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija_geofizike/seizmoloski_pojmovnik#)
- [36] Prirodoslovno-matematički fakultet, Geologija (2008), dostupno na:  
<http://geol.pmf.hr/~amoro/Geologija/Predavanje9.pdf>
- [37] Prirodoslovno-matematički fakultet, Seizmološka služba (2020.), Magnituda i intenzitet potresa, dostupno na:  
[https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska\\_sluzba/o\\_potresima?@=1lrg8](https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_potresima?@=1lrg8)
- [38] Sachan A. (2015). Dynamic Properties of soils: High Strain & Low Strain Amplitude Testing, dostupno:  
[https://www.researchgate.net/publication/283496134\\_Dynamic\\_Properties\\_of\\_soils\\_High\\_Strain\\_Low\\_Strain\\_Amplitude\\_Testing](https://www.researchgate.net/publication/283496134_Dynamic_Properties_of_soils_High_Strain_Low_Strain_Amplitude_Testing) [29.6.2021.]
- [39] Santucci F. (2011.), Beyond EC8: the new Italian seismic code, University of Molise, S.A.V.A. Department; Structural and Geotechnical Dynamics Laboratory – StreGa; Campobasso, Italy; GEOFIZIKA
- [40] Shaldykova A. i dr. (2020.), Comparative Analysis of Kazakhstani and European Approaches for the Design of Shallow Foundations, Appl. Sci.



- [41] Sica S. i dr. (2002.), Seismic behaviour of geotechnical structures, ANNALS OF GEOPHYSICS, VOL. 45, N. 6, December 2002
- [42] Sigmund V. i dr. (2000.), Usporedba primjene hrvatskih propisa i Eurokoda 8, dostupno na: <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-52-2000-07-02.pdf> [6.7.2021.]"
- [43] Szavits-Nossan A. i Ivšić T. (2006), Novi eurokod 7: geotehničko projektiranje, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu: Građevinski fakultet
- [44] Šimunić Ž. i Dolanjski A. (2007.), Dinamički proračun konstrukcija na viskoelastičnim ležajevima; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; GRAĐEVINAR 59 10, 859-870
- [45] Wald, L. (2018.), USGS, Earthquake Hazards, dostupno: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/education> [1.7.2021.]

## 9. POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Richterova ljestvica magnitude potresa (Encyclopaedia Britannica, Richter Scale).....                 | 6  |
| Tablica 2. Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS) ljestvica intenziteta potresa (PMF, seizmološka služba, 2020.)..... | 7  |
| Tablica 3 Sastavni dijelovi Eurokoda 7 i englesko nazivlje (Petrović I., 2020.)                                  | 44 |
| Tablica 4 Projektni pristupi prema Eurokodu 7 (Petrović, 2020.).....   | 48 |
| Tablica 5 Vrste tla definirane Eurokodom 8 (Bisch i dr., 2011.).....   | 53 |
| Tablica 6 Faktor važnosti (Bisch i dr., 2011.).....  | 58 |
| Tablica 7 Razlika parametra seizmičnosti q između HRP08 i EC8 (Sigmund i dr., 2000.).....                        | 64 |

## 10. POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Lociranje potresa (PMF, geologija).....   | 5  |
| Slika 2. Prostorni valovi (PMF, geofizika).....  | 9  |
| Slika 3. Površinski valovi (PMF, geofizika).....   | 10 |
| Slika 4. Geometrija uzvisine (Kramer, 1996.).....  | 13 |
| Slika 5 Podrhtavanje tla u različitim tipovima geomedija, odnosno tla (EarthScope ANGLE, 2019.).....                                     | 17 |
| Slika 6 Površinska likvefakcija (Logično, 2021.).....  | 20 |
| Slika 7 Prevrtnje građevina uzrokovano likvefakcijom tla (Geotech, 2019.).....   | 21 |
| Slika 8 Klizišta prouzrokovana seizmičkim aktivnostima na Hokkaidu, Japan (European Geosciences Union, 2018.).....                       | 23 |
| Slika 9 Vrste slijeganja građevina (Geotech).....  | 24 |
| Slika 10 Primjer akcelerograma (Hrasnica, 2002.).....  | 28 |
| Slika 11 Postupak proračuna spektra odziva potresa (Hrasnica, 2002.).....  | 28 |
| Slika 12 Spektar ubrzanja potresa za prigušenje od 5% (Hrasnica, 2002.).....   | 29 |
| Slika 13. Spektri ubrzanja potresa za više veličina prigušenja (Hrasnica, 2002.).....  | 30 |
| Slika 14 Građevine različitih dimenzija (BigRentz, Inc.).....  | 31 |
| Slika 15. Dinamička kretanja građevina možemo poistovjetiti s ljuľanjem djevojčice na ljuľjački vezanoj za granu drveta (Fahmy, A.)..... | 32 |
| Slika 16. Građevina vibrira translirajući se u x, y, z smjeru, a rotira oko x, y, z osi (Murty i dr., 2012.) .....                       | 35 |
| Slika 17. Dvije translacije u smjerovima osi x i y te jedna rotacija oko osi z (Murty i dr., 2012.) .....                                | 36 |
| Slika 18 Utjecaj prigušenja na amplitudu vibracije (Murty i dr., 2012.).....   | 37 |
| Slika 19. Odnos između duktilnosti i nosivosti građevine (Grandić, 2015.).....   | 40 |
| Slika 20 Ovisnost odziva potresa o prirodnom periodu i „njihanje“ građevina (Murty i dr., 2012.) .....                                   | 41 |
| Slika 21 Sustav Eurokodova (Petrović I., 2020.) .....  | 43 |
| Slika 22 EC8: Tip 1, spektar elastičnog odziva za 5 vrsta tala pri magnitudi 5,5 prema Richteru (Shaldykova i dr., 2020.) .....          | 54 |
| Slika 23 Pojednostavljeni oblik elastičnog spektra ubrzanja (Hrasnica, 2002.)....  | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 24 Projektni spektar ubrzanja (Hrasnica, 2002.) .....   | 57 |
| Slika 25 Seizmička karta RH (Hrvatski zavod za norme, Karte potresnih područja<br>Republike Hrvatske) ..... | 62 |