

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni študij gradbeništva,
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

Jasna Smolar

RAZISKAVE LIKVIFAKCIJE PESKOV Z LOKACIJE HE BREŽICE

Diplomska naloga št.: 3140

Mentor:

prof. dr. Bojan Majes

Somentor:

viš. pred. dr. Ana Petkovšek

Ljubljana, 2010

Stran za popravke, Errata

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-------------------	---------------------	---------	--------

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **JASNA SMOLAR** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»**RAZISKAVE LIKVIFAKCIJE PESKOV Z LOKACIJE HE BREŽICE**«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 15. oktober 2010

podpis

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 550.34: 624.15: 627.8(043.2)

Avtor: Jasna Smolar
Mentor: prof. dr. Bojan Majes
Somentor: viš. pred. dr. Ana Petkovšek
Naslov: Raziskave likvifikacije peskov z lokacije HE Brežice
Obseg in oprema: 54 str., 7 pregl., 28 sl., 8 en.
Ključne besede: likvifikacija, potres, zemljine, dinamična obremenitev, laboratorijske preiskave

POVZETEK

Pojav likvifikacije je značilen za rahle, zasičene, drobnozrnate nevezljive zemljine. Tovrstne zemljine ob monotonih, impulzivnih ali ponavljajočih se obremenitvah (npr. ob potresu) težijo k zgoščanju, kar vodi v porast pornega tlaka in posledično do izgube strižne nosilnosti.

V diplomski nalogi poskušamo preko terenskih in laboratorijskih preiskav potrditi oziroma ovreči sum na možnost pojava likvifikacije v drobnih peskih iz temeljnih tal na lokaciji energetskih nasipov za HE Brežice. Hkrati pa preverjamo tudi primernost raziskovanega lokalnega materiala za vgradnjo v energetske nasipe.

Glede na indeksne kazalnike smo poskušali izbrati reprezentativne materiale za preiskavo dinamičnih lastnosti.

S pomočjo laboratorijskih preiskav smo tako v kontroliranih pogojih določili vpliv različnih parametrov na pojav likvifikacije. Parametri, ki jih velja omeniti so količnik por, vlaga in količnik ciklične napetosti.

Rezultate laboratorijskih preiskav, dobljene na preizkušancih pripravljenih v laboratoriju smo primerjali z rezultati preiskav narejenih na intaktnih vzorcih, odvzetih iz različnih plasti poskusnega nasipnega polja.

Z laboratorijskimi preiskavami smo poskušali potrditi rezultate terenskih sondažnih preiskav in ocenili podobnost materialov iz temeljnih tal na lokaciji energetskih nasipov za HE Brežice z izbranim referenčnim materialom Toyoura peskom.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 550.34: 624.15: 627.8(043.2)
Author: Jasna Smolar
Assoc. Supervisor: Prof. Dr. Bojan Majes
Co. Supervisor: Sen. Lect. Dr. Ana Petkovšek
Title: Investigation of liquefaction potential of sands from the subsoil at the HPP Brežice
Notes: 54 p., 7 tab., 28 fig., 8 eq.
Key words: liquefaction, earthquake, soil, dynamic load, laboratory testing

SUMMARY

Phenomenon of liquefaction is characteristic for loose, saturated, fine-grained cohesionless soils. These soils tend to compact under monotonic, impulsive or repeating load (e.g. earthquake) which leads to the increase of pore water pressures and consequently to the loss of shear strength.

Using “in situ” and laboratory tests the susceptibility of liquefaction of fine-grained sands under the flood embankments of the hydropower plant Brežice is investigated in the presented thesis. Suitability of this local soil for the construction of these embankments is also checked.

With regard to index values representative material for investigation of dynamic properties of the soil was selected.

Effect of different parameters like void ratio, water content and cyclic stress ratio on the liquefaction of the abovementioned soil was checked in controlled conditions in the laboratory. Obtained results from the samples prepared in the laboratory were then compared to the results on intact samples taken from different layers of the full scale test embankment.

Results of laboratory tests were used for the evaluation of the results of in-situ investigations. Characteristics of the fine-grained sand from the hydropower plant Brežice were finally compared to Toyoura sand as a reference material.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju prof. dr. Bojanu Majesu in somentorici viš. pred. dr. Ani Petkovšek. Zahvaljujem se tudi Mateju Mačku in Miranu Mercu za pomoč in nasvete pri laboratorijskih preiskavah.

Zahvaljujem se družini in prijateljem, ki so mi stali ob strani in pomagali pri dosegu zastavljenega cilja.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	NAMEN IN CILJI NALOGE	2
3	POTRES	4
3.1	Kaj je potres?	4
3.2	Osnove teorije tektonike plošč	4
3.3	Potresni valovi	6
3.4	Jakost potresa	9
3.5	Pojavljanje potresov na posameznih lokacijah	12
3.6	Vpliv temeljnih tal na učinke potresa	13
3.7	Tsunami	14
4	UTEKOČINJENJE ZEMLJINE – LIKVIFAKCIJA	15
4.1	Dinamične lastnosti zemljin	15
4.2	Likvifikacija	15
4.2.1	Likvifikacija s tečenjem	18
4.2.2	Ciklična mobilnost	19
4.3	Pogoji za nastanek likvifikacije	21
4.3.1	Geološki pogoji	22
4.3.2	Pogoji povezani z materialom - zemljino	22
4.4	Določitev ciklične obremenitve	24
4.4.1	Količnik ciklične napetosti	24
4.5	Posledice, ki jih likvifikacija povzroči na temeljnih tleh in objektih	25
4.6	Preprečevanje likvifikacije	26
5	GEOLOŠKE ZNAČILNOSTI KRŠKE KOTLINE	27
5.1	Geološke značilnosti lokacije energetskih nasipov	27

6	EKSPERIMENTALNI DEL	29
6.1	Zasnova raziskav	29
6.2	Preiskovalne metode in oprema	29
6.3	Terenske in laboratorijske raziskave in rezultati	32
6.4	Terenske raziskave – raziskovalni jaški, odvzem vzorcev in rezultati sondažnih raziskav	33
6.5	Laboratorijske preiskave – indeksne in specialne	35
6.5.1	Vhodni parametri dinamičnih preiskav	37
6.5.2	Rezultati cikličnih strižnih preiskav	41
6.6	Poskusno nasipno polje	45
6.6.1	Meritve gostot in togosti na terenu	46
6.6.2	Laboratorijske meritve na materialih iz temeljnih tal pod nasipom in tistih odvzetih iz nasipnih plasti	46
6.7	Analiza rezultatov opravljenih raziskav	48
7	ZAKLJUČKI	50
	VIRI	51

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Hitrosti širjenja potresnih valov, izmerjena na območju Borovniškega viadukta, v različnih seizmičnih plasteh (povzeto po Car, Stopar, 2008)	8
Preglednica 2: Zveza med magnitudo in dolžino preloma (Fajfar, 1995)	10
Preglednica 3: Indeksni kazalniki lastnosti peskov, izbranih za ciklične strižne preiskave (Maček et al., 2010)	36
Preglednica 4: Maksimalni pospeški za potres z različno povratno dobo in odgovarjajoči količniki strižne napetosti. Nivo vode je na površini ($z = 0$ m).	39
Preglednica 5: Osnovne lastnosti preizkušancev	41
Preglednica 6: Rezultati preiskav v cikličnem strižnem aparatu. Obarvana stolpca zajemata bistven rezultat preiskave.	43
Preglednica 7: Rezultati preiskav likvifikacije na Toyoura pesku (Hosono & Yoshimine, 2004)	45

KAZALO SLIK

Slika 1:	Porušitev obale bohinjskega jezera ob potresu leta 1998 (osebni arhiv dr. A. Petkovšek)	2
Slika 2:	Glavne tektonske plošče in žarišča potresov na stikih plošč (www.shrani.si/f/m/wF/3bv8VIRx/vulkani.ppt , poslovenjeno)	4
Slika 3:	Shematski prikaz žarišča potresa in epicentra (http://www.yorku.ca/esse/veo/earth/sub1-10.htm , poslovenjeno)	6
Slika 4:	Prikaz gibanja zemljinskih mas pri prostorskih potresnih valovih (http://geophysics.eas.gatech.edu/classes/Geophysics/misc/Seismology.html , poslovenjeno)	7
Slika 5:	Širjenje površinskih potresnih valov (http://geophysics.eas.gatech.edu/classes/Geophysics/misc/Seismology.html , poslovenjeno)	7
Slika 6:	Projektni pospešek tal za povratno dobo 475 let (http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/projektni_pospesek_tal.html)	11
Slika 7:	Posledice potresa na Aljaski (1964, magnituda 9,2 in trajanje približno 3 minute) (http://en.wikipedia.org/wiki/1964_Alaska_earthquake)	15
Slika 8:	Posledice utekočinjena tal po potresu (Niigata, 1964) (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/quakes/niigata/niigata.html)	16
Slika 9:	Porušitev pregrade v San Fernandu po potresu leta 1971 (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what1.html)	17
Slika 10:	Kontaktne sile med zrnji v zasičenem nevezanem materialu (Johansson, 2000)	17
Slika 11:	Prerez porušene in rekonstruirane pregrade Lower San Fernando Dam, ki jo je leta 1971 prizadel potres z magnitudo 6,7 po Richterju (http://cabierta.uchile.cl/revista/8/seismic.html)	19
Slika 12:	Potres magnitude 7,5 po Richterju v Gvatemali leta 1976 (Olson, 1977). Vidne so razpoke vzporedno z reko (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html).	20
Slika 13:	Peščeni izviri kot posledica potresa z magnitudo 6,5 po Richterju v El Centru leta 1979 (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html)	21

Slika 14:	Redukcijski faktor r_d v odvisnosti od globine in število ciklov N v odvisnosti od magnitude potresa M (poslovenjeno po Kramer, 1996)	25
Slika 15:	Ciklični strižni aparat (arhiv FGG)	30
Slika 16:	Zapis poteka preiskave v fazi cikličnega obremenjevanja. Modra krivulja (CH8) prikazuje porast pornega tlaka, rdeča krivulja (CH1) ciklično strižno obremenitev, vijolična krivulja (CH2) pa horizontalne pomike.	32
Slika 17:	Karakteristični geološki prerez tal (Petkovšek et. al., 2010)	33
Slika 18:	Shematski prikaz spremenjenega poteka trase energetskih nasipov in prikaz lokalno povečane debeline peska, premoga in globokih korenin (Petkovšek et. al., 2010)	33
Slika 19:	Odnos med količnikom ciklične napetosti in korigiranim številom udarcev $(N_1)_{60}$ za v svetu potrjene pojave likvifikacije . Z rumeno barvo je na sliko dodano območje peskov v temeljnih tleh pod energetskimi nasipi za HE Brežice. (Idriss in Boulanger, 2004)	34
Slika 20:	Zrnavostna sestava preiskovanih vzorcev. Sivo polje na sliki predstavlja območje visoke nevarnosti za likvifikacijo, levo in desno od njega pa se nahaja polje potencialne nevarnosti za likvifikacijo (O'Reilly & Brown, 1991)	35
Slika 21:	Projektni pospešek tal na območju Brežic za povratno dobo potresa 475 let. (http://www.arso.gov.si , 7.4.2010)	38
Slika 22:	Zveza med magnitudo potresa in številom ciklov do utekočinjenja (Kramer, 1996, poslovenjeno).	39
Slika 23:	Obdelava rezultatov preiskave - potek ciklične strižne obremenitve v odvisnosti od časa.	42
Slika 24:	Obdelava rezultatov preiskave - potek strižne deformacije v odvisnosti od časa in porast pornega tlaka do likvifikacije.	42
Slika 25:	Rezultati cikličnega strižnega preskusa	44
Slika 26:	Krivulja zrnavosti za Toyoura sand (Hosono & Yoshimine, 2004)	45
Slika 27:	Krivulje zrnavosti za temeljna tla pod nasipom in dve nasipni plasti	47
Slika 28:	Rezultati cikličnega strižnega preskusa za intaktne preizkušance iz poskusnega nasipa primerjani z rezultati cikličnih strižnih preiskav na vzorcih iz raziskovalnih jaškov in Toyoura peskom.	48

1 UVOD

Temeljna tla v vsakdanu predstavljajo nepogrešljivo in vsem dano »podlago pod nogami«. Ljudje hodimo in se vozimo po tako ali drugače izboljšanih tleh, drevesa širijo svoje korenine globoko v tla, nekatere živali rijejo in živijo v tleh, iz tal črpamo vodo, nafto in mineralna bogastva, pomembna za življenje, iz tal rasejo rastline, ki nas hranijo in tiste ki nam lepšajo dan, in nenazadnje, iz tal rastejo tudi hiše.

Pa ne le hiše. Naj gre za stanovanjske industrijske ali javne zgradbe, prometnice, hidrotehnične pregrade ali deponije odpadkov, vselej so temeljna tla tista, ki s svojimi lastnostmi, primerno nosilnostjo, ustrezno deformabilnostjo in odpornostjo na zunanje vplive zagotavljajo, da bodo inženirski objekti v načrtovani življenjski dobi varni in funkcionalni.

Različne zemljine in kamnine, ki gradijo temeljna tla, se zelo različno odzivajo na zunanje obremenitve, ki so ali posledica naravnih dogodkov, kot so poplave, potresi, velike suše ali posledica človekovih posegov v prostor. Likvifikacija tal ob potresu, krčenje in nabrekanje zaradi sezonsko ali trajno pogojenih klimatskih sprememb, posedanje zaradi trajnega zniževanja podzemne vode so značilni primeri naravno pogojenih tveganj, ki so jim izpostavljeni inženirski objekti. Pri načrtovanju in umeščanju novih objektov v prostor je potrebno vselej raziskati lastnosti temeljnih tal in preučiti njihov morebitni vpliv na obnašanje načrtovanega objekta. To še prav posebej velja v primerih, ko za načrtovano gradnjo ni primerljivih izkušenj.

2 NAMEN IN CILJI NALOGE

V okviru naloge smo raziskali občutljivost peščeno meljastih materialov, ki se nahajajo v temeljnih tleh vzdolž trase energetskih nasipov za HE Brežice, na likvifikcijo ob potresu. Cilj naloge je bil ugotoviti, ali se energetski nasipi, ki bodo služili za zadrževanje vode v akumulacijskem bazenu bodoče hidroelektrarne, lahko varno temeljijo na naravnih temeljnih tleh, ali pa bo potrebno peščeno meljasta temeljna tla sanirati oziroma odstraniti iz temeljnih tal.

V Sloveniji do danes ni bilo nedvoumno evidentiranih in potrjenih pojavov likvifikacije v naravi. Porušitev obale bohinjskega jezera ob potresu leta 1998 (Slika 1) je bila zelo verjetno posledica likvifikacije jezerske krede, vendar podrobnejše raziskave niso bile nikoli opravljene. Tudi hude poškodbe stavb v Mali vasi pri Bovcu ob potresih v Posočju naj bi bile (sicer nepotrjena) posledica likvifikacije jezerske krede.



Slika 1: Porušitev obale bohinjskega jezera ob potresu leta 1998 (osebni arhiv dr. A. Petkovšek)

Vendar pa so tudi v Sloveniji prisotne zemljine, ki so občutljive na likvifikacijo. Kot likvifabilni so na podlagi laboratorijskih raziskav že bili opredeljeni materiali iz plazu Stovže in meljni peski iz območja bazena za HE Boštanj na spodnji Savi (Lenart, 2006).

Vse preiskave v sklopu te naloge so bile opravljene na materialu iz temeljnih tal na lokaciji bodočih energetskih nasipov za HE Brežice. Material je po naravi zelo rahel nevezljiv droben pesek, mestoma rahel meljast pesek. V obstoječem stanju na terenu je plast peska skoraj suha in nezasičena, po izgradnji bazena pa bo v celoti preplavljena. Plast peska je debela do 5 m in pripada mladim poplavnim sedimentom, ki jih je Sava v zelo neenakomerni debelini odložila vzdolž levega in desnega brega, med Nuklearno elektrarno v Krškem in bodočo pregrado za HE Brežice v Brežicah. Terenske raziskave so pokazale, da je pri sedanji gladini Save stopnja zasičenja v plasti peska izjemno nizka. Glede na visoko seizmično aktivnost Krške kotline je bil to jasen znak, da je potrebno raziskavam likvifikacije nameniti ustrezno pozornost.

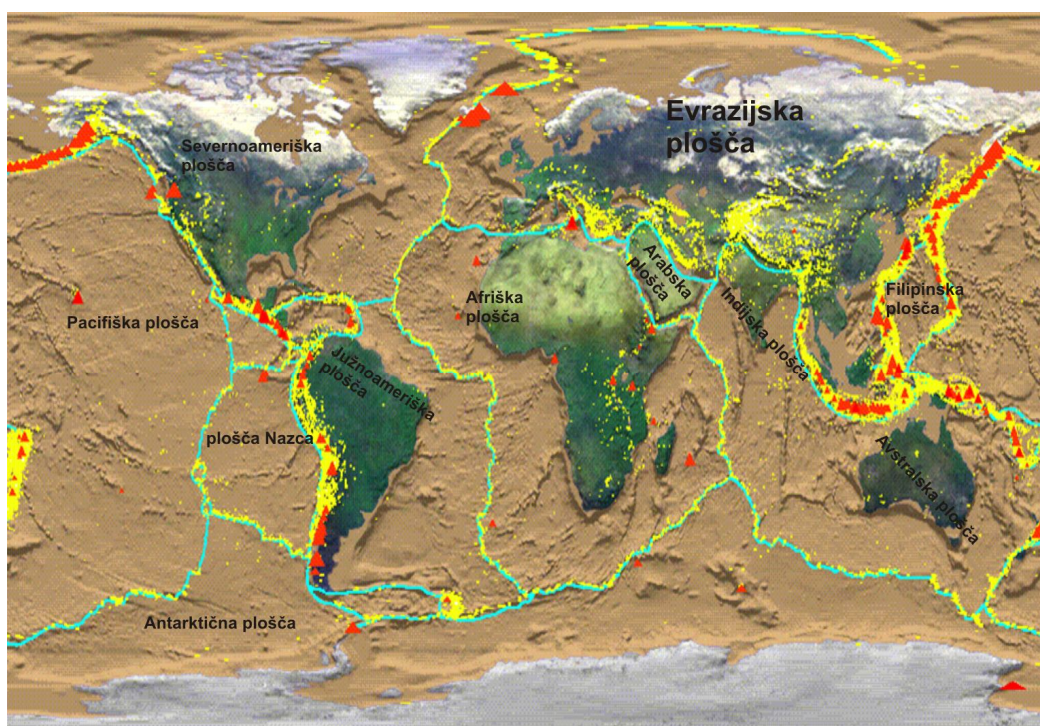
3 POTRES

3.1 Kaj je potres?

Potres je gibanje tal, ki se pojavi zaradi nenadnih premikov v Zemljini skorji ali v zgornjem delu Zemljinega plašča (Fajfar, 1995). Osnovo za oceno bodočih gibanj tal predstavljajo tako seizmološki, kot geološki podatki. Karakteristike gibanja tal na določeni lokaciji so bistveno odvisne od lokalnih karakteristik tal, ki jih določimo z geomehanskimi raziskavami.

3.2 Osnove teorije tektonike plošč

Litosfera je trdni, zunanji del Zemljinega ovoja, ki mu pripadata skorja in zgornji del plašča. Pod oceani je tanjša in meri okoli 40 km, pod kontinenti pa debelejša in meri tudi nad 70 km. Litosfera je razlomljena na posamezne plošče (Slika 2), ki se medsebojno stikajo in premikajo na različne načine: odmikajo, primikajo, drsijo druga mimo druge, tonejo druga po drugo itd.. Gibalo tektonike plošč je konvekcija v raztaljenem Zemljinem plašču.



Slika 2: Glavne tektonske plošče in žarišča potresov na stikih plošč
(www.shrani.si/f/m/wF/3bv8VIRx/vulkani.ppt, poslovenjeno)

Glavni vzrok ponavljajočih se potresov, vulkanov in nastajanja novih otočnih lokov (Slika 2) je tektonska aktivnost na stiku med ploščami. Potrese pa povzročajo naslednji procesi:

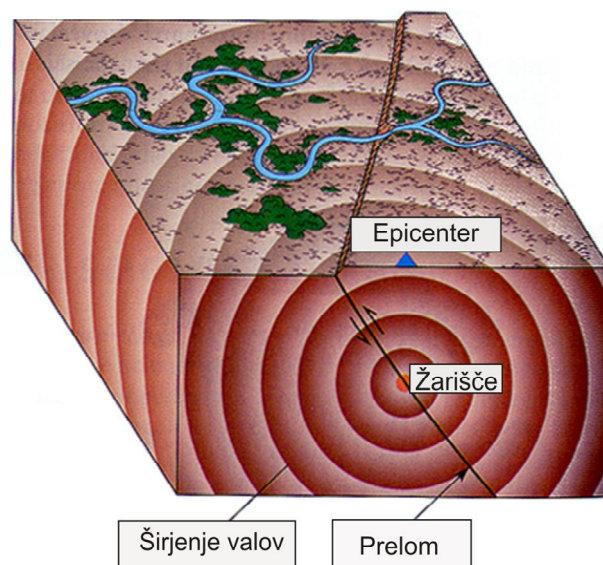
- prelomi in premiki kamninskih gmot vzdolž preloma (tektonski potresi, 90% vseh potresov)
- premiki magme (magmatski in vulkanski potresi, 7% vseh potresov)
- udorni potresi ob udorih in podorih (2.9% vseh potresov)
- posamezni potresi, ki jih prožijo človekove aktivnosti (jedrski poskusi, rudarska dejavnost, črpanje vode, vtiskanje plina ali tekočine v Zemljino notranjost, 0,1% vseh potresov). (Ocena potresne ogroženosti republike Slovenije, 2006)

Nastanek potresov pojasnjuje teorija o elastični povratni zvezi. Napetosti, ki jih povzročajo tektonske sile, v kamninskih gmotah najprej naraščajo. To se najbolj pogosto dogaja vzdolž prelomov. Povišane napetosti povzročijo deformacije kamninskih gmot. Ko napetost preseže trdnost kamnin ali trenje vzdolž preloma, pride do premika in sprostitve energije v obliki potresnih valov. Po premiku se kamninske gmote povrnejo v začetno obliko.

Potres se torej pojavi če pride do nenadnega premika med masami zemljin, ki povzročijo vibracije v kamninski masi. Jakost potresa je močno odvisna od dolžine aktiviranega preloma, katerega dolžina lahko presega 100 km.

Žarišče ali hipocenter potresa je na mestu točke sprostitve nakopičene energije iz katere izvirajo potresni valovi. Vertikalna projekcija žarišča potresa na površini Zemlje pa se imenuje epicenter. Glede na globino žarišča delimo potrese na plitve in globoke (Slika 3).

Večina potresov je plitvih (globina do 70 km). Globoki potresi z inženirskega stališča niso zanimivi, saj zaradi svoje globine (na mestih podiranja tudi do 700 km) ne povzročajo poškodb na objektih.



Slika 3: Shematski prikaz žarišča potresa in epicentra
(<http://www.yorku.ca/esse/veo/earth/sub1-10.htm>, poslovenjeno)

3.3 Potresni valovi

Pri lomu hribine se generira kinetična energija, ki se v obliki potresnih valov širi v okolico. Potresni valovi pa se ne širijo samo od žarišča potresa, temveč od celotnega aktiviranega preloma. Njihova jakost z oddaljenostjo od žarišča oz. preloma upada.

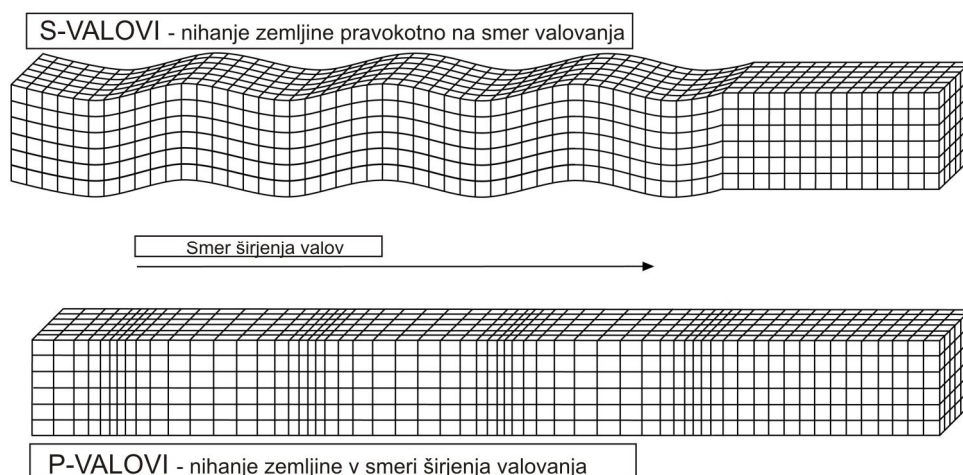
Glede na globino, na kateri se širijo, ločimo prostorske in površinske valove.

Prostorski valovi

Prostorski valovi potujejo v notranjosti Zemlje in so dveh tipov: P-valovi in S-valovi.

P-valovi, primarni, longitudinalni ali vzdolžni valovi se širijo najhitreje (4-7 km/s) in so prvi, ki jih seizmične opazovalnice zabeležijo. Na svoji poti povzročajo stisnjenje in »sproščanje« materiala. Zemljina torej niha v smeri širjenja valovanja.

S-valovi, sekundarni, strižni ali transverzalni valovi potujejo nekoliko počasneje (2-5 km/s) in povzročajo nihanje zemljine pravokotno na smer valovanja. Gibanje torej poteka v vertikalni in horizontalni smeri (Slika 4). Tekočine, ki nimajo strižne trdnosti valov, tega tipa ne morejo prenašati

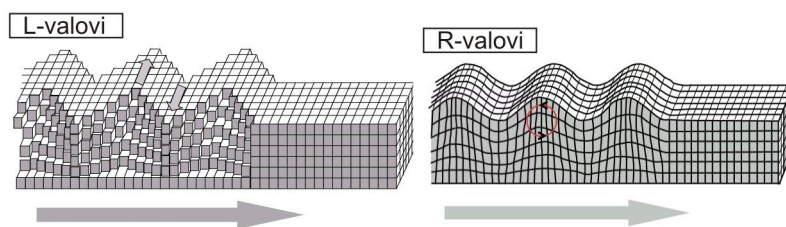


Slika 4: Prikaz gibanja zemljinskih mas pri prostorskih potresnih valovih (<http://geophysics.eas.gatech.edu/classes/Geophysics/misc/Seismology.html>, poslovenjeno)

Površinski valovi

Površinski valovi potujejo od nadžarišča po Zemljini površini ali tik pod njo z amplitudami, ki upadajo eksponentno z globino. So počasnejši od prostorskih valov in za razliko od prostorskih valov, ki povzročajo sunke in tresenje, povzročajo valujoče ali zibajoče gibanje podobno gibanju morskih valov, ki ga zaznamo le ob močnih potresih. Ravno ti valovi običajno povzročijo največ škode.

Delimo jih na R (Rayleigh) in L (Love) valove (Slika 5). Pri L-valovih delci na površini nihajo v horizontalni ravnini pravokotno na smer širjenja valovanja. Pri R-valovih pa se pojavi eliptično nihanje v ravnini pravokotno na površino.



Slika 5: Širjenje površinskih potresnih valov (<http://geophysics.eas.gatech.edu/classes/Geophysics/misc/Seismology.html>, poslovenjeno)

Hitrost širjenja valov

P in S valovi se v linearno elastičnem homogenem in izotropnem kontinuumu širijo s hitrostjo, opisano z enačbo (1) (Fajfar, 1995):

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$
$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

kjer je: E ... modul elastičnosti, ρ ... gostota, ν ... Poissonovo število, G ... strižni modul definiran z enačbo (2)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

V vseh materialih je hitrost širjenja P-valov večja od hitrosti širjenja S-valov. R-valovi so nekoliko počasnejši od S-valov, najpočasnejši pa so L-valovi.

Iz časovnega intervala, v katerem zabeležimo приход P in S valov na določeno mesto, je mogoče izračunati oddaljenost od epicentra potresa. S pomočjo kombinacije zapisov istega potresa na različnih lokacijah pa lahko izračunamo lokacijo epicentra.

Na običajne gradbene objekte imajo največji vpliv S-valovi. Hitrost slednjih pa je tudi najpomembnejša seizmična karakteristika tal. Večja kot je hitrost širjenja S-valov, boljša so tla s seizmičnega vidika (Preglednica 1).

Preglednica 1: Hitrosti širjenja potresnih valov, izmerjena na območju Borovniškega viadukta, v različnih seizmičnih plasteh (povzeto po Car, Stopar, 2008)

Seizmična plast	hitrost P-valov	hitrost S- valov
humus, grušč, pesek, glina, nasut material	0 - 1500 m/s	0 - 300 m/s
z vodo zasičeni sedimenti, razpokan karbonat, lapor	1500 - 2000 m/s	> 300 m/s
razmeroma kompaktna karbonatna kamnina	> 2000 m/s	

3.4 Jakost potresa

Magnituda

Magnituda je kvantitativna mera za jakost potresa, ki posredno meri energijo potresa. Po Richterju je magnituda enaka logaritmu z osnovo 10 maksimalne amplitude potresnih valov (v mikronih), ki so merjeni na standardnem akcelero grafu Wood-Anderson v oddaljenosti 100 km od epicentra potresa. Zaradi različne oddaljenosti akcelero grafov od epicentra potresa in različnih tipov naprav, je potrebno pri določanju magnitude upoštevati dejansko oddaljenost in dejanski akcelero graf, ter izmerjeno amplitudo prevesti na Richterjevo.

Različne seizmološke postaje dajejo različne magnitude za isti potres zaradi napak pri preračunu na Richterjevo magnitudo in zaradi različnega širjenja potresnih valov v različnih smereh.

Zveza med magnitudo in energijo

Večji del energije, ki se sprosti ob potresu, se porabi za lom materiala, premike mas zemljine ob prelomih in za ustvarjanje toplote. Manjši del energije, ki jo imenujemo tudi potresna energija ali energija potresnih valov, pa se v obliki potresnih valov širi na vse strani in povzroča gibanje tal ter poškodbe na konstrukcijah.

Zvezo med magnitudo in energijo ponazarja enačba (3) (Fajfar, 1995):

$$\log E = 4,8 + 1,5M \quad (3)$$

kjer je: M ... magnituda potresa, E ... potresna energija v Joulih

Zveza med magnitudo in dolžino preloma

Energija, sproščena ob potresu, je odvisna od dolžine aktiviranega preloma. Približna zveza med magnitudo in dolžino preloma L je prikazana v preglednici 2.

Pri potresih velikih magnitud se velika energija sprošča na dolgem prelomu, zato ima potres vpliv na velikem območju. Amplitude nihanja tal pod posameznimi objekti v bližini epicentra rastejo z magnitudo potresa samo do neke mere (do vrednosti 7). Nadaljnje povečanje

magnitudo ne povzroča bistvenega povečanja amplitud nihanja tal na določenih lokacijah v področju epicentra, pač pa se ob tem povečajo področja, kjer se čutijo posledice potresa.

Preglednica 2: Zveza med magnitudo in dolžino preloma (Fajfar, 1995)

Magnituda	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
L (km)	3,4	5,5	8	14	40	110	300	850	1600

Intenziteta

Intenziteta potresa je mera za posledice na objektih, v naravi in na živih bitjih. Ni odvisna samo od sproščene energije ki se odraža v magnitudi, temveč tudi od oddaljenosti od hipocentra (oz. od preloma). Na intenziteto pa vplivajo tudi lokalne geomehanske, geološke in topografske značilnosti. En potres lahko torej opredelimo z več različnimi intenzitetami v odvisnosti od lokacije področja.

Za določanje intenzitete potresa obstaja več lestvic, ki temeljijo na opazovanju objektov in živih bitij, ter sprememb v naravi v času potresa. V Evropi je najpogosteje uporabljena Mercalli-Cancani-Siebergovo potresna lestvica (MCS), ki ima 12 stopenj, uporablja pa se tudi evropska potresna lestvica EMS.

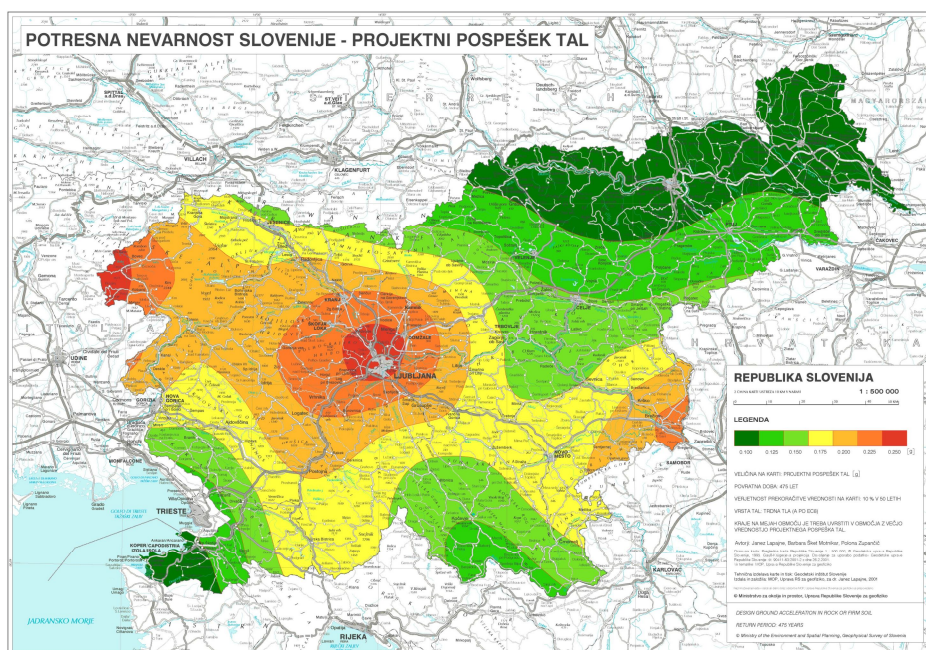
Po določitvi intenzitet se za posamezna območja narišejo izosieste, ki delijo širše območje v cone z različnimi intenzitetami.

Intenziteta potresa je praviloma največja v epicentru in z oddaljenostjo od epicentra pada. Vplivi potresa na zgradbe pa so odvisni predvsem od konstrukcijske zasnove in kvalitete izvedbe. Določanje intenzitete potresa na nenaseljenih območjih je zelo problematično.

Maksimalni pospešek tal

Maksimalni pospešek tal a_t je ena najpogosteje uporabljenih instrumentalnih mer za intenziteto potresa in praviloma upada z zmanjševanjem magnitudo in z oddaljenostjo od žarišča oz. preloma.

Maksimalne pospeške tal za posamezna območja podaja potresna karta (Slika 6). Maksimalna vztrajnostna sila na konstrukciji je enaka produktu mase in maksimalnega pospeška tal. Maksimalni pospešek tal je tako direktno proporcionalen maksimalnim fiktivnim silam ki delujejo na konstrukcijo.



Slika 6: Projektni pospešek tal za povratno dobo 475 let
(http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/projektني_pospešek_tal.html)

Temeljna karta potresne nevarnosti Slovenije je karta potresnega pospeška tal za povratno dobo 475 let, ki je izdelana v skladu z zahtevami evropskega standarda Eurocode 8 (Slika 6). Prav tako je izdelana potresna karta tudi za 1000 in 10000 letno povratno dobo potresa.

Na podlagi zgoraj navedenih potresnih kart Slovenije smo za lokacijo Krške kotline določili maksimalni pričakovani pospešek tal, ki je bil osnova za preiskave potresne (dinamične) odpornosti peskov.

Maksimalna hitrost tal

Maksimalna hitrost tal v_t je mera za jakost nihanja tal in je definirana kot enačba (4) (Newmark in Rosenblueth, 1971):

$$v_t = \frac{10^{0,3I}}{14} \quad (4)$$

kjer je v_t ...maksimalna hitrost tal, I ...intenziteta potresa

Zveza velja za intenziteto večjo od 10 in za kratko trajanje nihanja tal (močni del potresa krajši od 10 do 15 sekund).

Trajanje nihanja tal pa se povečuje z večanjem magnitude, z večanjem razdalje od žarišča potresa in na območjih s slabšimi karakteristikami tal. Nihanje tal ob potresu je tako sestavljeno iz močnega dela in nihanja z manjšimi amplitudami v začetnem delu potresa in ob koncu nihanja. Za poškodbe na objektih pa je najvažnejši močan del nihanja.

3.5 Pojavljanje potresov na posameznih lokacijah

Potresi se vselej pojavljajo v neregularnih intervalih. Z dosedanjimi raziskavami in znanji potresov še ni možno napovedati. Ravno nezanesljivost napovedi je vzrok, da napovedovanje potresov tudi ni smotno, saj bi lahko že napoved sama povzročila preplah med ljudmi in nenazadnje tudi večjo škodo kot sam potres, ki ga morebiti potem sploh nebi bilo. Najboljša zaščita pred potresom je torej potresno varna gradnja objektov .

Prav tako ne drži trditev, da šibkejši potresi napovedujejo močnejšega. V Sloveniji pričakujemo le tektonske potrese, ki so precej pogosti. Razlog za nastanek številnih šibkih in tudi močnejših potresov je zapletena geološka in tudi tektonska zgradba slovenskega ozemlja. Slovenija namreč leži na manjši Jadranski plošči, stisnjeni med Afriško ploščo na jugu in Evrazijsko ploščo na severu.

Jadranska plošča se vrti v nasprotni smeri urinega kazalca, kar povzroča predvsem na severni in vzhodni strani različna premikanja. Južna in zahodna Slovenija ležita na severnem delu Jadranske plošče, ki je zelo deformirana in narinjena na osrednji, manj deformirani del plošče. Zaradi premikanj v različnih smereh prihaja med litosferskimi ploščami do napetosti oziroma tektonskih prelomov, ki so lahko vzrok za aktiviranje potresnih žarišč. Tak prostor, kjer se stikajo različne litosferske plošče, je sredozemsko-himalajski pas, ki velja za eno od potresno najbolj aktivnih območij na Zemlji in katerega del je tudi Slovenija (Ocena potresne ogroženosti republike Slovenije, 2006).

Za leto 2008 ARSO (Potresi v letu 2008, 2008) navaja 71 potresov z magnitudo večjo od 1,5, ki jih je bilo čutiti na območju Slovenije.

Globina žarišča potresa pa je na področju Slovenije omejena z debelino skorje, saj so globoka žarišča zelo redka. Največja globina potresnih žarišč v Sloveniji je tako do 40 km. Šibki potresi se pojavljajo predvsem v globinah od 0 do 10 km, žarišča močnejših potresov pa se pojavljajo na globinah med 10 in 15 km. Iz tega lahko sklepamo, da so vsi potresni pojavi v vrhnjem delu Zemljine skorje, ki je na ozemlju Slovenije debela od 28 do 43 km.

3.6 Vpliv temeljnih tal na učinke potresa

Zaradi različnih razmer v tleh je lahko škoda na objektih zaradi potresov zelo različna. Pri šibkih potresih ta dejstva nimajo vpliva. Vplive tal in lokalnih geoloških, topografskih in hidroloških razmer lahko razvrstimo v naslednje kategorije (Ocena potresne ogroženosti republike Slovenije, 2006):

- *Vodoravna razširjenost mehkih zemljin.* Čim večje so dimenzije horizontalne razširjenosti mehkih zemljin, tem manjše so možnosti, da pride do izrazitih vplivov med osnovno podlago in nanosi. Velike kotline zapolnjene s sedimenti dajo manjše seizmične pospeške in s tem tudi sile. Primer: v Vidmu (Udine) v Italiji, ki leži na debeli in razširjeni plasti sedimentov, je bil vpliv potresov iz leta 1976 mnogo manjši kot na enakih razdaljah od epicentra v drugih smereh, kjer so te plasti zastopane le v manjših dimenzijah (Ocena ogroženosti mestne občine Ljubljana zaradi potresa, 2009),
- *Debelina nanosov* – Debelina nanosov mehkih plasti je pri izračunu potresnih vplivov zelo pomembna, saj vpliva na dinamični odziv zemljin. Z rastočo debelino nanosov raste tudi osnovna naravna perioda talnih vibracij. Debelina plasti določa, katere frekvence potresnih valov se izfiltrirajo in kako se medsebojno dušijo, to pa pomeni tudi, kakšno bo zmanjšanje amplitud seizmičnih valov.
- *Vpliv topografije oziroma reliefa* – Talni pogoji, ki vplivajo na potresne učinke na neki določeni lokaciji, so zelo različni. Nagib terena in plasti glede na osnovno hribino, spremembe v sestavi zemljin na ravnih in nagnjenih površinah, topografija osnovne hribine in stabilnost zemljin ter hribin v odvisnosti od nagiba pobočij so le nekateri dejavniki, ki lahko bistveno povečajo ali pa zmanjšajo učinke potresnih valov.

- *Podtalnica in vsebnost vode v zemljinah* – Splošno velja, da gladina podtalnice, ki je manj kot 5 m pod lokalnim površjem, vpliva na potrese tako, da jih povečuje in to kar za celo stopnjo MCS. Zelo pomembna je tudi stopnja zasičenosti zemljin z vodo. Pri določenih peščenih zemljinah in peskih pride v primeru močnejšega potresa do likvifikacije, torej utekočinjenja.
- *Vrsta in stanje tal* – Pri vrednotenju možnih potresnih vplivov je odločilna vrsta podlage in njene mehanične lastnosti. Hitrost valov v kamnini oziroma zemljini je sama po sebi odvisna od trdnostnih parametrov in gostote snovi.

3.7 Tsunami

Zaradi vertikalnih prelomov tal, ki so posledica seizmičnega delovanja, pride do pojava tsunamijev oz. cunamijev. To so valovi na morski gladini, ki nastanejo zaradi potresa, zdrsa zemeljskih tal, ognjeniškega delovanja ali padca meteorita v morje ali blizu morja. Cunamije včasih imenujemo plimni val, ker pogosto res bolj spominjajo na naraščanje morja ob plimi kot pa na lomljenje običajnih valov ob obali. Kljub vsemu pa je izraz zavajajoč, saj cunamijev ne povzroča bibavica. Čeprav je res tudi, da nimajo cunamiji navadno nič skupnega s pristanišči – navzlic prevodu japonskega izraza – pa se izraz »cunami« danes uporablja izključno za prej omenjene valove ob izrivu večjih količin morske vode in je zato pravilnejši (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Cunami>).

4 UTEKOČINJENJE ZEMLJINE – LIKVIFAKCIJA

4.1 Dinamične lastnosti zemljin

Škoda, ki jo povzroči potres na objektih je močno odvisna od odpornosti zemljine na ciklično obremenitev. Vsi objekti so temeljeni na naravnem geološkem materialu – zemljini ali kamnini, nekateri objekti; pregrade, nasipi,... pa so v celoti zgrajeni iz zemljin. Odpornost zemljin na ciklično strižno obremenitev ugotavljamo z raziskavami na terenu in v laboratoriju.

4.2 Likvifikacija

Termin »likvifikacija« (ang. Liquefaction), po slovensko »utekočinjenje« sta v literaturo vpeljala Mogami in Kubo (1953, povzeto po Kramer, 1996).

V svetu je zanimanje za pojav likvifikacije nastopilo po potresih na Aljaski (1964) in na Japonskem (1964), saj je utekočinjenje povzročilo velikansko škodo tako na objektih, kot tudi v naravi, same posledice utekočinjenja pa so bile fascinantne in šokantne (Slika 7).



Slika 7: Posledice potresa na Aljaski (1964, magnituda 9,2 in trajanje približno 3 minute) (http://en.wikipedia.org/wiki/1964_Alaska_earthquake)

Likvifikacijo ali utekočinjenje danes opišemo kot izgubo strižne trdnosti oziroma strižne nosilnosti zasičenih zemljin zaradi hipnega porasta poregga tlaka (Sliki 8 in 9). Pojav lahko enostavno obrazložimo z uporabo Terzaghijevega koncepta efektivnih tlakov.

Naraščanje poregga tlakov se kaže v zmanjšanju efektivnih napetosti v zemljini (5):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (5)$$

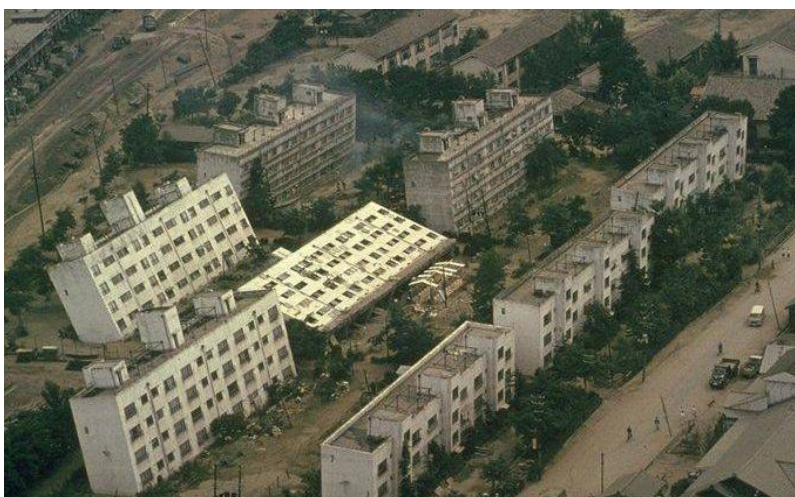
kjer je: σ' ...efektivne napetosti v zemljini, σ ...totalne napetosti v zemljini in u ...poregga tlak

Pričetek likvifikacije oz. izgubo strižne trdnosti zemljine pa ponazarja enačba (6). Kadar poregga tlak doseže velikost začetnih efektivnih napetosti se izgubi vsa medzrnsko trenje v zemljini in s tem tudi strižna trdnost.

$$\tau_f = \sigma' \cdot \tan \varphi \quad (6)$$

kjer je: τ_f ...strižna trdnost zemljine, φ ...strižni kot zemljine

Likvifikacijo lahko sprožijo monotone, impulzivne ali ponavljajoče se obremenitve (npr. prehod težkega vlaka, eksplozija, potres), ki v rahli, zasičeni zemljini povzročijo porast tlaka poregga vode, ki se ne more dovolj hitro drenirati. Do pojava likvifikacije načeloma lahko pride v vsaki saturirani zrnati zemljini, vendar pa so za pojav najbolj občutljive rahle, srednje do drobno granulirane nevezljive zasičene zemljine, ki so obremenjene v nedreniranih pogojih.



Slika 8: Posledice utekočinjena tal po potresu (Niigata, 1964)

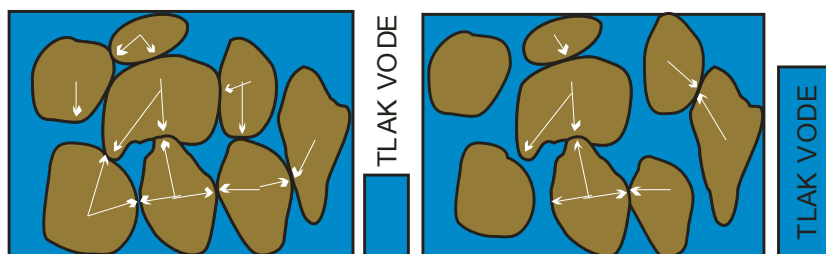
(<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/quakes/niigata/niigata.html>)



Slika 9: Porušitev pregrade v San Fernandu po potresu leta 1971
(<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what1.html>)

Iz enačbe (6) je vidno, da je strižna trdnost zemljine odvisna od efektivnih napetosti. Če porni tlak narašča, se efektivna napetost pri konstantnem totalnem tlaku znižuje. V trenutku, ko porni tlak naraste do vrednosti, ki je enaka totalnim napetostim ($u = \sigma$), se efektivne napetosti (σ') zmanjšajo na nič ($\sigma' = 0$), posledica tega je, da se tudi strižna odpornost zmanjša na nič ($\tau = 0$), zemljina se obnaša kot tekočina oziroma se utekočini.

Splošno znano je, da goste zemljine težijo k rahljanju. V primeru likvifikacije pa je pojav obraten - rahle zemljine težijo k zgoščanju. (V primeru da imamo opravka z gostim peščenim materialom se ta pod vplivom strižnega obremenjevanja postopoma rahlja. Ravno nasprotno pa rahel peščen material pod obtežbo teži k zmanjšanju prostornine, ki se lahko zgodi samo na račun zmanjšanja deleža por.)



Slika 10: Kontaktne sile med zni v zasičenem nevezanem materialu (Johansson, 2000)

Opisan pojav je grafično ponazorjen na sliki 10. V dvofaznem sistemu, zgrajenem iz zrn zemljine in por, so vse pore zasičene z vodo. Bele puščice prikazujejo kontaktne sile med zrn, njihova dolžina pa ponazarja velikost sile, s katero delujejo zrna drugo na drugega.

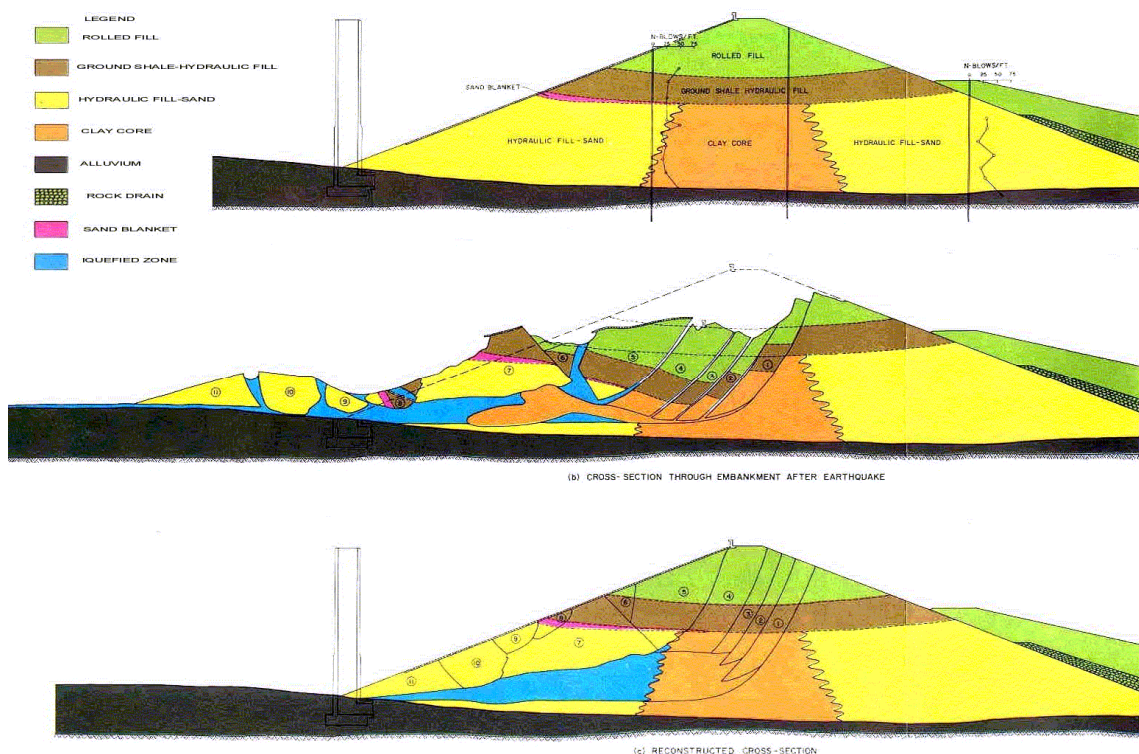
Privzemimo, da dreniranje ni možno. Zunanja obtežba povzroči na začetni strukturi materiala manjše medsebojne premike zrn, ki s tem težijo k zmanjšanju volumna. Ker se voda ne more drenirati, naraste porni tlak. Kontaktne sile med zrn pa se manjšajo dokler se ne izničijo. Zrna naposled izgubijo medsebojni kontakt, zemljini upade trdnost in se začne obnašati kot tekočina.

Pri določenem deležu por, ki mu pravimo tudi kritični količnik por, pesek ali drug nekoherenten drobnozrnat material izpostavljen ciklični obremenitvi ne spreminja svoje poroznosti. Zemljine, s količnikom por večjim od kritičnega količnika por pa so označene kot tiste, pri katerih ob primernih pogojih obstaja nevarnost likvifikacije.

4.2.1 Likvifikacija s tečenjem

Likvifikacija s tečenjem (ang. flow liquefaction) se kaže v obliki splazitve utekočinjene zemeljske mase (Slika 9 in Slika 11).

Strižna trdnost zemljine je v fazi likvifikacije s tečenjem nižja od strižne napetosti v statičnem ravnovesju, kar je tudi vzrok za splazitev zemeljske mase. Četudi v kritičnem trenutku na zemljino ne bi delovala nobena dodatna zunanja obtežba, je padec strižne trdnosti tolikšen, da nova vrednost ne zadošča niti za vzdrževanje začetnega statičnega ravnovesja. Velike premike utekočinjene zemeljske mase v primeru likvifikacije s tečenjem dejansko povzročajo statične strižne napetosti, ki so bile prisotne v zemljini že pred utekočinjenjem.



Slika 11: Prez razrušene in rekonstruirane pregrade Lower San Fernando Dam, ki jo je leta 1971 prizadel potres z magnitudo 6,7 po Richterju (<http://cabierta.uchile.cl/revista/8/seismic.html>)

Likvifikacijo s tečenjem lahko razdelimo na 2 koraka:

- generiranje poreznega tlaka v območju malih deformacij. Ta zmanjša efektivno napetost in povzroči premik napetostne poti v smeri mejne črte FLS (meja med stabilnim in nestabilnim napetostnim stanjem med nedreniranim strigom). Ko napetostna pot doseže FLS, postane zemljina v hipu nestabilna.
- mehčanje zemljine do te mere, da je doseženo stacionarno stanje.

4.2.2 Ciklična mobilnost

Ciklična mobilnost nastopi, ko je statična strižna napetost nižja od strižne trdnosti zemljine v fazi likvifikacije. Pomiki zemeljskih mas zaradi ciklične mobilnosti pa so posledica sočasnega delovanja statične in dinamične obtežbe (Slika 12).



Slika 12: Potres magnitude 7,5 po Richterju v Gvatemali leta 1976 (Olson, 1977). Vidne so razpoke vzporedno z reko

(<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html>).

Ko se dinamično oz. ciklično obremenjevanje preneha, deformacije ne naraščajo več, saj je strižna trdnost utekočinjene zemljine višja od statičnih strižnih napetosti. Do pojava ciklične mobilnosti pride običajno med likvifikacijo pobočij z zelo blagim naklonom ali pa na ravnini.

Dve obliki pojava ciklične mobilnosti :

- likvifikacija v veliki globini. Vertikalna obtežba zgornjih zemeljskih plasti lahko povzroči bočno razrivanje (ang. lateral spreading). Kot posledica se v zgornjih plasteh pojavijo vertikalne razpoke. Dodatno vertikalno obtežbo lahko predstavljajo tudi objekti, ki se ob pojavu razpok običajno prevrnejo.
- likvifikacija zgornje plasti terena (temeljnih tal). V primeru ravnega terena statične horizontalne napetosti niso prisotne. Dinamična obremenitev povzroči valovanje utekočinjene vrhnje plasti brez večjih horizontalnih premikov. Dogajanje je vzpodbujeno še s strani dreniranja vode iz spodnjih plasti. Kadar so spodnje plasti zemljine debelejšje oziroma za vodo manj prepustne, se dreniranje dogaja še nekaj časa po koncu tresenja tal. Dreniranje poteka še toliko časa, da se vzpostavi hidrostatično ravnovesje.

Posledice likvifikacije zgornje plasti terena se kažejo v posedkih površja, poplavljenih nižje ležečih predelih in v razvoju peščenih izvirov (Slika 13).



Slika 13: Peščeni izviri kot posledica potresa z magnitudo 6,5 po Richterju v El Centru leta 1979 (<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html>)

Znani pogoj začetka likvifikacije po katerem porast poregga tlaka izniči začetno efektivno napetost (Seed in Lee, 1966) lahko dosežemo v gostih in rahlih zemljinah. Vendar izpolnitev tega pogoja še ne pomeni likvifikacije s tečenjem.

Ne glede na začetno stanje zemljine, ki določa kateri od obeh zgoraj opisanih fenomenov se bo razvil (likvifikacija s tečenjem ali ciklična mobilnost), je potek dogodkov odvisen predvsem od generiranja poregga tlakov.

4.3 Pogoji za nastanek likvifikacije

Do pojava likvifikacije lahko pride le v zasičenih zemljinah, ki so občutljive na likvifikacijo. Če zemljina ni občutljiva na likvifikacijo, potem ne glede na ostale dejavnike, ki lahko vplivajo na nastop obravnavanega pojava, do slednjega tudi ne bo prišlo. Prav tako pa do pojava likvifikacije ne bo prišlo, če ne bo prisoten impulz proženja likvifikacije.

4.3.1 Geološki pogoji

Pomemben vir informacij o primerih likvifikacije so zgodovinski podatki. Na podlagi slednjih tudi določamo občutljivost zemljin na obravnavan pojav. Če se pogoji v zemljini zaradi potresa ne spremenijo in zemljina ostane zasičena z vodo, lahko ob delovanju podobnega zunanjšega impulza tako kot prvič tudi v drugo pride do likvifikacije (Youd, 1984).

Prav zaradi geoloških pogojev pa se likvifikacija kljub enaki oddaljenosti od izvora, na istem območju, nekje zgodi, drugje pa ne.

Pojavu likvifikacije so podvržene predvsem različne vrste drobno zrnatih sedimentov, ki so nastali kot naplavine in usedline rek ali jezer (fluvialni in aluvialni nanosi), odložen erodiran material (plazine in melišča), nesprijet vulkanski pepel in z vetrom nanešeni materiali.

Navedene oblike sedimentacij lahko povzročijo kopičenje zrn podobnih velikosti v rahlem stanju, ki pa v primeru tresenja težijo k zgoščanju. Sedimenti s staranjem postajajo nekoliko manj občutljivi za likvifikacijo, k čemur pripomore tudi nastajanje in krepitev vezi med odloženimi delci. Veliko nevarnost za likvifikacijo predstavljajo v novejšem času tudi umetne deponije materiala, ki niso bile kompaktirane.

Ker lahko pride do likvifikacije samo v zasičenih materialih in ker je za nastanek likvifikacije merodajen pogoj, da je $u = \sigma$, so za pojav likvifikacije običajno najbolj občutljivi sloji tal nekaj metrov pod gladino podzemne vode (Kramer, 1996).

4.3.2 Pogoji povezani z materialom - zemljino

Likvifikacija je posledica porasta porenih tlakov, zmanjšanja volumna in sočasnega onemogočenega dreniranja vode. Iz tega lahko sklepamo, da so zemljine z večjim potencialom spreminjanja volumna bolj dovzetne za likvifikacijo.

Na spreminjanje volumna zemljine pa vplivajo predvsem velikost in oblika posameznih zrn, ki sestavljajo zemljino in njihov delež glede na celoto.

Nekoč se je zmotno sklepalo, da je likvifikacija omejena zgolj na peske, vendar temu ni tako.

Ishihara (1993) piše o likvifikaciji meljastih peskov, peščenih meljev in tudi povsem meljnih zemljin. Za navedene materiale velja, da naj bi bili neplastični oz. nizko plastični in brez kohezije. Likvifikacija, katere pojav je pogojen z obstojem nedreniranih pogojev (Evans in Seed, 1987), je mogoča tudi v gramoznih materialih.

Kadar govorimo o likvifikaciji, lahko govorimo tudi o glinah. Posebej značilno je utekočinjenje mehkih glin (Grande, 2002), kjer za nastanek utekočinjenja zadostuje že statična obtežba. Splošno velja, da gline niso podvržene likvifikaciji (Kramer, 1996), pač pa govorimo o izgubi njihove nosilnosti.

Kitajski kriteriji (Wang, 1979, povzeto po Kramer, 1996) definirajo zemljine za katere obstaja nevarnost likvifikacije kot tiste, ki izpolnjujejo pogoje:

- delež zrn manjših od 0,005 mm $\leq 15\%$
- zgornja meja židkosti, $w_L \leq 35\%$
- naravna vlaga, $w \geq 0,9 w_L$
- indeks konsistence, $I_C \leq 0,75$

Ti kriteriji so imeli zelo velik pomen pri preučevanju likvifikacije v zadnjem desetletju prejšnjega stoletja.

Do danes pa je naraslo število dokazov, da so za likvifikacijo dovzetni tako neplastični kot tudi plastični drobnozrnati materiali. Zadnje ugotovitve (Guo in Prakash, 2004) kažejo na obstoj kritične vrednosti indeksa plastičnosti, pri katerem je odpornost zemljine na likvifikacijo najmanjša.

Evropski predpisi teh kriterijev ne povzemajo v celoti. Opozarjajo pa na prisotnost nevarnosti pojava likvifikacije v odvisnosti od deleža glinenih oziroma meljnih zrn, mejo židkosti in izmerjenim številom udarcev z SPT.

V primeru dobro granuliranih zemljin se praznine med večjimi zrni zapolnijo z manjšimi in je zaradi tega mogoča manjša sprememba volumna v dreniranih oz. manjši porast pornega tlaka v nedreniranih pogojih. Podobno velja tudi za zemljine sestavljene iz zrn z ostrimi robovi, ki se zgoščajo težje kot tiste sestavljene iz zrn z zaobljenimi robovi (Kramer, 1996).

4.4 Določitev ciklične obremenitve

Seed in sodelavci (1975) so Palmgren-Minerjevo hipotezo o kopičenju škode (Miner, 1945), ki je bila prvotno zasnovana za veliko število obremenitev z majhno amplitudo, priredili za primere majhnega števila ciklov z veliko amplitudo. Tako je postala uporabna tudi za določitev enakovredne ciklične obremenitve pri analizi likvifikacije.

Nepravilno dinamično obremenitev v zemljini zaradi potresne obtežbe nadomestimo z določenim številom ciklov uniformirane sinusne obremenitve z amplitudo $\beta\tau_{\max}$. τ_{\max} je maksimalna strižna napetost nepravilne dinamične obremenitve. Za faktor β pa Seed in sod. (1975) podajajo vrednost 0,65, ki se je v praksi tudi najbolj uveljavila. Število ciklov N uniformirane obremenitve narašča z večanjem nepravilne dinamične obremenitve in je odvisno tudi od faktorja β .

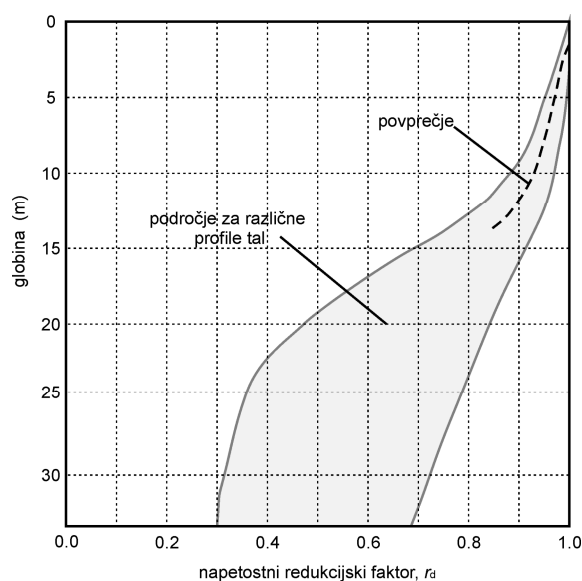
4.4.1 Količnik ciklične napetosti

Količnik ciklične napetosti (CSR) po Seed in Idriss (1971) ob predpostavki, da se plast zemljine nad izbrano globino obnaša kot togo telo, je definiran med delovanjem potresne obtežbe kot razmerje med povprečno ciklično strižno napetostjo τ_{av} in začetno vertikalno efektivno napetostjo σ'_{v0} . Z upoštevanjem faktorja $\beta = 0,65$ lahko zapišemo v obliki (7):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d \quad (7)$$

kjer je: σ_{v0} ...totalna vertikalna napetost na izbrani globini, a_{\max} ...maksimalni pospešek tal na površini, g ...težnostni pospešek, r_d ...brezdimenzijski faktor za zmanjšanje napetosti zaradi deformabilnosti zemljine nad izbrano globino.

Brezdimenzijski faktor r_d lahko kot funkcijo globine (z) določimo po sliki 14.



Slika 14: Redukcijski faktor r_d v odvisnosti od globine (poslovenjeno po Kramer, 1996)

4.5 Posledice, ki jih likvifikacija povzroči na temeljnih tleh in objektih

V uvodnem poglavju (4.2) smo že prikazali nekaj značilnih posledic likvifikacije, zabeleženih na stavbah, zemeljskih pregradah in na nepozidanih, naravnih tleh in brežinah. Kot smo omenili, že potres sam povzroči resne poškodbe na objektih, v kolikor pa ob potresu pride tudi do pojava likvifikacije, so lahko poškodbe in z njimi škoda še neprimerno večje.

Z vidika obravnave občutljivosti temeljnih tal za likvifikacijo, so pomembni naslednji vidiki možnih negativnih vplivov:

- *Nastanek peščenih izvirov.* Ob določeni vrednosti hidravličnega gradienta slednji izniči vertikalno efektivno napetost. Tok porne vode, ki je običajno usmerjen proti površju, prične s seboj odnašati tudi zrna utekočinjene zemljine (Kramer, 1996). Kadar se tok prebije skozi gornje plasti in doseže površje, govorimo o peščenem izviro.
- *Posedki površja nad tlemi,* ki so se utekočinila so posledica volumenskih sprememb, ki se zgodijo zaradi likvifikacije. Velikost posedkov je močno odvisna od gostote materiala. Literatura (Kramer, 1996) navaja, da so posedki, ki so lahko posledica utekočinjenja, vse prej kot zanemarljivi. Volumska sprememba za rahle do srednje goste peske znaša od 2-3%. Med potresom v Kobeju (1995) so posedki zaradi likvifikacije znašali od 0,5-1 m.

- *Plazovi*. Brežine, zgrajene iz zemljin, ki so se med potresom utekočinile, praviloma utrpijo velike volumske spremembe, ki jih na površini brežin opazujemo kot plazove. Če so nad brežinami temeljeni objekti, se posledice likvifikacije odrazijo tudi na porušitvi teh objektov (cest, železnic itd.).

4.6 Preprečevanje likvifikacije

Likvifikacijo lahko preprečimo z različnimi ukrepi, katerih izvedljivost in ekonomičnost je odvisna od narave objekta, ki ga gradimo in od lastnosti in lege tal, občutljivih za likvifikacijo. Med glavne ukrepe, s katerimi preprečujemo likvifikacijo sodijo:

- odstranitev in zamenjava zemljine dovzetne za utekočinjenje, pod temelji objektov,
- dodatno zgoščanje zemljine, pri katerem se količnik por zniža na vrednosti, pod kritičnim količnikom,
- dodatno vertikalno dreniranje porne vode. Grušcnati koli sodijo med pogoste ukrepe, s katerimi naj bi zmanjšali občutljivost peščenih tal za likvifikacijo.
- kemična stabilizacija
- premoščanje likvifabilnih tal s koli
- izboljšanje likvifabilnih tal z mikrokoli

Možne so tudi kombinacije posameznih ukrepov, odvisno od materiala in rabe zemljine.

5 GEOLOŠKE ZNAČILNOSTI KRŠKE KOTLINE

5.1 Geološke značilnosti lokacije energetskih nasipov

V Krški kotlini najdemo pet glavnih stratigrafskih enot: paleozoik, mezozoik, terciar, pliokvartar in kvartar. Kamnine Krške kotline in njene okolice pripadajo Dinarski karbonatni plošči (karbonatni sediment mezozojske in staroterciarne starosti) ter globokovodnemu bazenu Notranjih Dinaridov ali prehodni coni med Zunanjsimi in Notranjsimi Dinaridi (Fajfar, 2008, po Placer, 1999). Globokovodni sedimenti Notranjih Dinaridov postopoma prekrivajo plitve sedimente Zunanjsih Dinaridov. V času neogena pa so bili oboji prekriti s sedimenti Panonskega bazena.

Celotno območje krške kotline prekrivajo kvartarni prodrnato peščeni sedimenti, ki sestojijo pretežno iz karbonatnega proda in peska. Debelina muljasto peščenega proda se v krški kotlini povečuje od severa in juga proti osrednjemu delu v relativno ozkem pasu, ki se razteza v smeri vzhod – zahod in v precejšnjem delu sovпада z jedrom Krške sinklinale. Velika debelina navedenih sedimentov je lahko posledica sedimentnega tonjenja jedra sinklinale ali pa vrezovanja paleostruge Save v podlago z akumulacijo sedimentov neodvisno od položaja jedra Krške sinklinale (povzeto po Fajfar, 2008).

Tektonske in seizmološke značilnosti

Širše preiskovano območje je tektonsko precej deformirano. Krška kotlina je tektonska udorina, ki se ugreza že od zgodnjega pliocena. Najpomembnejši prelom je prečno dinarsko usmerjen levozmični Orliški prelom (Fajfar, 2008 po Brenčič (ur.), 2006) ob katerem so premaknjene pliokvartarne plasti, po vsej verjetnosti pa tudi starejša pleistocenska terasa.

Krška kotlina je med potresno najbolj dejavnimi območji v Sloveniji. O tem pričajo zgodovinski zapisi in podatki, ki so sistematizirani v potresnem katalogu (Ribarič, 1982; 1992; 1994). Potresno ogroženost območja pa ponazarjajo tudi karte potresnih žarišč in državne karte potresne nevarnosti (Lapajne et al., 2002).

Med najstarejšimi večjimi potresi na tem območju je potres iz leta 1628, ki je uničil mnogo gradov, cerkva in hiš na območju Krškega. Krško je poškodoval tudi potres leta 1632, Brežice

pa je uničil potres 8 let kasneje; t.j. leta 1640. Večji in makroseizmično razmeroma dobro opisan potres na tem območju je bil 29. januarja 1917. Makroseizmično nadžarišče potresa je bilo nekaj kilometrov severno od Brežic, največja intenziteta je bila ocenjena na VIII MSK (Ribarič, 1982), ocena globine žarišča pa okoli 13 km (Ribarič, 1982). Zadnji močnejši potres, ki je imel vpliv v območju Krške kotline, se je zgodil leta 1880 v Zagrebu. Z magnitudo 6,3 je uničil več kot 500 zgradb (The Illustrated History of Natural Disasters, 2010).

Ocena makroseizmičnih nadžarišč potresov v preteklosti je bila dokaj nenatančna in zelo odvisna od naseljenosti in krajevnih geoloških razmer. Bistveno boljše poznavanje seizmoloških značilnosti in natančnejše določanje potresnih žarišč so omogočili šele instrumentalni zapisi potresov, posebej tisti v razmeroma gosti mreži opazovalnic.

Seizmotektonske značilnosti

Na podlagi refleksijskih seizmičnih raziskav je bila ob koncu prejšnjega stoletja potrjena stara domneva (Urh, 1955) da krška kotlina ni tektonski jarek, ampak sinklinalna zgradba. Kot temeljna strukturna značilnost je prepoznano gubanje in kompresijska tektonika.

Prečno dinarsko usmerjen levozmični Orliški prelom, najpomembnejši prelom v Krški kotlini, je domnevno recentno aktiven (Brenčič et. al., 2006), zato ga je potrebno pri oceni potresne nevarnosti upoštevati kot pomemben potresni izvor.

Vendar pa je verjetnost za nastanek prelomnih pretrgov, ki bi segali do površja zanemarljiva, saj po sedanjem vedenju znani prelomi ne kažejo te zmožnosti.

6 EKSPERIMENTALNI DEL

6.1 Zasnova raziskav

V prvi fazi raziskav smo v temeljna tla na lokaciji energetskih nasipov za HE Brežice izkopal 25 raziskovalnih jaškov, 11 na levem bregu reke Save in 14 na desnem bregu. Iz slednjih smo odvzeli intaktne in razsute vzorce. Na dostavljenih vzorcih smo najprej izvedli identifikacijske preiskave.

Glede na rezultate identifikacijskih preiskav, smo izbrali tri referenčne vzorce za preiskavo občutljivosti na likvifikacijo. Iz izbranih materialov smo pripravili kompozite, ki smo jih vgradili pri naravni gostoti oz. jih statično stisnili na želeno gostoto.

Pripravljene preizkušance smo preiskovali v kontroliranih pogojih pri različnih količnikih ciklične napetosti. Preverili smo zvezo med količnikom por in likvifabilnostjo materiala.

Druga faza raziskav pa je obsegala gradnjo poskusnega nasipnega polja na lokaciji bodočih energetskih nasipov za HE Brežice. Poskusni nasip smo gradili iz lokalnega materiala, kateremu smo dodali vodo in ga kontrolirano zgoščali v posamezne plasti. Mestoma smo na posameznih plasteh izvedli meritve vlage in zgoščenosti na terenu, odvzeli pa smo tudi intaktne vzorce, na katerih smo v laboratoriju izvedli identifikacijske preiskave in preiskave likvifikacije.

Nabor rezultatov preiskav, opravljenih na kompozitih in na intaktnih vzorcih iz poskusnega nasipa, smo skrbno analizirali. Poskušali smo ugotoviti likvifabilnost naravnega materiala v temeljnih tleh pod nasipi in vgradljivost istega lokalnega materiala v energetske nasipe za HE Brežice.

6.2 Preiskovalne metode in oprema

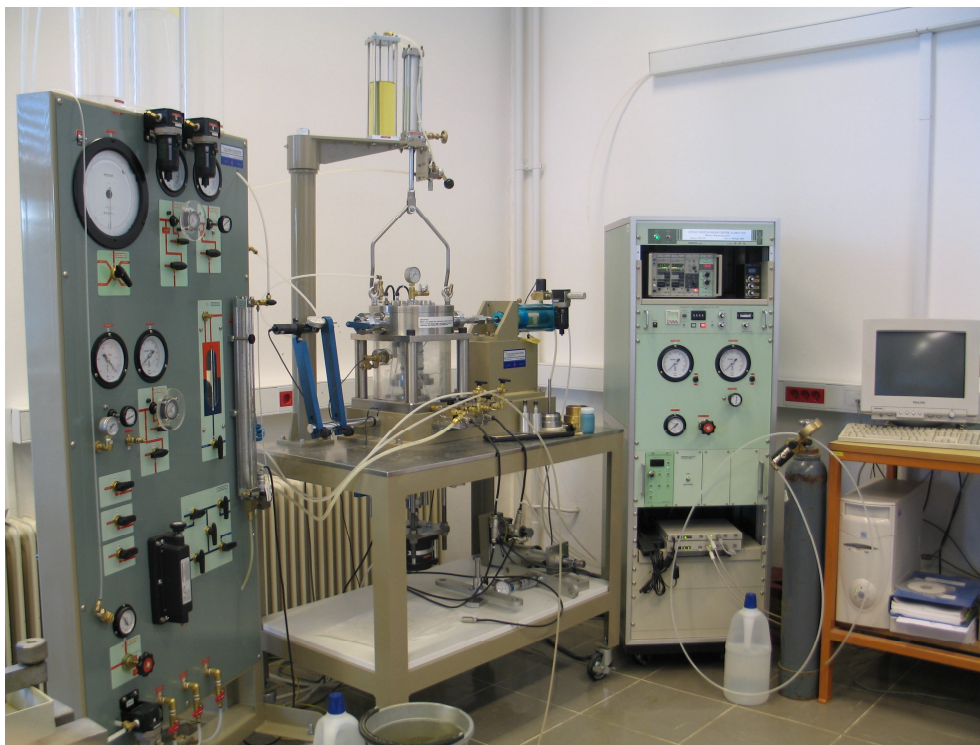
Identifikacijske metode

Identifikacijske laboratorijske preiskave, med katere uvrščamo določanje naravne vlage in gostote, določanje Atterbergovih meja plastičnosti in ugotavljanje zrnastostne sestave smo izvedli po standardih SIST EN. Za določanje največje gostote po Proctorju smo zaradi tega,

ker do izdelave te naloge ekvivalentnega SIST standarda ni bilo sprejetega, uporabili postopek DIN.

Specialne metode

Ciklični strižni preskus (Cyclic simple shear test) smo izvedli na cikličnem strižnem aparatu (Slika 15), ki je namenjen izvedbi dreniranih in nedreniranih strižnih preiskav zemljin. Meritve lahko izvajamo v statičnih pogojih (statični bat) in v dinamičnih pogojih s frekvenco obremenjevanja do 1 Hz (ciklični bat). V prvem primeru lahko merimo strižno trdnost in strižni modul z naraščajočo deformacijo, v drugem primeru pa lahko merimo spremembo togosti z naraščajočo deformacijo, trdnost materiala pri ciklični obremenitvi, obnašanje zemljine pri naraščanju števila ciklov obremenitve in odziv stanja poregna tlaka v vzorcu med ciklično obremenitvijo.



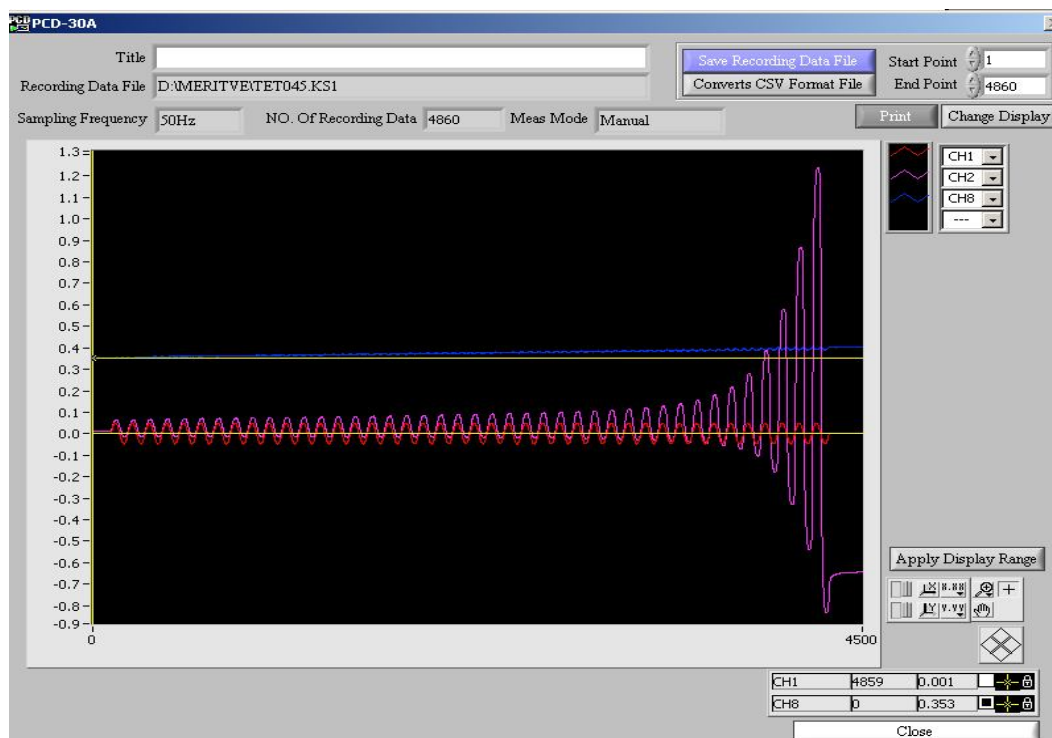
Slika 15: Ciklični strižni aparat (arhiv FGG)

Za preiskavo ni veljavnega slovenskega standarda, zato smo jo izvedli po Das (1992). Iz izbranih referenčnih materialov smo pripravili valjaste preizkušance premera 70 mm in višine 30 mm.

Preiskava je potekala v več fazah:

- *vgradnja preizkušanca v kalup* – preizkušanec smo v treh enako debelih plasteh, s pomočjo stiskalnice, statično stisnili v kalup, iz katerega smo ga nato pretisnili v napravo. V primeru preizkušancev vgrajenih v naravnem gostotnem stanju, pa smo slednje vgradili neposredno v napravo.
- *saturacija* – preizkušanec smo saturirali z ogljikovim dioksidom, ki raztaplja zračne mehurčke. Sledi saturacija z vodo, ki teče prek vzorca. V primeru vzorcev iz HE Brežice, ki so vsebovali malo fine frakcije, smo lahko saturacijo z ogljikovim dioksidom izpustili in preizkušance saturirali zgolj z vodo. Saturacija je uspešno zaključena, ko dosežemo vrednost $B > 0,95$.
- *konsolidacija* – pri izbrani hidrostatski efektivni napetosti smo preizkušanec konsolidirali.
- *ciklično strižno obremenjevanje* – pred pričetkom cikličnega strižnega obremenjevanja preizkušanca, smo izbrali ekvivalentno sinusno horizontalno (strižno) obtežbo, s katero smo v nedreniranem stanju do likvifikacije obremenjevali preizkušanec.

Pričetek likvifikacije smo definirali z vrednostjo pornega tlaka, ki znaša 95% vrednosti vertikalnega tlaka na preizkušancu po konsolidaciji oz. pred ciklično obremenitvijo. Ključna rezultata preiskave pa sta število ciklov obremenitve do likvifikacije in vrednost amplitude ciklične strižne napetosti (Slika 16).



Slika 16: Zapis poteka preiskave v fazi cikličnega obremenjevanja. Modra krivulja (CH8) prikazuje porast pornega tlaka, rdeča krivulja (CH1) ciklično strižno obremenitev, vijolična krivulja (CH2) pa horizontalne pomike.

6.3 Terenske in laboratorijske raziskave in rezultati

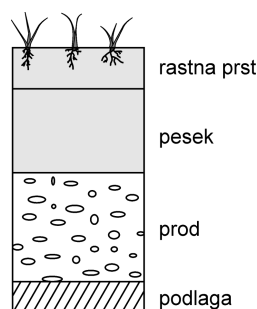
Visokovodni nasipi za HE Brežice bodo potekali vzdolž levega in desnega brega reke Save v skupni dolžini približno 13 km. Naraven teren vzdolž bodočih nasipov je raven, rahlo valovit in terasast.

Temeljna tla vzdolž bodočih nasipov so bila dobro raziskana. Terenske raziskave so obsegale:

- izvedbo raziskovalnih jaškov z vzorčenjem
- izvedbo raziskovalnih vrtin
- izvedbo penetracijskih preizkusov

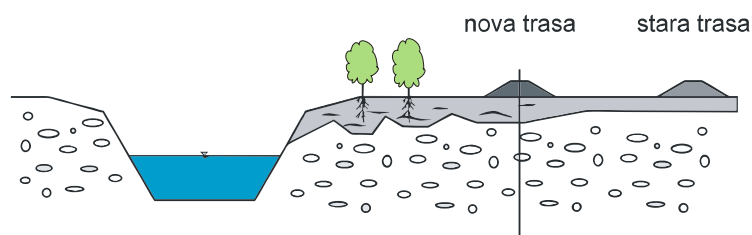
Raziskave so pokazale, da se pod vrhnjo plastjo humusa in orne zemlje nahajajo do 5 m debeli sloji rahlih sedimentov, ki jih je nanosla Sava. Ti pripovršinski sloji so zgrajeni iz peska, v katerem je dosti korenin in mestoma tudi premog.

Pod rahlimi sloji peska se nahaja od 4 do 10 m debel sloj karbonatnega proda, pod njim pa je predkvartarna podlaga iz gostega melja (Slika 17).



Slika 17: Karakteristični geološki prerez tal (Petkovšek et. al., 2010)

Debelina peščenega sloja narašča v smeri od Krškega proti pregradi HE Brežice. Plast peska je znatno debelejša v bližini struge reke Save in je večja na desnem bregu (Slika 18).



Slika 18: Shematski prikaz spremenjenega poteka trase energetskih nasipov in prikaz lokalno povečane debeline peska, premoga in globokih korenin (Petkovšek et. al., 2010)

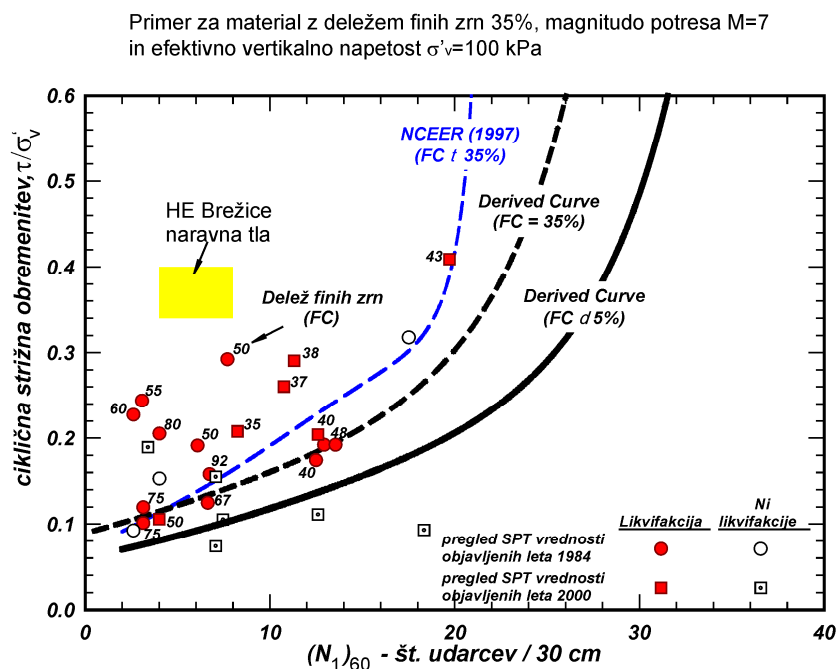
6.4 Terenske raziskave – raziskovalni jaški, odvzem vzorcev in rezultati sondažnih raziskav

Na levem bregu reke Save je bilo izkopanih 11 raziskovalnih jaškov, na desnem bregu pa 14. Iz raziskovalnih jaškov so bili odvzeti vzorci za laboratorijske preiskave.

Že na terenu pa je bilo v nekaterih jaških opaziti bogat koreninski sistem, plasti peska bogate s premogom, veliko spremenljivost debeline peščenega sloja in mestoma izjemno rahlo sestavo in nizko vlago plasti.

Terenske sondažne raziskave so pokazale, da so plasti peska izjemno rahle ($N = 2 - 8$), meritve deformacijskih modulov pa so se gibale v območju $E_{vd} < 11,3$ MPa (Petkovšek et. al., 2010).

Za številne lokacije v svetu, kjer je prišlo do pojava likvifikacije, obstajajo rezultati sondažnih raziskav SPT iz vrednoteni na korigirano število udarcev $(N_1)_{60}$. Na sliki 19 vidimo odnos med $(N_1)_{60}$ in količnikom strižne napetosti za primere ko pride do pojava likvifikacije in tudi za nekatere primere, ko likvifikacije ni bilo.



Slika 19: Odnos med količnikom ciklične napetosti in korigiranim številom udarcev $(N_1)_{60}$ za v svetu potrjene pojave likvifikacije. Z rumeno barvo je na sliko dodano območje peskov v temeljnih tleh pod energetskimi nasipi za HE Brežice. (Idriss in Boulanger, 2004)

Iz slike 19, na katero smo dorisali nabor rezultatov meritev na trasi energetskih nasipov za HE Brežice, lahko vidimo, da se lokalni peski, ki jih najdemo v temeljnih tleh pod predvidenimi energetskimi nasipi, nahajajo v območju, ki je nevarno za likvifikacijo.

6.5 Laboratorijske preiskave – indeksne in specialne

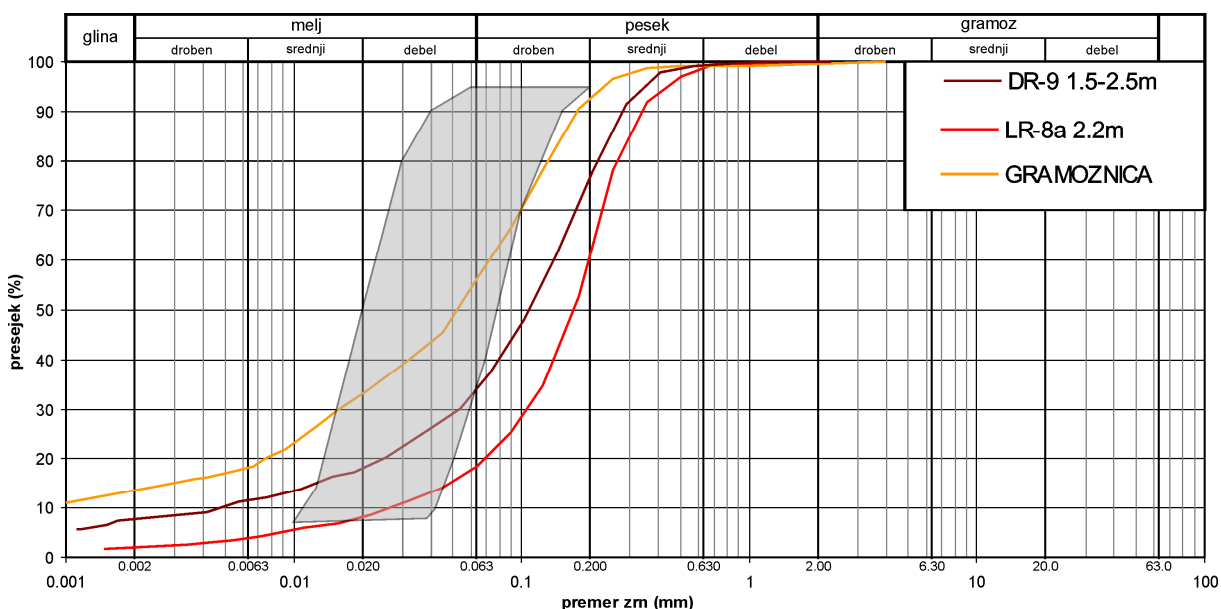
Na vzorcih, odvzetih iz raziskovalnih jaškov, smo opravili indeksne preiskave, na podlagi katerih smo izbrali potencialno najbolj nevarne materiale za likvifikacijo.

Izkazalo se je, da imajo preiskovani peski zelo širok razpon zrnastne sestave; od enozrnatega peska, do meljastih peskov, izjemoma pa najdemo tudi vključke glinaste komponente.

Primerjava naravnih količnikov por, ki so v večini primerov večji od 1, s predhodnimi preiskavami na podobnih materialih (Lenart, 2006), pokaže, da so peski iz temeljnih tal veliko bolj rahli in s tem tudi bolj likvifabilni.

Na podlagi gostote in predvsem na podlagi zrnastne sestave so bili izbrani trije referenčni vzorci za določitev dinamičnih lastnosti (Slika 20):

- meljast gramoz s 50% finih zrn – GRAMOZNICA
- meljast gramoz s 35% finih zrn – DR-9, 1,5-2,5 m
- meljast gramoz z 20% finih zrn – LR-8a, 2,2 m



Slika 20: Zrnastna sestava preiskovanih vzorcev. Sivo polje na sliki predstavlja območje visoke nevarnosti za likvifikacijo, levo in desno od njega pa se nahaja polje potencialne nevarnosti za likvifikacijo (O'Reilly & Brown, 1991)

Izbrani peski iz temeljnih tal na lokaciji energetskih nasipov za HE Brežice se z vidika zrnastostne sestave nahajajo v območju potencialno nevarnem za likvifikacijo, kljub temu, da niso zelo uniformni in vsebujejo znaten delež finih frakcij, ki nekoliko znižujejo težnjo po hitrem spreminjanju volumna in s tem porastom pornega tlaka ob ciklični obremenitvi.

Temeljna tla in nasipne zemljine je potrebno ob pripravi temeljnih tal in ob vgradnji v nasipe primerno zgostiti. Pri zgoščanju se poveča strižni kontakt med zrnjem, zmanjša se volumen por, kar vpliva na višjo strižno trdnost, manjšo deformabilnost in večjo odpornost na utekočinjenje.

Sposobnost zgoščanja zemljin pri neki energiji pa je močno odvisna od vlage. Tako obstaja vlaga (w_{opt}), pri kateri je možno zemljino kar najboljše zgostiti. Standardni Proctorjev preskus (SPP) je namenjen določitvi optimalne vlažnosti zemljine v temeljnih tleh oz. za vgradnjo v nasipe.

Izkazalo se je, da se kljub naravnemu rahlemu stanju materiala, slednji zgošča ob primerni količini vode (Preglednica 3).

Preglednica 3: Indeksni kazalniki lastnosti peskov, izbranih za ciklične strižne preiskave (Maček et al., 2010)

	GRAMOZNICA	DR-9, 1,5-2,5 m	LR-8a, 2,2 m
Naravna gostota, ρ (t/m^3)	1,30	1,28	1,23
Naravna vlaga, w (%)	5,06	16,3	21,5
Naravni količnik por, e_0	1,20	1,38	1,61
Optimalna vlaga, w_{opt} (%)	17,4	15,0	27,5
Maksimalna suha gostota, $\rho_{d,max}$ (t/m^3) (SPP)	1,65	1,77	1,34
Nasipna gostota, ρ_{min} (t/m^3)	1,11	1,17	1,01
Maksimalni količnik por, e_{max}	1,38	1,26	1,61

Če primerjamo naravne količnike por, določene na izbranih vzorcih (Preglednica 3), z rezultati predhodnih študij, opravljenih na sorodnih materialih (Lenart, 2006, IZIIS, 1985), so peski iz temeljnih tal, pod predvidenimi energetskimi nasipi za HE Brežice, veliko bolj rahli in zato tudi bolj dovzetni za likvifikacijo.

Količniki por, ki so doseženi po zgoščanju so nižji od tistih, ki jih kot kritične za likvifikacijo navaja Lenart (2006). Vrednost, ki jo podaja v svojem delu je $e_{kr}=0,71$, kar je višje od srednje vrednosti $e_{kr}=0,55$, ki jo je kot referenčno postavil GI Zagreb (1984), v študiji za NE Prevlaka.

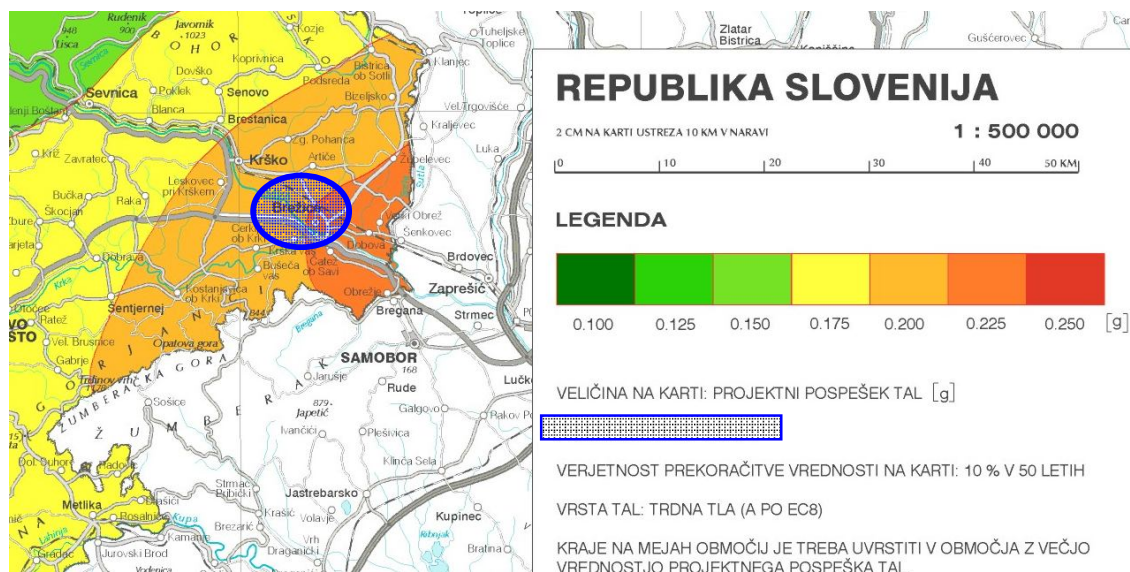
6.5.1 Vhodni parametri dinamičnih preiskav

Za vrednotenje občutljivosti materiala na utekočinjenje so merodajni:

- magnituda potresa
- količnik ciklične strižne napetosti
- število ciklov (N), ki povzroči utekočinjenje zemljine z znanim začetnim količnikom por in ob izbrani ciklični strižni obremenitvi.

Po potresni karti Slovenije je območje med Krškimi in Brežicami v coni, ki velja za eno izmed potresno najbolj aktivnih v Sloveniji. Projektni pospešek tal za obravnavano cono, ki ga podaja karta potresne nevarnosti Slovenije za povratno dobo potresa 475 let, znaša 0,225g (Slika 21).

Prav tako, kot za povratno dobo potresa 475 let, sta izdelani karti potresne nevarnosti Slovenije tudi za potres s povratno dobo 1000 let in 10000 let. Projektni pospešek tal na območju Brežic, za povratno dobo 1000 let znaša 0,250g, za povratno dobo 10000 let pa 0,500g.

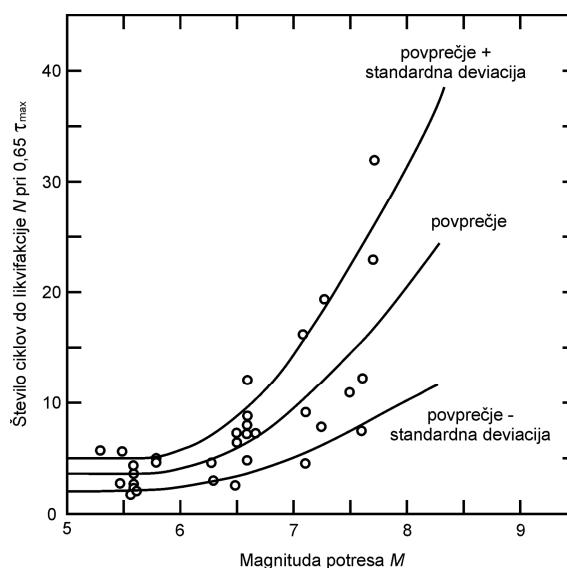


Slika 21: Projektni pospešek tal na območju Brežic za povratno dobo potresa 475 let. (<http://www.arso.gov.si>)

Izračun količnikov ciklične napetosti $\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}}$ smo izvedli po enačbi (7) podani v tč. 4.4.1.

Napetostni redukcijski faktor r_d je odvisen od globine. Na površini temeljnih tal je njegova vrednost 1,0, na globini 10 m pa znaša 0,9 (Slika 14).

Število ciklov obremenitve, ki jih mora do likvifikacije prenesti material, je odvisno od magnitude potresa, ta pa od povratne dobe potresa. Za 10000 letno povratno dobo potresa tako ocenjujemo magnitudo 7,5, oziroma potrebno število ciklov do likvifikacije 20, za 1000 letno povratno dobo ocenjujemo magnitudo potresa 6,75 in potrebno število ciklov do likvifikacije 10, za 475 letno povratno dobo pa magnitudo 6,5 oziroma potrebno število ciklov do likvifikacije 8 (Slika 22).



Slika 22: Zveza med magnitudo potresa in številom ciklov do utekočinjenja (Kramer, 1996, poslovenjeno).

Glede na vhodne parametre, smo po enačbi (7) izračunali količnike ciklične strižne napetosti. Izkaže se, da so količniki ciklične strižne napetosti odvisni od gostotnega stanja materiala (Preglednica 4).

Preglednica 4: Maksimalni pospeški za potres z različno povratno dobo in odgovarjajoči količniki strižne napetosti. Nivo vode je na površini ($z=0$ m).

povratna doba (let)	a_{max}	τ_{av} / σ'_{v0}					
		GRAMOZNICA		LR-8a 2,2m		DR-9 1,5-2,5 m	
		naravna gostota	nabit na 95% D_{pr}	naravna gostota	nabit na 95% D_{pr}	naravna gostota	nabit na 95% D_{pr}
475	0,225	0.34	0.30	0.39	0.34	0.35	0.29
1000	0,250	0.38	0.33	0.43	0.38	0.39	0.32
10000	0,500	0.75	0.66	0.87	0.76	0.77	0.64

Iz enačbe po Seed in Idriss (1982) izhaja, da so za rahle sloje peska merodajni višji količniki ciklične strižne napetosti, kar je posledica nižje efektivne gostote ρ'_d . Zgoščenost zemljine pa tudi povečuje odpornost na likvifikacijo.

Vzorec iz GRAMOZNICE, ki je bil po indeksnih kazalnikih podoben večjemu številu vzorcev iz raziskovalnih jaškov smo pripravili v treh gostotnih stanjih:

- 100% zgoščenost po Proctorju (količnik por pred strigom $e_s = 0,68$)
- 92% zgoščenost po Proctorju (količnik por pred strigom $e_s = 0,81$)
- naravna gostota (količnik por pred strigom $e_s = 1,01$)

Z določitvijo dinamičnih lastnosti raščenih peščenih tal (oznaka naravna gostota) smo želeli pokazati, ali rezultati laboratorijskih testov sovpadajo s terenskimi sondažnimi preiskavami. Z zbitimi preizkušanci pa smo želeli določiti potrebno gostoto pri kateri do pojava likvifikacije ne pride.

Vzorca LR-8a, 2,2 m in DR-9 smo glede na rezultate preiskav na vzorcu iz GRAMOZNICE preiskovali le v zbitem stanju.

Preizkušance naravne gostote smo vgrajevali neposredno v napravo, zbite preizkušance pa smo statično stisnili s pomočjo stiskalnice v kalup in jih nato vgradili v napravo. Preglednica 5 podaja osnovne lastnosti vseh preizkušancev, ki smo jih preiskali v cikličnem strižnem aparatu.

Preglednica 5: Osnovne lastnosti preizkušancev

Vzorec	Ob vgradnji		Ob obremenitvi				
	w_z (%)	ρ_{dz} (t/m ³)	B	ρ_{dstrig} (t/m ³)	e_s	D_{pr} (%)	$\Delta\sigma'_v$ (kPa)
LR-8a 2.2 m	28,5- 31,5	1,19- 1,24	0,94-1,00	1,21- 1,26	0,96-1,0	90-94	75
	18,3- 18,9	1,50- 1,60	0,90-0,96	1,60- 1,67	0,58- 0,65	97- 101	50
GRAMOZNI CA	19,3- 21,4	1,06- 1,32	0,94-0,97	1,37- 1,39	0,90- 0,93	83-84	75
	17,0- 19,8	1,42- 1,50	0,90-0,96	1,51- 1,52	0,73- 0,75	92	75
DR-9 1,5-2,5 m	12,8- 15,0	1,54- 1,64	0,91-1,00	1,65- 1,67	0,66- 0,70	94-95	75
	19,0- 19,6	1,60- 1,61	0,94-1,06	1,62- 1,63	0,71- 0,72	92-93	75

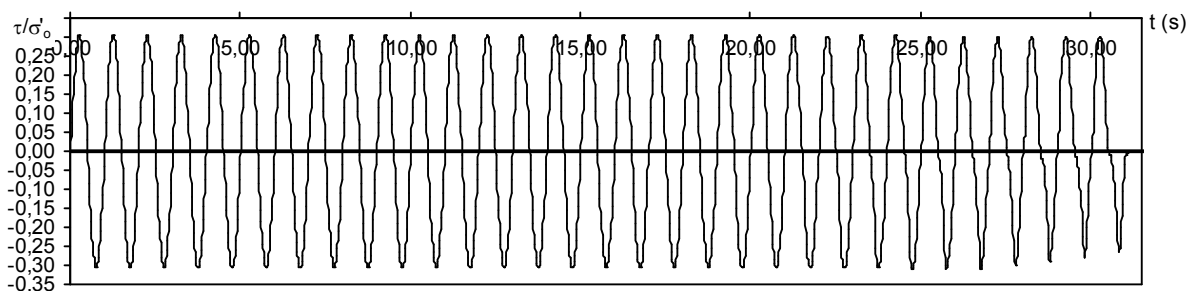
kjer so: w_z ... vlaga ob vgradnji, ρ_{dz} ... gostota ob vgradnji, B ... Skemptonov parameter saturacije, ρ_{dstrig} ... gostota po konsolidaciji (pred ciklično obremenitvijo), e_s ... količnik por po konsolidaciji, D_{pr} ... zgoščenost po SPP po konsolidaciji, $\Delta\sigma'_v$... vertikalna napetost (efektivna srednja napetost) ob konsolidaciji in ciklični obremenitvi

6.5.2 Rezultati cikličnih strižnih preiskav

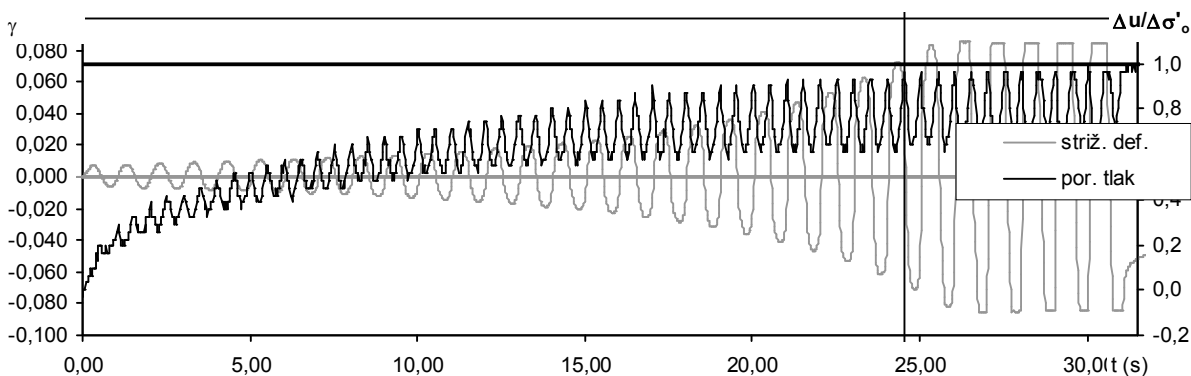
Izvedli smo 35 cikličnih strižnih preiskav, od katerih jih je bilo 27 uspešnih. Pri neuspešnih preiskavah pa smo imeli težave s puščanjem membrane.

Za rezultat preiskave je bistven količnik ciklične strižne napetosti τ_{av} / σ'_{v0} (Slika 23), od katerega je močno odvisno število ciklov do likvifikacije. Slika 24 prikazuje potek strižne deformacije in naraščanje porega tlaka. Število ciklov do likvifikacije N , ki jih lahko preštejemo, je definirano kot vrednost porega tlaka, ki znaša 95% vrednosti vertikalnega tlaka na preizkušancu po konsolidaciji oz. pred ciklično obremenitvijo.

Pomembni podatki preiskave so tudi stopnja saturacije (B), zgoščenost (D_{pr}) in količnik por v povezavi z zgoščenostjo, saj je odpornost materiala na likvifikacijo močno odvisna ravno od teh parametrov.



Slika 23: Obdelava rezultatov preiskave - potek ciklične strižne obremenitve v odvisnosti od časa.



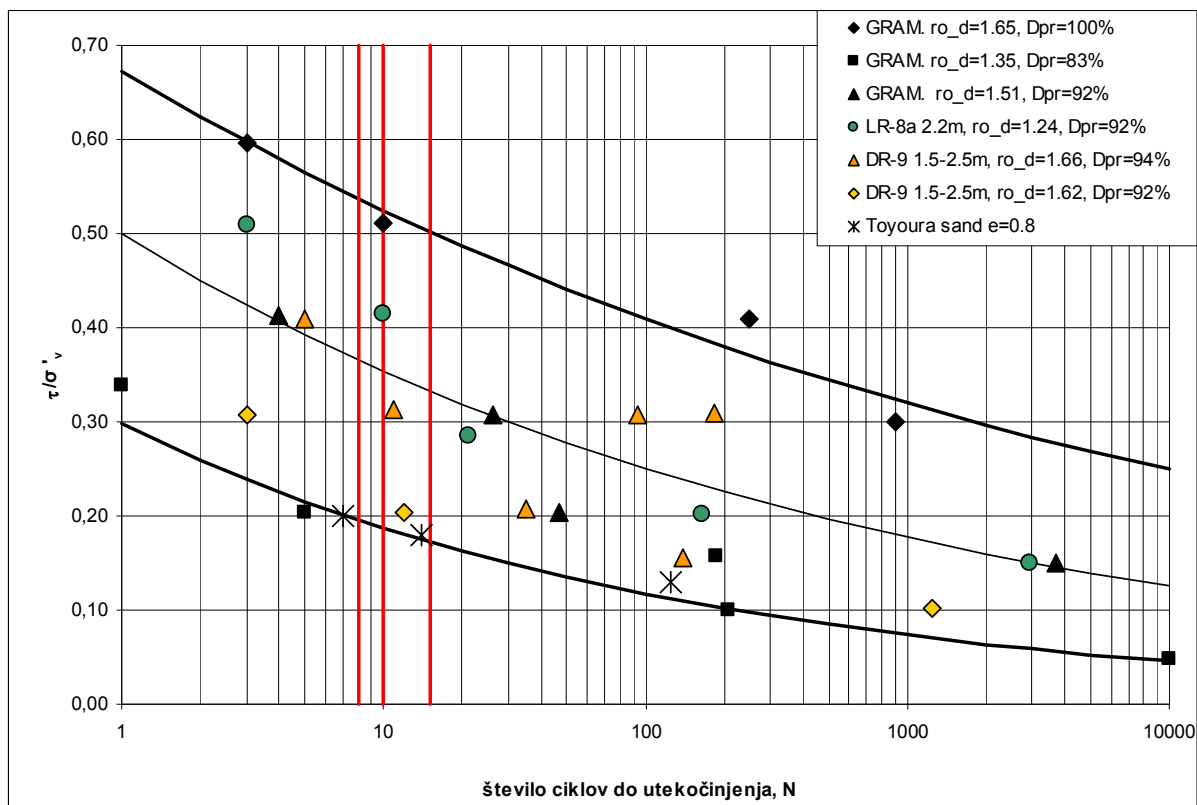
Slika 24: Obdelava rezultatov preiskave - potek strižne deformacije v odvisnosti od časa in porast pornega tlaka do likvifikacije.

V preglednici 6 podajamo rezultate 27 uspešnih preiskav v cikličnem strižnem aparatu. Podajamo lastnosti preizkušanca ob vgradnji: začetno vlago (w_z), začetno gostoto (ρ_z) in začetno suho gostoto (ρ_{dz}). Kot pomembne podatke, ki bistveno vplivajo na število ciklov do likvifikacije, navajamo saturacijo (B), suho gostoto pred pričetkom cikličnega obremenjevanja (ρ_{dstrig}) in količnik por pred pričetkom striga (e_s). Podajamo tudi vertikalno efektivno napetost med konsolidacijo in ciklično obremenitvijo (σ'_v), frekvenco obremenjevanja (ν) in zgoščenost (D_{pr}). V stolpcih obarvanih z modro pa podajamo ključna rezultata preiskave – količnik ciklične strižne napetosti (τ_{av}/σ'_v) in število ciklov do likvifikacije (N).

Preglednica 6: Rezultati preiskav v cikličnem strižnem aparatu. Obarvana stolpca zajemata bistven rezultat preiskave.

VZOREC	w_z %	ρ_z t/m ³	ρ_{dz} t/m ³	B %	ρ_{dstrig} t/m ³	e_s	σ'_v kPa	τ_{av} / σ'_v	ν Hz	N	D_{pr} %
GRAMOZNICA	18,3	1,82	1,54	92	1,60	0,718	50	0,41	1,0	249	97,0
	18,9	1,81	1,52	90	1,67	0,649	50	0,51	1,0	10	101,1
	18,3	1,77	1,50	96	1,63	0,685	50	0,30	1,0	908	98,9
	18,7	1,90	1,60	95	1,64	0,674	75	0,60	1,0	3	99,5
	19,3	1,40	1,18	80	1,31	1,09	50	0,34	1,0	1	79,6
	20,2	1,49	1,24	97	1,38	0,988	75	0,20	1,0	5	83,9
	21,4	1,28	1,06	96	1,39	0,975	75	0,10	1,0	208	84,4
	20,8	1,60	1,32	94	1,37	1,01	75	0,05	1,0	10000	83,0
	19,8	1,77	1,48	91	1,51	0,825	75	0,41	1,0	4	91,3
	17,0	1,76	1,50	94	1,52	0,805	75	0,31	1,0	26	92,4
	17,6	1,68	1,42	96	1,51	0,821	75	0,20	1,0	47	91,5
	17,0	1,67	1,43	90	1,52	0,804	75	0,15	1,0	3670	92,4
LR-8a 2.2m	30,0	1,56	1,20	98	1,23	1,24	75	0,29	1,0	21	92,3
	30,1	1,60	1,23	100	1,25	1,20	75	0,20	1,0	164	89,7
	28,5	1,59	1,24	94	1,26	1,18	75	0,42	1,0	10	87,9
	29,2	1,56	1,21	95	1,24	1,22	75	0,15	1,0	2925	90,8
	31,5	1,57	1,19	94	1,21	1,27	75	0,51	1,0	3	94,5
DR-9 1.5-2.5m	17,3	1,81	1,54	93	1,63	0,688	75	0,31	0,5	184	92,6
	14,7	1,76	1,54	100	1,65	0,664	75	0,41	0,5	5	93,9
	14,8	1,88	1,64	91	1,66	0,661	75	0,21	0,5	35	94,1
	15,0	1,77	1,54	98	1,65	0,671	75	0,15	0,5	140	93,5
	14,6	1,81	1,57	92	1,66	0,655	75	0,31	0,5	94	94,4
	12,8	1,75	1,56	92	1,67	0,645	75	0,31	0,5	11	95,0
	19,0	1,91	1,60	94	1,62	0,699	75	0,31	0,5	3	92,0
	19,6	1,92	1,61	106	1,63	0,691	75	0,20	0,5	12	92,4
	19,3	1,92	1,61	96	1,62	0,695	75	0,10	0,5	1241	92,2

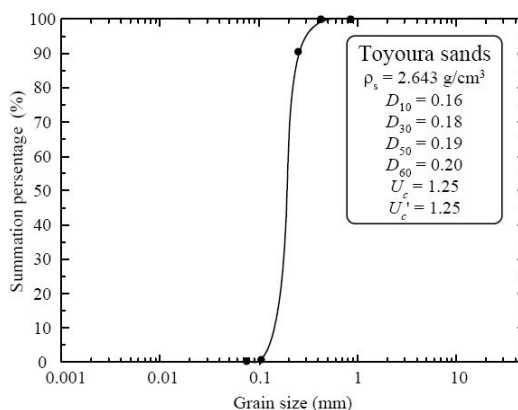
Rezultate cikličnega strižnega preskusa vseh preizkušancev prikazujemo tudi na sliki 25. Rdeče vertikalne črte na sliki prikazujejo število ciklov, ki ga mora material prenesti do utekočinjenja, v odvisnosti od povratne dobe potresa (t.č. 6.5.1).



Slika 25: Rezultati cikličnega strižnega preskusa

Rezultate cikličnega strižnega preskusa smo primerjali tudi z referenčnim materialom – Toyoura sand, za katerega smo rezultate preiskav povzeli iz članka Liquefaction of sand in simple shear condition (Hosono in Yoshimine, 2004). Zrnavostno krivuljo referenčnega materiala podajamo na sliki 26, rezultate preiskav likvifikacije pa kot količnik por, količnik ciklične strižne napetosti in število ciklov do utekočinjenja, v preglednici 7.

Rezultate preiskav likvifikacije (Preglednica 7), izvedene na referenčnem materialu smo zaradi lažje in bolj nazorne primerjave vrisali na sliko 25.



Slika 26: Krivulja zrnivosti za Toyoura sand (Hosono & Yoshimine, 2004)

Preglednica 7: Rezultati preiskav likvifikacije na Toyoura pesku (Hosono & Yoshimine, 2004)

Količnik por	Količnik ciklične strižne napetosti	Število ciklov do likvifikacije
0,828	0,13	125
0,810	0,18	14
0,832	0,20	7

6.6 Poskusno nasipno polje

V sklopu preiskav je bilo na lokaciji bodočih energetskih nasipov za HE Brežice zgrajeno poskusno nasipno polje. Pred izgradnjo poskusnega nasipnega polja je bila odstranjena plast temeljnih tal s koreninskim sistemom (približno do globine 0,4 m). Izkazalo se je, da so temeljna tla peščena, rahla in mestoma vsebujejo več premoga.

Sprva smo poskušali temeljna tla pod predvidenim poskusnim nasipom zgostiti. Zaradi prenizke vlage se material ni zgoščal, zato smo ga dodatno navlažili. Kljub vsemu nismo dosegli želene gostote glede na laboratorijske preiskave (SPP).

Sledila je izgradnja 5 nasipnih plasti. Vgrajevali smo lokalne melje, ki smo jih na deponiji dodatno navlaževali in odstranjevali vse večje korenine. Na terenu smo merili zgoščenost, odvzeli vzorec nasipne plasti za preiskavo zgoščanja z SPP in intaktne vzorce za laboratorijske preiskave.

6.6.1 Meritve gostot in togosti na terenu

Na terenu smo po zgoščanju materiala s prehodi valjarja z izotopsko sondo merili gostoto na površini temeljnih tal oz. na površini posameznega vgrajenega sloja. Pri merjenju z izotopsko sondo s pomočjo radioaktivnih izotopov neposredno odčitamo gostoto in vlažnost vgrajene zemljine. Meritve so pokazale, da je zemljina ob primerni vlagi in po odstranitvi koreninskega sistema dosegala gostoto do 95% po SPP. Težavo so predstavljala le temeljna tla, ki so vsebovala veliko korenin in jih nismo uspeli enakomerno navlažiti do želene globine (navlaževala so se le nekaj cm pod površjem).

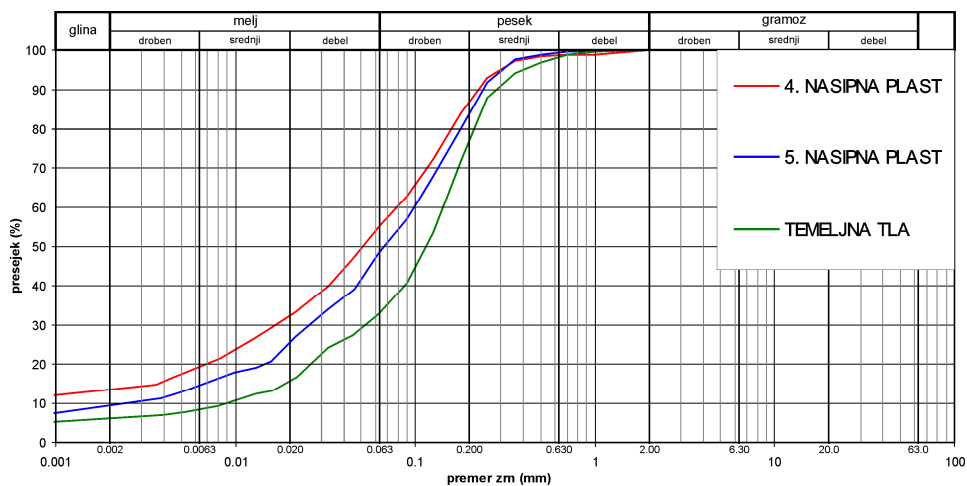
Na terenu smo merili tudi dinamični deformacijski modul. Naprava za merjenje sestoji iz krožne jeklene plošče premera 300 mm, navpičnega vodila za prosto padajočo utež in uteži mase 10 kg. Sunek uteži mora pri udarcu na spodnjo vzmet trajati 18 ms. Podatke zajemamo z elektronskim merilcem pospeška plošče. Izmerjeni potek pospeška plošče se s pomočjo integracije preračuna na posedek plošče. Iz slednjega lahko s pomočjo znanega sunka sile iz vrednotimo dinamični deformacijski modul (E_{vd} (MPa)). Na prvih treh nasipnih plasteh se je kljub zgoščanju poznal močan vpliv odziva mehkih temeljnih tal, zato je togost vgrajenih plasti nizka in podobna tisti izmerjeni na temeljnih tleh ($E_{vd} < 7,5$ MPa). Na peti nasipni pasti pa so bile dosežene višje togosti, $E_{vd} > 10$ MPa, ki so posledica ekvilibracije vlage v materialu na deponiji, ki smo ga dodatno navlažili. Vlaga se je izenačila pri vrednostih, ki približno ustrezajo optimalni vlagi.

6.6.2 Laboratorijske meritve na materialih iz temeljnih tal pod nasipom in tistih odvzetih iz nasipnih plasti

Iz temeljnih tal pod nasipom in iz posameznih nasipnih plasti smo po zgoščanju odvzeli vzorce za kontrolne laboratorijske preiskave, ki so bile opravljene po enakih postopkih kot preiskave na vzorcih iz raziskovalnih jaškov (t.č. 6.1).

Gostotna stanja intaktno odvzetih vzorcev, preiskanih v laboratoriju, so bila nekoliko nižja od tistih izmerjenih na terenu z izotopsko sondo. Iz rezultatov kontrolnih laboratorijskih raziskav je razvidno, da je zrnavostna sestava materiala v temeljnih tleh poskusnega nasipa identična zrnavostni sestavi, določeni na izbranem materialu za študijo likvifikacije (DR 9, 1.5 m).

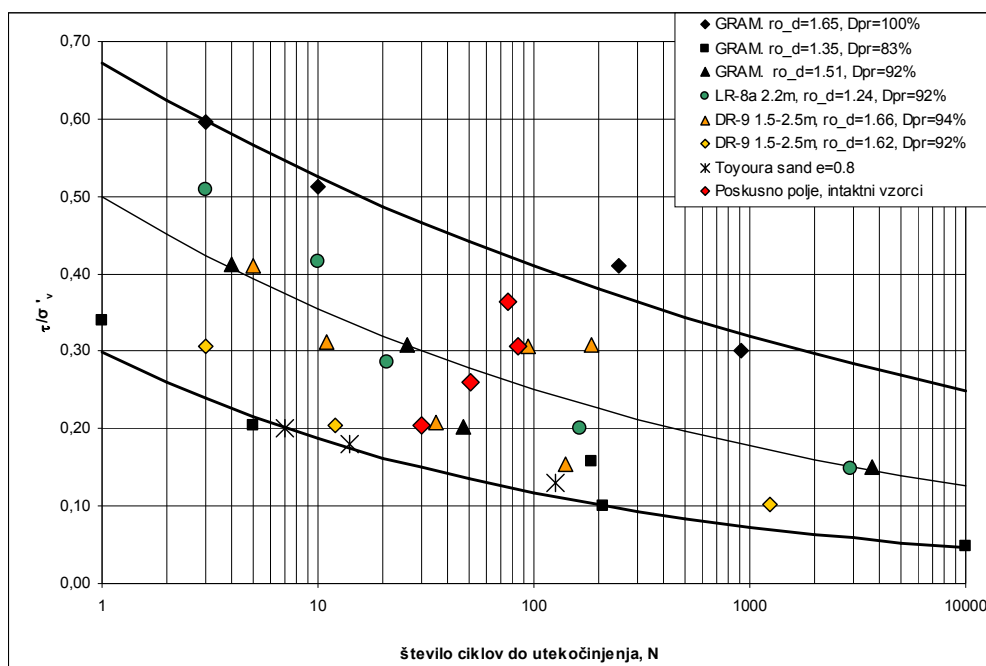
Zrnavostna sestava materiala vgrajenega v nasipne plasti pa je identična zrnavostni sestavi vzorca iz GRAMOZNICE, ki smo ga uporabili za študijo likvifikacije (Slika 20 in Slika 27).



Slika 27: Krivulje zrnivosti za temeljna tla pod nasipom in dve nasipni plasti

V cikličnem strižnem aparatu smo glede na to, da je bil v vse nasipne plasti vgrajen enak lokalni material iz deponije, preiskali 4 preizkušance. Zaradi navlaževanja na deponiji lahko vlage posameznih preizkušancev variirajo, prav tako pa je možno odstopanje v gostoti, saj je bilo na določenih mestih zaznati vpliv slabo zgoščenih temeljnih tal.

Rezultate cikličnih strižnih preskusov podajamo na sliki 28, na katero smo dodali tudi rezultate cikličnih strižnih preskusov za materiale iz raziskovalnih jaškov in referenčni material – Toyoura sand.



Slika 28: Rezultati cikličnega strižnega preskusa za intaktne preizkušance iz poskusnega nasipa primerjani z rezultati cikličnih strižnih preiskav na vzorcih iz raziskovalnih jaškov in Toyoura peskom.

6.7 Analiza rezultatov opravljenih raziskav

Izvedba raziskovalnih jaškov je razkrila, da so posamezne plasti zemljine skoraj suhe, druge pa zelo vlažne, kar so potrdile tudi laboratorijske preiskave določanja naravne vlage. Prav tako so laboratorijski testi potrdili nizko naravno gostoto materiala mestoma enako nasipni gostoti. Obravnavani materiali so v naravnem stanju zelo rahli in imajo naravni količnik por $e > 1,0$, kar potrjujejo tudi penetracijski preskusi izvedeni na terenu. Tako na terenu, kot tudi v laboratoriju pa je možno materiale ob primerni vlagi zadovoljivo zgoščati.

Izbrani materiali za preiskavo likvifikacije so reprezentativni za območje temeljnih tal pod bodočimi energetskega nasipi za HE Brežice. Materiali enake zrnovostne sestave so bili vgrajeni v poskusni nasip in bodo verjetno vgrajeni tudi v bodoče energetske nasipe za HE Brežice.

Podrobnejše raziskave likvifikacije smo izvedli na vzorcu iz GRAMOZNICE, ki vsebuje 50% finih zrn. Pokazale so, da material v naravnem gostotnem stanju slabo prenaša dinamične

vplive in bo potres, ne glede na povratno dobo, povzročil likvifikacijo. Zaradi tega smo se pri preiskavah ostalih vzorcev osredotočili le na zgoščeno stanje. V zgoščenem stanju so bili tudi intaktni preizkušanci iz poskusnega nasipnega polja in referenčni material Toyoura pesek.

Rezultati cikličnih strižnih preiskav združeni na sliki 28 kažejo, da je peske z lokacije bodočih energetskih nasipov za HE Brežice možno medsebojno primerjati. Likvifikacija materiala je v veliki meri odvisna od zgoščenosti, ta pa je pogojena z vlago. V zgoščenem stanju ($D_{pr} > 95\%$) tako do likvifikacije zanesljivo ne bo prišlo v primeru 475 letnega potresa, v primeru 1000 letnega potresa pa je pojav likvifikacije na zgoščenih materialih možen. 10000 letna povratna doba potresa pa daje zahteve po (pre)visokih količnikih ciklične strižne obremenitve, ki jih lokalni peski zagotovo ne bi prenesli. Na tem mestu se zastavlja vprašanje, kateri naravni material sploh prenese takšen potres?

Rezultati cikličnih strižnih preiskav, izvedenih na intaktnih vzorcih imajo glede na to, da naj bi bil material, vgrajen v nasipne plasti homogen, velik raztros. To pripisujemo neenakomernemu navlaževanju peska na deponiji, vplivu korenin na zgoščanje in koreninam, ki smo jih zajeli v intaktnih vzorcih. Koreninice so lahko med ciklično strižno preiskavo učinkovale ugodno (kot armatura) in s tem povečale odpornost preiskovanega materiala na likvifikacijo.

Podrobnejše analize likvifikacije energetskih nasipov bi bilo, zaradi visoke občutljivosti in posledično nizkega faktorja varnosti, potrebno izvesti z naprednim numeričnim izračunom, ki bi potres obravnaval kot dinamični vpliv, hkrati pa bi upošteval likvifikacijo materiala. Predhodno pa bi bilo potrebno določiti obliko in jakost potresa, ki se bi z določeno verjetnostjo zgodil na obravnavani lokaciji.

7 ZAKLJUČKI

Rezultati raziskav so pokazali, da so sestava in lastnosti peskov, ki se nahajajo na lokaciji energetskih nasipov za HE Brežice zelo občutljivi na likvifikacijo. Z naraščajočo stopnjo zgoščenosti se tudi občutljivost na likvifikacijo zmanjšuje.

Na peskih, zgoščenih do 95% zgoščenosti, do likvifikacije zanesljivo ne bo prišlo v primeru 475 letnega potresa, v primeru 1000 letnega potresa pa je pojav likvifikacije na zgoščenih materialih možen.

Ugotovili smo, da peskov v temeljnih tleh ni možno površinsko zgostiti do homogenega količnika por, ki bi bil nižji od kritičnega količnika por.

Primerjava peskov z lokacije HE Brežice z v svetu znanim in raziskanim Toyoura peskom (Preglednica 7) kaže, da je slednji znatno bolj občutljiv na dinamične vplive.

Peske z lokacije HE Brežice je po podatkih laboratorijskih in terenskih preiskav možno realno zgostiti do približno 95% zgoščenosti po SPP. Pri takšni zgoščenosti je količnik por manjši od kritičnega količnika por merodajnega za likvifikacijo v primeru 475 letne povratne dobe potresa. Za seizmične obremenitve te jakosti je pesek primeren za vgradnjo v energetske nasipe. Za izboljšavo temeljnih tal pa bo treba poiskati metode, ki bodo omogočale globinsko zgoščanje ali pa bo treba peske v celoti odstraniti iz temeljnih tal.

VIRI

Car, M., Stopar, R. 2008. Geofizikalne preiskave na območju stebra Borovniškega viadukta (steber št. 21) D.N. 40-OR/2008. Geoinženiring: 9 str.

Das, B.M. 1992. Principles of soil dynamics. PWS – KENT Publishing Company, Boston, Massachusetts: 397-459 str.

Evans, M.D., Seed, H.B. 1987. Undrained cyclic triaxial testing of gravels: the effect of membrane compliance. Report UCB/EERC-87/08, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California

Fajfar, P. 1995. Osnove potresnega inženirstva. 2. izd. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1-83 str.

Fajfar, P., Lapajne, J. 2008. Seizmološka analiza lokacije za izgradnjo pripovršinskega odlagališča NSRAO Vrbina kot osnove za Projektne osnove za Idejni projekt za odlagališče NSRAO Varianta B (podzemni silosi). Revizija 1, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, IKPIR: 10-15 str.

GI Zagreb. 1984. Prethodna analiza bonifikacija tla. Elaborat RN 2241-1-213409

Grande, L. 2002. Some aspects of slope stability problems. Proceedings, XV European Young Geotechnical Engineers Conference, Dublin

Guo, T., Prakash, S. 2004. Liquefaction of sands and silts. Research Project, Geotechnical Engineering, University of Missouri-Rolla

Hosono, Y., Yoshimine, M. 2004. Liquefaction of sand in simple shear condition. In Proceedings of the International Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Bochum, Germany, 31 March – 02 April 2004. A.A. Balkema, Rotterdam: 129–136 str.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. 2004. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE, Berkeley, California, USA: 32-56 str.

Ishihara, K. 1993. Liquefaction and flow failure during earthquakes. Geotechnique 43, 3: 351-415

IZIIS. 1985. Studija temeljenja NE Prevlaka. Potencial likvifikacije tla na temelju rezultata geotehniških istražnih radova III faze i rezime svih dosadašnjih istraživanja. Skopje: 85-64 str.

Johansson, J. 2000. The Soil Liquefaction Web Site. Master Project, University of Washington, <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html> (2.10.2010)

Karta potresne nevarnosti,
http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/projektني_pospesek_tal.html (11.10.2010)

Kozak, J., Čermak, V. 2010. The Illustrated History of Natural Disasters. Springer: 151-157 str.

Kramer, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Publ. Prentice Hall: 348-422 str.

Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 2002a. Tematske karte potresne nevarnosti Slovenije, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, urad za seizmologijo

Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 2002b. Tolmač karte potresne nevarnosti Slovenije, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, urad za seizmologijo

Lenart, S. 2006. Numerični model za računanje porednega tlaka v zemljinah z visokim potencialom likvifikacije. Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 2-90 str.

Maček, M., Petkovšek, A., Majes, B. 2010. Poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah vzorcev zemljin iz raziskovalnih jaškov na lokaciji obrežnih nasipov za HE BREŽICE. L-01-10, Zvezek 2, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Miner, M.A. 1945. Cumulative damage in fatigue. *Journal of applied mechanics*, Santa Monica, California: A159-A164 str.

Mogami, T., Kubu, K. 1953. The behavior of soil during vibration, *Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Zurich, 1: 152-155 str.

Newmark, N. M., Rosenblueth, E. 1971. *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey

Ocena potresne ogroženosti republike Slovenije. 2006. Ministrstvo za obrambo, Uprava RS za zaščito in reševanje.

Ocena ogroženosti mestne občine Ljubljana zaradi potresa. 2009. Mestna občina Ljubljana, Mestna uprava, Oddelek za zaščito, reševanje in civilno obrambo.

Olson, R.A., Olson, R.S. 1977. The Guatemala earthquake of 4 february 1976: Social science observations and research suggestions. *Mass emergencies* 2(1977), Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam – Printed in The Netherlands: 69-81 str.

O' Reilly, M.P., Brown, S.F. 1991. *Cyclic loading of Soils*. Blackie, London – New York

Petkovšek, A., Maček, M., Majes, B. 2010. Geotehnična študija ravnanja z lokalnimi peski v temeljnih tleh in ocena njihove uporabnosti za vgradnjo v energetske nasipe. *Elaborat vgradljivosti peska*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Placer, L. 1999. Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between southern Alps and External Dinarides. *Geologija*, 41: 223-255

Potresi v letu 2008. 2008. Agencija republike Slovenije za okolje, Urad za seizmiologijo in geologijo.

Ribarič, V. 1982. *Seizmičnost Slovenije – Katalog potresov*. Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana: 649 str.

Ribarič, V. 1992. Seizmičnost Slovenije – Katalog potresov. Dodatek 1, Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana: 145 str.

Ribarič, V. 1994. Seizmičnost Slovenije – Katalog potresov. Dodatek 2, Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana: 91 str.

Seed, H.B., Lee, K.L. 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE 92, SM6: 105-134

Seed, H.B., Idriss, I.M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 97, 9: 1249-1273

Seed, H.B., Idriss, I.M., Makdisi, F., Banerjee, N. 1975. Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analysis. Rep. No. EERC 75-29 Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley

Seismology, <http://geophysics.eas.gatech.edu/classes/Geophysics/misc/Seismology.html> (26.9.2010)

Tsunami, <http://sl.wikipedia.org/wiki/Cunami> (2.10.2010)

Urh, I. 1955. Poročilo o detajlni gravimetrični izmeri na Krškem polju. 1953-1954: Technical Report, 7 p., Inštitut za Geologijo, Geotehniko in Geofiziko (IGGG), Ljubljana

Verdugo, R. Seismic response of a saturated cohesionless soil mass. Head of Geotechnical Section, Institute of Research and Testing Materials (IDIEM), Faculty of Physical Sciences and Mathematics, <http://cabierta.uchile.cl/revista/8/seismic.html> (16.10.2009)

Vulkani, <http://www.shrani.si/f/m/wF/3bv8VIRx/vulkani.ppt> (10.10.2010)

Yorku university, Earth science and geomatics engineering, Earthquakes / Seismology, <http://www.yorku.ca/esse/veo/earth/sub1-10.htm> (10.10.2010)

Youd, T.L. 1984. Recurrence of liquefaction at the same site. Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering, 3: 231-238

1964 Alaska Earthquake, http://en.wikipedia.org/wiki/1964_Alaska_earthquake (23.2.2010)