

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:

**Mojca Gramec**

# **Gradnja energetskih nasipov iz peska - študija izvedljivosti**

**Diplomska naloga št.: 3111**

**Mentor:**

prof. dr. Bojan Majes

**Somentor:**

viš. pred. dr. Ana Petkovšek

Ljubljana, 2010

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **MOJCA GRAMEC** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
**»GRADNJA ENERGETSKIH NASIPOV IZ PESKA – ŠTUDIJA IZVEDLJIVOSTI«.**

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

---

Ljubljana, 5. maj 2010

## **IZJAVA O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.136:627.824(043.2)</b>
<b>Avtor</b>	<b>Mojca Gramec</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Bojan Majes</b>
<b>Somentor:</b>	<b>dr. Ana Petkovšek</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Gradnja energetskih nasipov iz peska – študija izvedljivosti</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>84 str., 21 preg., 84 sl., 22 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>energetski nasipi, peski, laboratorijske in terenske preiskave, poskusni nasip, izpiranje</b>

### **Izvleček**

HE Brežice je peta hidroelektrarna v verigi šestih hidroelektrarn na spodnji Savi. V sklopu izgradnje HE Brežice se bodo vzdolž reke Save za potrebe izgradnje akumulacijskega bazena gradili energetski nasipi v skupni dolžini cca. 13 km. V diplomski nalogi smo preverili možnosti gradnje energetskih nasipov iz lokalno razpoložljivih peskov, saj bo takšna gradnja predstavljala ekonomično in okolju prijazno rešitev. Ker v Sloveniji nimamo izkušenj z gradnjo nasipov iz peska in le ti veljajo za problematične materiale, smo v laboratoriju preiskali lastnosti peska in ocenili njegovo vgradljivost v energetske nasipe. Pri tem smo preiskali indeksne kazalnike peskov, vgradljivost, deformabilnost, kolaps, strižno odpornost in prepustnost. Rezultate laboratorijskih preiskav smo preverili s kontrolnimi meritvami na poskusnem nasipu zgrajenem iz lokalnih peskov. Analiza rezultatov laboratorijskih in terenskih raziskav je pokazala, da je gradnja nasipov z uporabo lokalnih peskov možna, vendar le z upoštevanjem določenih zahtev glede potrebne zgoščenosti in rabe filtrov za doseganje filtrske stabilnosti.

## **BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDK:</b>	<b>624.136:627.824(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Mojca Gramec</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. Dr. Bojan Majes</b>
<b>Co-supervisor:</b>	<b>Dr. Ana Petkovšek</b>
<b>Title:</b>	<b>Construction of dikes from using sand as main fill material – feasibility study</b>
<b>Extent and equipment:</b>	<b>84 p., 21 tab., 84 fig., 22 eq.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>dikes, sand, laboratory and field tests, test dike, piping</b>

### **Abstract**

HE Brežice is the fifth in a chain of six hydroelectric power plants on the lower Sava. Approximately 13 km of dikes will have to be built along the left and the right bank of the Sava river to create an accumulation reservoir. In my degree we examined the possibility to use locally available sand deposits as the main fill material. The use of sand will represent the environmentally and economically friendly solution. Because there is no experience in building dikes from sands in Slovenia and this sand has a reputation of being difficult to build dikes from, we examined characteristics of sand and estimated its application in dikes. We examined all index properties of sand, the compactibility, deformability, collapse, shear strength and permeability. The results of laboratory tests were verified by control measurements at the experimental dike built of local sands. The analysis of the results showed that the sand could be used as fill material, however some requirements regarding the achieved dry density and the use of filters layers to prevent piping must be fulfilled.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem somentorici dr. Ani Petkovšek in mentorju prof. dr. Bojanu Majesu za vso strokovno pomoč in vodenje pri nastajanju diplomske naloge.

Za prijetno in prijateljsko vzdušje ter pomoč pri izvajanju laboratorijskih in terenskih preiskav se zahvaljujem vsem na Katedri za mehaniko tal.

Hvala Bernardi Kunej in Jasmini Srpčič za pregled in lektoriranje diplomske naloge.

Posebna zahvala gre moji družini, predvsem staršema Jožici in Andreju, ki sta mi omogočila študij ter Simonu za vso pomoč in spodbudne besede v času študija in izdelave diplomske naloge.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>VSEBINA DIPLOMSKE NALOGE</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>HIDROTEHNIČNI NASIPI</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Opredelitev hidrotehničnih nasipov</b>	<b>3</b>
<b>3.2</b>	<b>Osnovne zahteve</b>	<b>6</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Stabilnost</b>	<b>6</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Deformabilnost</b>	<b>7</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Nadzorovanje gibanja vode in tesnost</b>	<b>8</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Odpornost na notranjo erozijo</b>	<b>10</b>
<b>3.3</b>	<b>Konstrukcijski elementi hidrotehničnih nasipov</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>Zasnova konstrukcije hidrotehničnega nasipa</b>	<b>13</b>
<b>3.5</b>	<b>Materiali za vgradnjo</b>	<b>13</b>
<b>3.6</b>	<b>Kritična stanja v delovanju nasipov</b>	<b>17</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Izpiranje</b>	<b>17</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Površinska erozija</b>	<b>17</b>
<b>3.6.2.1</b>	<b>Površinska erozija zaradi precejanja</b>	<b>17</b>
<b>3.6.2.2</b>	<b>Površinska erozija zaradi toka vode</b>	<b>18</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Nestabilnost brežin in temeljnih tal v času gradnje</b>	<b>18</b>
<b>3.6.4</b>	<b>Stabilnost brežine na suhi strani pri polni akumulaciji</b>	<b>18</b>
<b>3.6.5</b>	<b>Stabilnost vodne strani brežine nasipa pri hitrem praznjenju akumulacije</b>	<b>19</b>

<b>3.6.6</b>	<b>Poškodbe zaradi potresne obremenitve</b>	<b>19</b>
<b>3.7</b>	<b>Tehnično opazovanje</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>PREDSTAVITEV BAZENA HE BREŽICE</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Opis trase nasipov</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>Karakteristični geološki prerez tal</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>Idejna zasnova gradnje energetskih nasipov iz peska</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL</b>	<b>25</b>
<b>5.1</b>	<b>Uvod</b>	<b>25</b>
<b>5.2</b>	<b>Program raziskav</b>	<b>25</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Odvzem vzorcev na terenu</b>	<b>26</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Laboratorijske preiskave</b>	<b>27</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Gradnja poskusnega nasipa in kontrolne raziskave na poskusnem nasipu</b>	<b>29</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Opazovanje nasipa</b>	<b>30</b>
<b>5.3</b>	<b>Rezultati raziskav</b>	<b>30</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Indeksne preiskave</b>	<b>30</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Preiskave vgradljivosti</b>	<b>35</b>
<b>5.3.2.1</b>	<b>Standardni Proctorjev preizkus</b>	<b>35</b>
<b>5.3.2.2</b>	<b>Kontrola enoosne tlačne trdnosti</b>	<b>36</b>
<b>5.3.2.3</b>	<b>Ocena disperzivnosti meljastih peskov</b>	<b>37</b>
<b>5.3.2.4</b>	<b>Filtrska sposobnost naravnega gramoza</b>	<b>38</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Deformabilnost in kolaps</b>	<b>40</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Strižna odpornost</b>	<b>42</b>



<b>5.3.5</b>	<b>Prepustnost</b>	<b>42</b>
<b>5.3.6</b>	<b>Rezultati terenskih raziskav</b>	<b>44</b>
<b>5.3.6.1</b>	<b>Podatki predhodnih raziskav</b>	<b>44</b>
<b>5.3.6.2</b>	<b>Priprava temeljnih tal za gradnjo nasipa – ugotovitve</b>	<b>44</b>
<b>5.3.6.3</b>	<b>Gradnja poskusnega nasipa</b>	<b>45</b>
<b>5.3.7</b>	<b>Kontrolne laboratorijske preiskave</b>	<b>46</b>
<b>5.4</b>	<b>Povzetek ugotovitev</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>49</b>
	<b>VIRI</b>	<b>51</b>
	<b>PRILOGE</b>	<b>54</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1:	Ocena relativne inženirske uporabnosti določenih vrst materialov za nasipanje ter zgoščevanje. (Vir: info.grad.hr.)	16
Preglednica 4.1:	Karakteristični geološki prerez tal. (Vir: Elaborat KMTal.)	22
Preglednica 4.2:	Količina melja in peska ter humusa na območju akumulacije. (Vir: IRGO, 2009.)	24
Preglednica 5.1:	Indeksni kazalniki lastnosti izkopnega materiala, izkopi levi breg.	31
Preglednica 5.2:	Indeksni kazalniki lastnosti izkopnega materiala, izkopi desni breg.	32
Preglednica 5.3:	Razdelitev materiala glede na zrnastostno sestavo.	33
Preglednica 5.4:	Sestava tal na lokaciji raziskovalnega jaška LR-8a.	44
Preglednica A1:	Odvisnost konsistenčnega stanja od indeksa konsistence.	57
Preglednica A2:	Delitev zemljin na razrede disperzivnosti po metodi svaljka.	66
Preglednica B1:	Indeksni kazalniki karakterističnih materialov.	72
Preglednica B2:	Parametri zrnastosti.	73
Preglednica B3:	Parametri strižne trdnosti.	74
Preglednica B4:	Rezultati preiskav deformabilnosti.	75
Preglednica B5:	Rezultati preiskav vodoprepustnosti v edometru in triaksialni celici.	76
Preglednica B6:	Rezultati preiskav vgradljivosti po Proctorju in pripadajočih trdnosti.	77
Preglednica B7:	Indeksni kazalniki lastnosti materialov, parametri zrnastosti, rezultati preiskav vgradljivosti po Proctorju in rezultati preiskav vodoprepustnosti v edometru in triaksialni celici.	78
Preglednica C1:	Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti temeljnih tal in prve nasipne plasti.	80
Preglednica C2:	Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti druge nasipne plasti.	81

Preglednica C3:	Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti tretje nasipne plasti.	82
Preglednica C4:	Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti četrte nasipne plasti.	83
Preglednica C5:	Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti pete nasipne plasti.	84

## KAZALO SLIK

Slika 3.1:	Akumulacija črpalne HE Avče je ustvarjena z dvema do 25 m visokima nasipoma. (Vir: Laboratorij KMTal.)	3
Slika 3.2:	Nasuta pregrada Vogršček. (Vir: <a href="http://www.sos112.si">www.sos112.si</a> .)	4
Slika 3.3:	Nasip za akumulacijo vode za HE Blanca. (Vir: <a href="http://www.hes.si">www.hes.si</a> .)	4
Slika 3.4:	Protipoplavni nasip v Brežicah.	4
Slika 3.5:	Akumulacija industrijskega mulja za najvišjo nasuto pregrado v Sloveniji – pregrado za Travnikom. (Vir: Laboratorij KMTal.)	5
Slika 3.6:	Nasip za potrebe solinarstva – Drnica. (Vir: Laboratorij KMTal.)	5
Slika 3.7:	Nasipi za vzdrževanje vodnih transportnih poti. (Vir: <a href="http://www.rws.iwr.usace.army.mil">www.rws.iwr.usace.army.mil</a> .)	5
Slika 3.8:	Nasip za obrambo pred morjem – Nizozemska. (Vir: <a href="http://www.bugbog.com">www.bugbog.com</a> .)	6
Slika 3.9:	Zdrs dela brežine na vodni strani.	7
Slika 3.10:	Erozija zunanje brežine zaradi prelivanja vode.	8
Slika 3.11:	Vodotesnost nasipa na prepustnih tleh.	9
Slika 3.12:	Porušitev zemeljske pregrade – Teton dam, kot posledica notranje erozije. (Vir: <a href="http://web.mst.edu">web.mst.edu</a> .)	12
Slika 3.13:	Izpiranje materiala.	17
Slika 3.14:	Zdrs dela brežine pri polni akumulaciji.	19
Slika 3.15:	Zdrs dela brežine zaradi hitrega znižanja gladine vode.	19
Slika 3.16:	Potresna obremenitev: a) likvifakcija materiala, b) nastanek razpok in globokih krožnih drsin.	20
Slika 4.1:	Karakteristični geološki prerez tal: a) shematski prikaz, b) dejansko stanje na terenu (razkop DR-1).	22
Slika 4.2:	Shematski prikaz okoljsko in ekonomsko učinkovitega izkoriščanja lokalnih materialov za gradnjo energetskih nasipov.	23

Slika 4.3:	Shematski prikaz spremenjenega poteka trase z novimi ugotovitvami: lokalno povečane debeline peska, veliko premoga in globoke korenine.	23
Slika 4.4:	Karta potresne ogroženosti Slovenije – projektni pospešek tal. (Vir: <a href="http://www.arso.gov.si">www.arso.gov.si</a> .)	24
Slika 5.1:	Raziskovalni jaški: a) intaktno vzorčenje v raziskovalnem jašku, b) poskus ugotavljanja togosti naravnih plasti s krožno ploščo.	26
Slika 5.2:	Lokacije opravljenih razkopov in poskusnega nasipa.	27
Slika 5.3:	Poskusni nasip: a) 10.10.2009, b) 21.11.2009, opazno je izpiranje materiala, c) nasip po poplavih v decembru 2009 (Vir: Laboratorij KMTal.), d) 23.1.2010.	30
Slika 5.4:	Položaj finih zrn v AC diagramu.	33
Slika 5.5:	Krivulje zrnivosti materialov odvzetih iz razkopov na desnem bregu.	34
Slika 5.6:	Krivulje zrnivosti materialov odvzetih iz razkopov na levem bregu.	34
Slika 5.7:	Krivulji zrnivosti gramozov in gramozne plasti pod peski.	35
Slika 5.8:	Proctorjeve krivulje zgoščenosti preiskovanega materiala.	36
Slika 5.9:	Enoosna tlačna trdnost v odvisnosti od vlage zemljine; vertikalne črte predstavljajo optimalno vlago za posamezen vzorec.	37
Slika 5.10:	Določanje enoosne tlačne trdnosti: a) vzorec se je porušil zaradi nastanka razpok v vertikalni smeri, b) sodčkasta porušitev vzorca.	37
Slika 5.11:	Kalnost vode za različne vzorce po petih minutah. (Vir: Laboratorij KMTal.)	38
Slika 5.12:	Rezultati NEF testa (Vir: Laboratorij KMTal.): a) vzorec peska in filtrska plast iz naravnega gramoz, b) tesnilna plast pri uporabi neustreznega filtra.	39
Slika 5.13:	Zrnavostni sestavi frakcije 0–16 mm za gramoz DR-4 0,8–1,0 m in DR-3 2,7 m.	39
Slika 5.14:	Rezultati preiskave stisljivosti na vzorcu DR-9 1,5–2,5 m.	40
Slika 5.15:	Rezultati preiskave stisljivosti na vzorcu GRAMOZNICA.	41

Slika 5.16:	Moduli stisljivosti v povezavi z bremenskimi stopnjami za idealno, 100 % zgoščen pesek, vzorec DR-9, $e = 0,644$ .	41
Slika 5.17:	Rezultati strižnih preiskav naravnih in nabitih materialov.	42
Slika 5.18:	Preiskava prepustnosti v odvisnosti gostote.	43
Slika 5.19:	Preiskave prepustnosti v odvisnosti od količnika por.	43
Slika 5.20:	Priprava temeljnih tal. (Vir: Laboratorij KMTal.)	44
Slika 5.21:	a) vlaženje temeljnih tal s pomočjo cisterne za vodo (Vir: Laboratorij KMTal.), b) vlaženje materiala na začasni deponiji.	45
Slika 5.22:	a) zgoščanje nasipnega materiala z vibracijskim valjarjem, b) končna podoba poskusnega nasipa.	46
Slika 5.23:	Krivulje zrnivosti materiala iz poskusnega polja.	47
Slika A1:	Določanje zrnovostne sestave: a) suha sejalna analiza, b) areometrija.	56
Slika A2:	Določanje Atterbergovih meja: a) židkost, b) plastičnost. (Vir: Laboratorij KMTal.)	57
Slika A3:	SPP: a) nabijanje vzorca v laboratoriju, b) določanje maksimalne suhe prostorninske teže.	60
Slika A4:	Enoosna tlačna trdnost: a) stiskalnica, b) porušitev vzorca med preiskavo.	61
Slika A5:	Neposredni strižni preskus: a) princip delovanja naprave, b) izvajanje preiskave.	62
Slika A6:	Edometrski aparat.	63
Slika A7:	Določanje nasipne gostote.	64
Slika A8:	Prepustnost v triosni celici: a) naprava za izvajanje meritev, b) vgrajeni vzorci med preiskavo.	65
Slika A9:	Določanje disperzivnosti zemljin različnim vzorcem. (Vir: Laboratorij KMTal.)	66
Slika A10:	Shema naprave za merjenje filtrske sposobnosti zemljin. (Vir: Laboratorij KMTal.)	67

Slika A11:	NEF (Vir: Laboratorij KMTal.): a) preiskava vzorca, b) vzorec po preiskavi.	68
Slika A12:	Izotopski merilnik: a) princip delovanja naprave, b) opravljanje meritev na četrti nasipni plasti poskusnega nasipa.	69
Slika A13:	Meritve dinamičnega deformacijskega modula četrte nasipne plasti.	70
Slika A14:	Posedalna plošča: a) vgrajevanje posedalne plošče, b) vgrajena plošča.	70

## KAZALO SIMBOLOV

<b>Simbol</b>	<b>Enota</b>	<b>Lastnosti</b>
$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	prostorninska teža
$\gamma'$	[kN/m <sup>3</sup> ]	efektivna prostorninska teža
$\gamma_d$	[kN/m <sup>3</sup> ]	suha prostorninska teža
$\sigma$	[kPa]	normalna totalna napetost
$\sigma'$	[kPa]	normalna efektivna napetost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gostota
$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	suha gostota
$\rho_{dmax}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	maksimalna suha gostota po Proctorju
$\rho_{nas}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	nasipna gostota
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gostota zrn
$c$	[kPa]	kohezija
$c'$	[kPa]	kohezija izražena z efektivnimi napetostmi
$C_c$		koeficient zrnivosti
$C_u$		koeficient enakomernosti
$c_u$	[kPa]	nedrenirana strižna trdnost
$d$	[mm]	premer zrna
$d_{85}$	[mm]	premer zrna pri presejku 85 % (ostali podobno)
$D_{15}$	[mm]	premer zrna pri presejku 15 % (ostali podobno)
$D_{PR}$	[%]	relativna zgoščenost po Proctorju
$e$		količnik por
$e_o$		naravni količnik por



$E_{vd}$	[MPa]	deformacijski modul določen s krožno ploščo z lahko padajočo utežjo
$E_{oed}$	[MPa]	edometrski modul stisljivosti
$F$		faktor varnosti
$I_c$		indeks konsistence
$I_p$	[%]	indeks plastičnosti
$k$	[m/s]	koeficient vodoprepustnosti
$m_m$	[kg]	masa mokrega materiala
$m_s$	[kg]	masa suhega materiala
$n$	[%]	poroznost
$q_u$	[kPa]	enoosna tlačna trdnost
$S_r$	[%]	stopnja zasičenja
$w$	[%]	vlažnost
$w_0$	[%]	naravna vlažnost
$w_L$	[%]	meja židkosti
$w_{op}$	[%]	optimalna vlažnost
$w_P$	[%]	meja plastičnosti
$w_s$	[%]	meja krčenja
$w_s$	[kN/m <sup>3</sup> ]	teža suhega materiala
$w_w$	[kN/m <sup>3</sup> ]	teža mokrega materiala
$\varepsilon$	[%]	deformacija
$\tau$	[kPa]	strižna napetost
$\tau_f$	[kPa]	strižna trdnost
$\varphi$	[ ° ]	strižni kot zemljine ali kot notranjega trenja
$\varphi'$	[ ° ]	strižni kot izražen z efektivnimi napetostmi

<i>CCC</i>	Continuous Compaction Control – kontinuirana kontrola zgoščanja
<i>NEF</i>	No Erosion Filter test – test ustreznosti filtrov
<i>SPP</i>	standardni Proctorjev preizkus
<i>USCS</i>	enotni zemljinski klasifikacijski sistem

## SLOVAR IZRAZOV

A-LINIJA	je v koordinatnem sistemu $w_L, I_p$ definirana kot $I_p = 0,73(w_L - 20)$ in razmejuje gline, ki ležijo nad A-linijo in organske zemljine ter melje, ki ležijo pod A-linijo.
AREOMETRSKA ANALIZA	je postopek določanja zrnastostne sestave delcev manjših od 0,063 mm.
ATTERBERGOVE MEJE	so značilna nespremenljiva stanja vlažnosti drobnozrnatih zemljin. Mednje sodijo meja plastičnosti, meja židkosti in meja krčenja.
DISPERZIVNOST	je lastnost zemljine, da se njeni delci razpršijo v stiku z vodo v suspenzijo in se v sistemu voda zemljina prevajajo v vodnem mediju.
DRENAŽNA PLAST	je plast, vgrajena z namenom zbiranja in hitrega transporta vode v znano, določeno smer.
EDOMETER	je standardna naprava za določanje stisljivosti zemljin v laboratoriju.
EDOMETRSKI MODUL	je kvocient med spremembo vertikalne efektivne napetosti in vertikalne deformacije.
FILTRSKO PRAVILO	je empirično določena relacija med nazivnimi zrni v zemljini in zrni v filtru, ki zemljino ščitijo pred notranjo erozijo.
INDEKS KONSISTENCE	je definiran z izrazom: $I_c = w_L - w_0/I_p$ .
INDEKS PLASTIČNOSTI	je definiran kot razlika med mejo židkosti in mejo plastičnosti ter pove, kako velik je razpon vlažnosti zemljine med židkim in krhkim stanjem.
IZOTOPSKA SONDA	je naprava za določanje vlažnosti in gostote na terenu.
KOHERENTNE ZEMLJINE	so drobnozrnate, vezljive zemljine.
KOLAPS	je hipni sesedek plasti, do katerega pride ob preplavitvi predhodno nesaturirane plasti.
KOMPRIMACIJA	je zgoščanje zemljin.
KONSISTENCA	je od vlažnosti odvisno stanje drobnozrnatih zemljin, uporabljamo jo kot merilo za posredno opisovanje njihove trdnosti.

KONSOLIDACIJA	je proces iztiskanja porne vode in/ali zraka, do katerega pride zaradi povečanja totalne napetosti v zemljini.
KONUSNI PENETROMETER	je naprava za določanje židkosti materiala.
KRČENJE	je pojav zmanjševanja volumna materiala, zaradi izgubljanja vode.
LIKVIFAKCIJA	je utekočinjenje materiala ob hipni dinamični obremenitvi.
MEJA KRČENJA	je vlažnost, pod katero se zemljina ob sušenju ne krči več.
MEJA PLASTIČNOSTI	je vlažnost pri kateri prehaja zemljina iz plastičnega (gnetnega) v krhko stanje.
MEJA ŽIDKOSTI	je vlažnost pri kateri prehaja zemljina iz plastičnega (gnetnega) v tekoče (židko) stanje.
NEF	je Non Erosion Filter test – nestandardni test za kontrolo ustreznosti filtrov.
OPTIMALNA VLAŽNOST	je vsebnost vode v materialu, pri kateri z znano energijo zgoščanja dosežemo največjo koncentracijo mineralnih zrn na enoto volumna snovi.
PIPING	je skupen izraz za proces notranje erozije, ki se sestoji iz iniciacije izpiranja, ustvarjanja prioritete poti iznašanja delcev in porušitve.
PROCTORJEV POSTOPEK	je standardni postopek pri katerem z uporabo standardne energije določimo največjo gostoto in optimalno vlažnost snovi.
SATURACIJA	je zasičenost zemljine.
STRIŽNA TRDNOST	je največja strižna napetost, ki jo zemljina lahko prenese.
U-LINIJA	je linija, ki je v koordinatnem sistemu $w_L, I_p$ definirana kot $I_p = 0,90(w_L - 8)$ . Zemljin, ki bi ležale nad to linijo ni.
VLAŽNOST	je razmerje med težo vode in težo suhega zrnja zemljine, izraženo v %.
ZRNAVOST	je stalna, značilna in nespremenljiva lastnost zemljin, ki se uporablja za klasifikacijo zemljin.



## 1 UVOD

Pri gradnji velikih infrastrukturnih objektov, kot so avtoceste, železnice in hidroelektrarne, je potrebno že v idejnih fazah projekta preučiti vire materiala za gradnjo. Pri dobrih projektih je masna bilanca izravnana, to pomeni, da ni potrebno graditi deponij viškov izkopnih materialov in da ni potrebno iskati oskrbnih virov na stranskih odvzemih. Zaradi okoljskih omejitev in pomanjkanja kvalitetnih surovin se pri zemeljskih delih uporabljajo čedalje slabši materiali tudi za gradnjo zelo zahtevnih zemeljskih objektov, kot so visoki avtocestni nasipi ter hidrotehnični nasipi.

Pri gradnji hidroelektrarn na spodnji Savi bo potrebno zgraditi več deset kilometrov energetskih nasipov za potrebe oblikovanja akumulacijskih bazenov za HE Brežice in HE Mokrice. Za gradnjo energetskih nasipov bo tako potrebno zagotoviti več milijonov kubičnih metrov materiala. Lokalno razpoložljivi materiali so aluvialni melji in peski, ki so jih visoke vode Save ob poplavih odlagale na levem in desnem bregu. Peski in melji so v geotehniko ovrednoteni kot neugodni in težavni materiali za gradnjo nasipov, zaradi dveh glavnih skupin vzrokov:

- velike občutljivosti na notranjo erozijo, kolaps in potres ter
- zaradi slabe vgradljivosti.

V Sloveniji se doslej energetski nasipi iz peskov še niso gradili.

V svoji diplomski nalogi, ki je del obsežnejše študije, namenjene presoji uporabnosti lokalnih peskov za izgradnjo energetskih nasipov za HE Brežice v skupni dolžini okoli 13 km, sem raziskala mehanske lastnosti in vgradljivost peska v laboratoriju, te lastnosti pa sem dodatno preverila s kontrolnimi meritvami na poskusnem nasipu.

## **2 VSEBINA DIPLOMSKE NALOGE**

Diplomska naloga je razdeljena na več poglavij v katerih sem obravnavala pomembne korake v procesu načrtovanja in gradnje hidrotehničnih nasipov. V uvodu sem predstavila namen raziskav, ki sem jih opravila v okviru naloge. V tretjem poglavju sem predstavila geotehnične vidike gradnje hidrotehničnih nasipov in materialov za vgradnjo. Opisala sem tipične primere poškodb hidrotehničnih nasipov in vzroke zanje. V četrtem poglavju sem predstavila značilnosti akumulacijskega bazena HE Brežice, pri čemer sem se osredotočila na opis trase energetskih nasipov in karakteristični geološki prerez tal ter idejno zasnovo energetskih nasipov za HE Brežice. Sledi predstavitev eksperimentalnega dela, kjer je opisan program raziskav in dobljeni rezultati. Podana je analiza končnih rezultatov. V šestem poglavju sem strnila ugotovitve raziskav in ocenila uporabnost peskov za gradnjo. Sledi navedba virov in priloga v kateri so natančnejši opisi laboratorijskih in terenskih preiskav ter rezultati laboratorijskih in terenskih meritev.

### 3 HIDROTEHNIČNI NASIPI

#### 3.1 Opredelitev hidrotehničnih nasipov

Hidrotehnični nasipi so inženirske konstrukcije, ki služijo za stalno ali občasno zadrževanje vode. Zgrajeni so iz zemljin, zdrobljenih kamnin ali iz kombinacije zemljin in drugih materialov, kot so asfalt, beton, geosintetiki in drugo. Zemljine in drugi materiali, vgrajeni v določene plasti v nasipu, opravljajo točno določene naloge, kot so tesnjenje, dreniranje, protierozijska zaščita in podobno.

Med hidrotehnične nasipe uvrščamo:

- dolinske pregrade (angl. dam, earth dam, earth embankment dam). Z nasipom se pregradi naravna dolina, pri čemer se za nasipom (pregrado) ustvari umetna zaježitev in akumulacija, ki je lahko namenjena proizvodnji elektrike, za namakanje, za ustvarjanje zalog pitne vode ali za druge namene,
- vzdolžne linijske nasipe vzdolž strug rek (angl. dike), ki omogočajo zadostno akumulacijo vode z dvigom gladine vode nad nivo stare struge,
- različne varovalne nasipe pred visoko vodo – protipoplavni nasipi,
- nasipe na odlagališčih odpadkov, kadar se odpadki odlagajo v obliki nestabilnih gošč,
- nasipe za potrebe solinarstva,
- nasipe za ustvarjanje umetnih akumulacijskih bazenov za potrebe črpalnih hidroelektrarn, zasneževanja, namakanja, oskrbe z vodo za obrambo pred požari itd.,
- nasipe za vzdrževanje vodnih transportnih poti,
- nasipe za obrambo pred morjem (Nizozemska) in druge.



Slika 3.1: Akumulacija črpalne HE Avče je ustvarjena z dvema do 25 m visokima nasipoma.

(Vir: Laboratorij KMTal.)





Slika 3.2: Nasuta pregrada Vogršček. (Vir: [www.sos112.si](http://www.sos112.si).)



Slika 3.3: Nasip za akumulacijo vode za HE Blanca. (Vir: [www.hes.si](http://www.hes.si).)



Slika 3.4: Protipoplavni nasip v Brežicah.



Slika 3.5: Akumulacija industrijskega mulja za najvišjo nasuto pregrado v Sloveniji – pregrado za Travnikom.  
(Vir: Laboratorij KMTal.)



Slika 3.6: Nasip za potrebe solinarstva – Drnica. (Vir: Laboratorij KMTal.)



Slika 3.7: Nasipi za vzdrževanje vodnih transportnih poti. (Vir: [www.rws.iwr.usace.army.mil](http://www.rws.iwr.usace.army.mil).)



Slika 3.8: Nasip za obrambo pred morjem – Nizozemska. (Vir: [www.bugbog.com](http://www.bugbog.com).)

### 3.2 Osnovne zahteve

Hidrotehnični nasipi morajo poleg splošnih zahtev glede stabilnosti in deformabilnosti, ki veljajo za vse vrste nasipov, dodatno izpolnjevati tudi druge, za varnost, stabilnost in trajnost izjemno pomembne vidike:

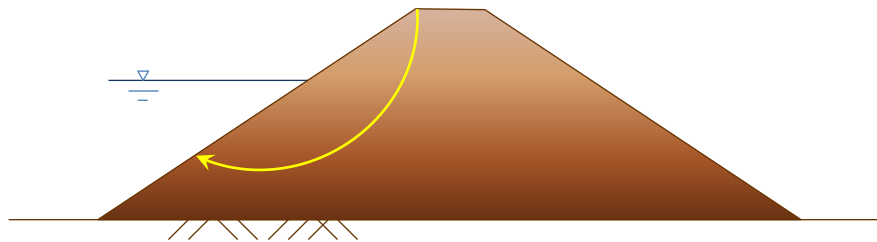
- zakonitosti vezane na nadzorovanje toka vode skozi nasipe in temeljna tla pod nasipi (tesnost, prepustnost),
- odpornost materiala na izpiranje, notranjo in površinsko erozijo,
- odpornost na potres in likvifikacijo,
- kompatibilnost (združljivost) materialov in tehnologij, namenjenih za izgradnjo različnih plasti.

Hidrotehnični nasipi so veliko bolj ranljivi kot klasični »suhi« nasipi. Posledice porušitev hidrotehničnih nasipov so praviloma katastrofalne (npr. porušitev obrambnih nasipov v primeru orkana Katrinas v New Orleansu, katastrofalne posledice porušitev obrambnih nasipov ob poplavih v severni Nemčiji, porušitev pregrade Teton dam itd.) in usodne za ljudi ter infrastrukturo.

#### 3.2.1 Stabilnost

Stabilnostne analize je potrebno opraviti za vse faze v času gradnje hidrotehničnega nasipa, za različne obremenilne slučaje v času obratovanja in za primer potresa. Stabilnostne analize je tako potrebno opraviti za naslednje obtežbene primere:

- vse faze gradnje nasipa in nasipa po izgradnji ob prazni akumulaciji – kontrola obeh brežin,
- obratovalno stanje, poln bazen,
- dnevna ali tedenska obratovalna nihanja vode v bazenu,
- hitro praznjenje akumulacije – kritična je vodna stran,
- potresna obremenitev v kombinaciji z zgoraj naštetimi obtežbenimi primeri.



Slika 3.9: Zdrs dela brežine na vodni strani.

Analize stabilnosti brežin hidrotehničnih nasipov in tal pod nasipi običajno izvajamo po klasičnih metodah, s katerimi iščemo odpor, ki ga nudi zemljina vzdolž potencialne drsne ploskve glede na zunanje obremenitve. Te temeljijo na presoji statičnega ravnotežja potencialno aktivne mase zemljine, ki leži na določeni drsni ploskvi. Pri stabilnostni analizi tako iščemo potencialno drsno ploskev, ki z najmanjšim količnikom varnosti zagotavlja ravnovesje vseh sil delujočih na togo telo nad drsno ploskvijo in jo imenujemo »kritična drsina«. Količnik varnosti pri tem definiramo kot:

$$F = \frac{\sum \tau_f}{\sum \tau} \quad (3.1)$$

$F$ ... faktor varnosti

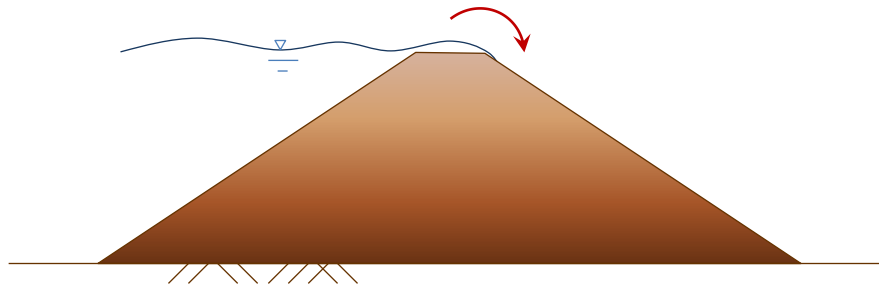
$\tau_f$ ... največja strižna napetost, ki jo lahko mobiliziramo v zemljini tik pred porušitvijo

$\tau$ ... dejanska strižna napetost, ki nastopi v zemljini

### 3.2.2 Deformabilnost

Ena izmed osnovnih zahtev, ki jih moramo izpolniti pri gradnji hidrotehničnega nasipa, so še sprejemljive deformacije. Sprejemljiva velikost posevkov nasipa je odvisna od vrste in

konstrukcijskih značilnosti nasipa. Preveliki posedki lahko v skrajnem primeru povzročijo prelivanje vode ter posledično erozijo zunanje, suhe brežine. Preveliki posedki škodljivo vplivajo na delovanje različnih sistemov, ki so vgrajeni v nasip, na primer prelivov, kanalov, tesnilnega jedra itd. V okviru analize obnašanja hidrotehničnega nasipa moramo računsko ovrednotiti velikost in časovni razvoj posedkov temeljnih tal pod nasipom ter posedkov samega nasipa.



Slika 3.10: Erozijska zunanje brežine zaradi prelivanja vode.

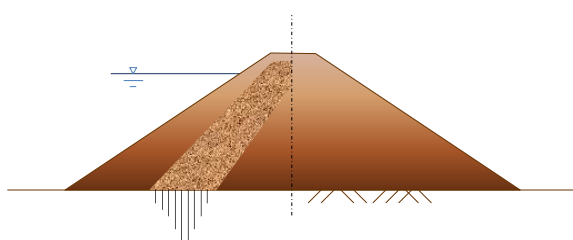
### 3.2.3 Nadzorovanje gibanja vode in tesnost

Nadzorovanje gibanja vode v in pod hidrotehničnim nasipom vzpostavljamo z vgradnjo tesnilnih in drenažnih plasti. V nasipu zagotavljamo vodotesnost z:

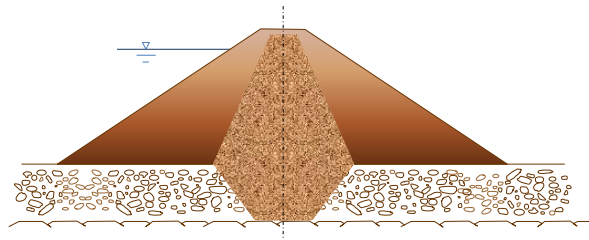
- vgradnjo malo prepustnega materiala v celoten nasip ali
- vgradnjo tesnilnega jedra ali
- vodotesno oblogo na vodni strani nasipa.

V temeljnih tleh pa nadzorovanje gibanja vode in vodotesnost zagotavljamo z:

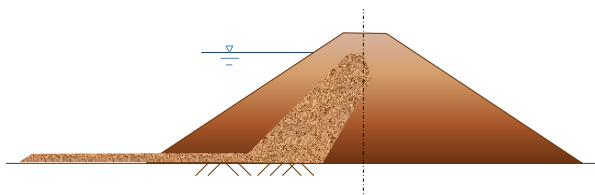
- zmanjšanjem prepustnosti prepustnih slojev tal (injektiranje, diafragma, nadomeščanje) ali
- zmanjšanjem hidravličnega gradienta (podaljšanje precejne poti).



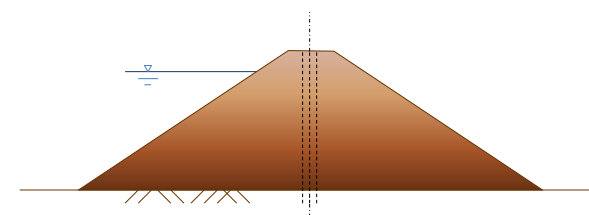
a) tesnilno jedro in injektiranje tal pod njimi



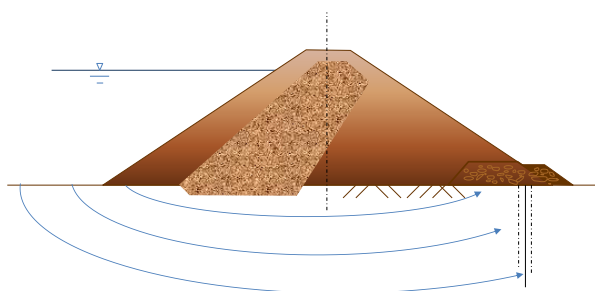
b) tesnilno jedro sega v tla do neprepustnega sloja



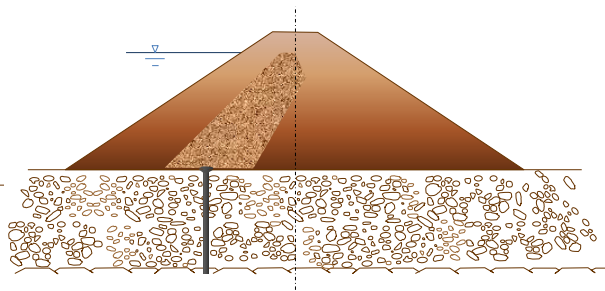
c) neprepustni tepih na mokri strani podaljša pot strujanja



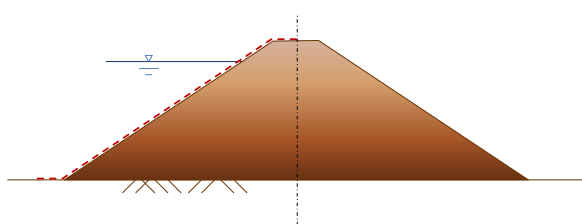
d) vertikalna tesnilna zavesa



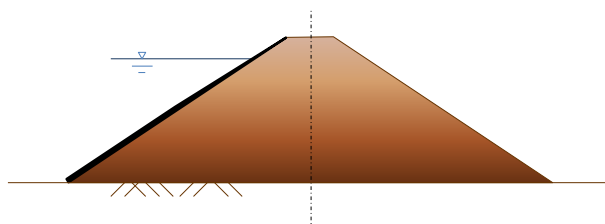
e) prepustni tepih na suhi strani in drenažne zavesa zmanjšujejo visoke porne tlake na suhi strani



f) neprepustna diafragma pod tesnilnim jedrom



g) tesnjenje z geomembranami na vodni strani



h) asfaltno tesnjenje na vodni strani

Slika 3.11: Vodotesnost nasipa na prepustnih tleh.

Osnovno izhodišče pri načrtovanju hidrotehničnih nasipov je, da nobeno tesnjenje ni popolnoma vodotesno, zato je vgradnja drenaž in filtrov za kontrolirano prestrežanje precejnih vod vitalnega pomena za varnost hidrotehničnih nasipov.

### 3.2.4 Odpornost na notranjo erozijo

Notranja erozija nastopi, ko pri večjih hidravličnih gradientih pride do premeščanja drobnih delcev znotraj telesa nasipa ali do iznašanja delcev iz nasipa, oboje pa lahko privede do porušitve. Približno 40 % vseh porušitev nasutih zemeljskih pregrad nastopi zaradi notranje erozije.

Notranja erozija je sestavljena iz štirih faz:

- začetek erozije,
- nadaljevanje erozije,
- formiranje zveznega kanala (pipe),
- nastanek porušne odprtine.

Pogosto se za procese notranje erozije uporablja enoten izraz »piping«.

Pri ugotavljanju kritičnega hidravličnega gradienta za notranjo erozijo moramo upoštevati sledeče vidike:

- smer toka vode,
- zrnavost in obliko zrn v materialu, izpostavljenem notranji eroziji,
- slojevitost temeljnih tal in nasipa.

Izpiranje preprečujemo z znižanjem hidravličnega gradienta in z vgradnjo filtrskih slojev med plasti zemljine, ki so ranljive za izpiranje.

#### **Filtri in filtrska pravila**

Filtri oz. filtrske plasti so plasti, s katerimi preprečujemo izpiranje drobnih delcev zemljine in nevarnost pojava notranje erozije. Filtre vgrajujemo vselej med nasipno zemljino in drenažno plastjo ali na stikih med različnimi plastmi, na primer med tesnilno plastjo in drenažno plastjo na suhi strani nasipa. Filter je vselej plast, ki deluje med dvema zemljinama, pri čemer ima prva izrazito finejša, druga pa izrazito debelejša zrna.

Kriteriji za dimenzioniranje filtrov so določeni empirično in temeljijo na zrnastosti sestavi materiala in prepustnosti zemljine, ki jo filter ščiti. Prepustnost filtra za vodo mora biti večja od prepustnosti zemljine. S tem preprečimo povečane tlake vode pred površino filtra.

Zrnavostna sestava filtrskega sloja mora zagotavljati stabilnost pred notranjo erozijo samega filtra, zato koeficient enakomernosti ne sme biti prevelik. V posameznih primerih potrebujemo več filtrskih slojev, saj le tako lahko zagotovimo postopno spremembo velikosti zrn v filtru. Tako dosežemo zadostno zaščito za zemljino in za filtrsko plast. Filtrske plasti hidrotehničnih nasipov običajno vsebujejo dva oziroma tri filtrske sloje s točno določeno granulacijo. Filtrski sloj mora zadostiti naslednjim zahtevam:

- stabilnost pred notranjo erozijo,
- ustrezna granulacija, pri kateri drobne frakcije sloja z manjšimi zrni ne morejo prehajati skozi pore debelozrnatega sloja,
- prepustnost debelozrnatega sloja naj bo vsaj 10-krat večja od prepustnosti drobozrnatega sloja,
- granulacija materiala mora biti takšna, da ne pride do segregacije med vgrajevanjem.

Med najbolj znanimi filtrskimi pravili so pravilo Terzaghija, USBR pravilo in pravilo USACE.

- Terzaghijevo filtrsko pravilo

$$\frac{D_{15} \text{ filter}}{D_{85} \text{ zemljina}} < 4 - 5 < \frac{D_{15} \text{ filter}}{D_{15} \text{ zemljina}} \quad (3.2)$$

- USBR filtrsko pravilo

$$12 < \frac{D_{15} \text{ filter}}{D_{15} \text{ zemljina}} < 40 \quad (3.3)$$

$$12 < \frac{D_{50} \text{ filter}}{D_{50} \text{ zemljina}} < 52 \quad (3.4)$$



- USACE filtrsko pravilo

$$\frac{D_{15} \text{ filter}}{D_{85} \text{ zemljina}} \leq 5 \quad (3.5)$$

$$\frac{D_{50} \text{ filter}}{D_{50} \text{ zemljina}} \leq 25 \quad (3.6)$$

Poleg klasičnih zemljinskih filtrov lahko uporabimo tudi geosintetike, vendar v primeru gradnje hidrotehničnih nasipov ti niso zaželeni.

Izbira ustreznih filtrov v hidrotehničnem nasipu je ključna za samo varnost zemeljskega objekta, saj lahko v primeru izpiranja materiala pride do katastrofične porušitve nasipa.



Slika 3.12: Porušitev zemeljske pregrade – Teton dam, kot posledica notranje erozije. (Vir: web.mst.edu.)

### 3.3 Konstrukcijski elementi hidrotehničnih nasipov

Osnovna konstrukcija hidrotehničnega nasipa sestoji iz naslednjih plasti in elementov:

- nosilna plast,
- tesnilna plast,
- plast, ki zagotavlja filtrsko stabilnost in dreniranje,
- plast, ki zagotavlja površinsko odpornost,
- elementi tehničnega opazovanja nasipov.

### 3.4 Zasnova konstrukcije hidrotehničnega nasipa

Na zasnovo konstrukcije hidrotehničnega nasipa vplivajo:

- geotehnične značilnosti temeljnih tal in nasipnega materiala,
- količina razpoložljivega materiala, ki je primeren za vgradnjo v nasip,
- razpoložljiv prostor za izvedbo nasipa v odvisnosti od lokacije razpoložljivega materiala za vgradnjo,
- klimatski pogoji, ki vplivajo na samo gradnjo hidrotehničnega nasipa,
- stopnja potresne aktivnosti območja gradnje,
- pogoji izvedbe ostalih objektov ob, v ali na nasipu,
- pogoji, ki se nanašajo na postopnost gradnje ter postopnost izkoriščanja hidrotehničnega objekta,
- hidrološke značilnosti območja predvidenega za gradnjo,
- ogroženost širšega območja v primeru porušitve objekta,
- okoljske zahteve,
- pogoji zahtevane varnosti.

### 3.5 Materiali za vgradnjo

Pri načrtovanju hidrotehničnih nasipov moramo vgradljivost materiala dokazati z ustreznimi laboratorijskimi preiskavami, saj kvaliteta nasipnega materiala določa zasnovo in načrtovanje nasipov (geometrijo) ter postopke priprave temeljnih tal, tehnologijo gradnje ter način komprimacije. Lastnosti, ki določajo primernost nasipnega materiala za vgradnjo v nasip, so ustrezna trdnost, togost, trajnost in vodoprepustnost po zgoščanju. Pri tem moramo upoštevati namen nasutja in dodatne pogoje, ki jih zahtevajo konstrukcije ob, v ali na nasutju. Pri izbiri nasutja moramo poleg prej omenjenih zahtev upoštevati tudi naslednje kriterije, vezane na nasipni material in temeljna tla:

- zrnastost,
- zgostljivost,
- vodoprepustnost,
- plastičnost,
- trdnost tal pod nasutjem,

- občutljivost na likvifikacijo,
- odpornost proti drobljenju,
- količino organskih snovi,
- kemično aktivnost,
- nevarnost onesnaženja okolja,
- občutljivost na prostorninske spremembe,
- občutljivost na nizke temperature in zmrzovanje,
- učinki materiala zaradi izkopa, transporta in vgrajevanja in
- možnost vezanja po vgradnji.

Načeloma lahko v nasip vgradimo vsak naravni material, vendar imamo v nekaterih primerih velike probleme z zagotavljanjem trajnosti, trdnosti, togosti in vodoprepustnosti. Organske zemljine in šota so materiali, ki po današnjih merilih niso primerni za vgradnjo in jih dosledno zavračamo kot nasipne materiale.

Med materiale mejne kakovosti sodijo volumsko neobstojni materiali. Volumska nestabilnost se javlja kot nabrekljivost (povečanje volumna) ali kolaps. V primeru vgradnje materiala mejne kakovosti se srečamo z občutljivostjo materiala na spremembe vlage, ki so lahko posledica vremenskih sprememb. Spremembe efektivnega napetostnega stanja pa so posledica razbremenitve ob izkopu ali spremembe tlaka porne vode. S prilagajanjem vlažnosti materiala (vlaženje oz. sušenje) dosežemo optimalne pogoje vgradnje. Z vgradnjo materiala mejne kakovosti se običajno poveča tudi obseg zemeljskih del in s tem stroški izgradnje nasipa. Zaradi omenjenih težav, lahko ločimo materiale za vgradnjo na bolj in manj primerne. Izbor materiala za vgradnjo je odvisen predvsem od razpoložljivih količin ustreznega materiala, oddaljenosti od mesta izkopa, ter še nekaterih ekonomskih in tehnoloških okoliščin.

Pomembno vlogo pri izbiri nasipnega materiala imajo mehanske lastnosti ter sposobnost zgoščanja, s katero zagotovimo homogen in trajen nasip. V vsakem primeru moramo s predpisanimi postopki ter preiskavami dokazati, da material, predviden za vgradnjo, izpolnjuje kriterije in lastnosti, privzete v računskih analizah, ki dokazujejo, da zgrajen objekt zadostuje vsem mejnim stanjem nosilnosti in uporabnosti. Pri izbiri materiala si lahko pomagamo s Preglednico 3.1, kjer je prikazana primernost posameznega materiala za

vgradnjo v različne zemeljske objekte. Podatke iz preglednice moramo uporabljati le kot okvirne kazalnike primernosti posamezne vrste materiala za gradnjo, zato moramo dokazati primernost za vgradnjo v vsakem primeru posebej.

V primerih, ko material iz bližnje okolice gradnje nasipa v svojem naravnem stanju ni primeren za vgradnjo, ga je potrebno s pomočjo posebnih postopkov izboljšati. Uporabimo lahko enega oz. več izmed spodaj naštetih postopkov:

- sprememba vlažnosti materiala (sušenje ali vlaženje),
- mešanje s cementom, apnom oz. drugimi materiali (za hidrotehnične nasipe manj priporočljivo),
- izvedba zaščite z ustreznim materialom ter
- uporaba drenažnih slojev.

Preglednica 3.1: Ocena relativne inženirske uporabnosti določenih vrst materialov za nasipanje ter zgoščevanje.

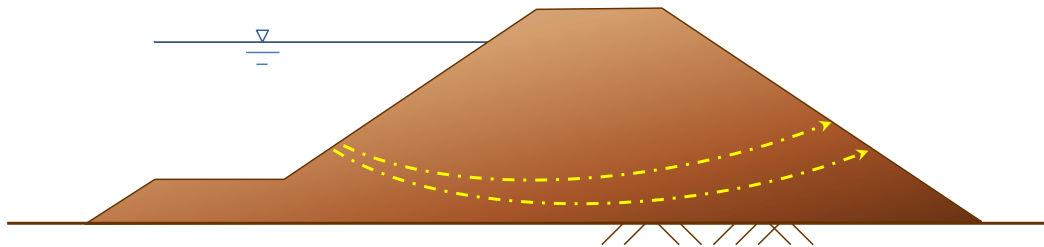
(Vir: info.grad.hr.)

Oznaka	Vrsta tal	Relativna primernost (1 = najboljša, 14 = najslabša)										
		Zemeljske pregrade			Kanali		Temelji		Prometnice			
		Homogen nasip	Jedro	Podpome cone/pasovi	Odpornost na erozijo	Zbita zemeljska obloga	Precejanje je pomembno	Precejanje ni pomembno	Nasipi			
									Mogoče zmrzovanje	Zmrzovanje ni mogoče	Površinski sloj	
Gramoz	GW	Dobro granuliran gramoz, malo drobnih delcev	-	-	1	1	-	-	1	1	1	3
	GP	Slabo granuliran gramoz, malo drobnih delcev	-	-	2	2	-	-	3	3	3	-
	GM	Zameljen gramoz	2	4	-	4	4	1	4	4	9	5
	GC	Zaglinjen gramoz	1	1	-	3	1	2	6	5	5	1
Pesek	SW	Dobro granuliran pesek, malo drobnih delcev	-	-	3	6	-	-	2	2	2	4
	SP	Slabo granuliran pesek, malo drobnih delcev	-	-	4	7	-	-	5	6	4	-
	SM	Zameljen pesek	4	5	-	8	5**	3	7	6	10	6
	SC	Zaglinjen pesek	3	2	-	5	2	4	8	7	6	2
Drobnozmate zemljine	ML	Nizko plastični melji	6	6	-	-	6**	6	9	10	11	-
	CL	Neorganske nizko plastične gline	5	3	-	9	3	5	10	9	7	7
	OL	Organska nizko plastična tla	8	8	-	-	7	7	11	11	12	-
	MH	Visoko plastični melji	9	9	-	-	-	8	12	12	13	-
	CH	Visoko plastične gline	7	7	-	10	8***	9	13	13	8	-
	OH	Organska tla visoke plastičnosti	10	10	-	-	-	10	14	14	14	-

### 3.6 Kritična stanja v delovanju nasipov

#### 3.6.1 Izpiranje

V coniranih hidrotehničnih nasipih lahko pride do precejanja vode skozi telo oziroma temelje nasipa in sicer skozi cone slabo prepustnega materiala v cone, kjer imamo dobro prepusten nasipni material. Do izpiranja pride, ko zaradi strujanja delci slabo prepustnega materiala, ki so veliko manjši od velikosti por dobro prepustnega materiala postopoma prehajajo iz osnovne mase materiala do dobro prepustnih delov hidrotehničnega nasipa. V primeru dolgotrajnejšega izpiranja se lahko v slabo prepustnih delih nasipa ustvarijo kanali skozi katere voda prodira z vedno večjo hitrostjo, kar povečuje erozijo drobnozrnatega materiala. Izpiranje lahko privede do rušenja ter popolne porušitve hidrotehničnega nasipa, zato moramo proces izpiranja preprečiti. To dosežemo z vgradnjo filtrov na stikih med različno prepustnim materialom. Ti služijo kot prehodni sloj med drobnozrnatim, slabše prepustnim ter debelozrnatim, dobro prepustnim materialom, ki preprečuje prehajanje drobnih delcev materiala. Pri načrtovanju in izvedbi filtrov moramo upoštevati pravila za dimenzioniranje le teh, saj le tako lahko zagotovimo ustrezno varnost proti izpiranju coniranih hidrotehničnih nasipov.



Slika 3.13: Izpiranje materiala.

#### 3.6.2 Površinska erozija

##### 3.6.2.1 Površinska erozija zaradi precejanja

Površinska erozija zaradi precejanja je odnašanje delcev drobnozrnatega materiala na suhi strani nasipa ali temeljnih tal. Erozijo, ki je posledica precejanja vode lahko preprečimo s pravilno konstrukcijsko zasnovo nasipa. Tako v nasipe običajno vgrajujemo drenaže, kjer se zbira precejna voda, katero redno odvajamo in s tem zmanjšamo oziroma preprečimo erozijo

drobnih delcev nasipnega materiala. Drenaže so narejene iz dobro prepustnega debelozrnatega materiala pri čemer ne smemo pozabiti na ustrezno filtrsko zaščito.

### **3.6.2.2 Površinska erozija zaradi toka vode**

Površinska erozija na mokri strani nasipa je posledica toka vode ob nasipu. Erozijo lahko preprečimo z izbiro ustrezne zaščitne obloge, ki je lahko:

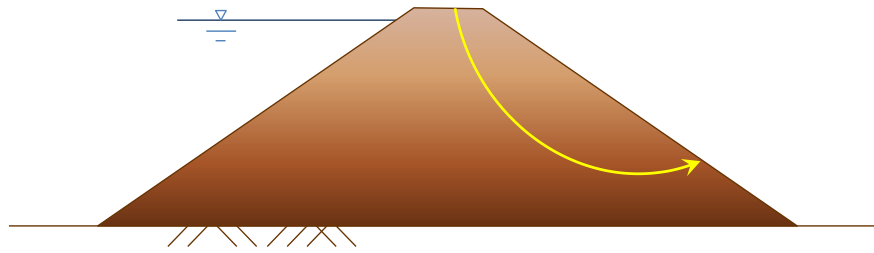
- asfaltna plošča,
- betonska plošča,
- plošča iz stabilizirane zemljine ali
- kamnita obloga.

### **3.6.3 Nestabilnost brežin in temeljnih tal v času gradnje**

Nasipe gradimo s komprimiranjem materiala v plasteh, pri vlagi, ki naj bi bila čim bližje optimalni. Z napredovanjem nasipavanja v višino se povečujejo obremenitve v temeljnih tleh in v spodnjih, predhodno zgrajenih delih nasipa, pri čemer poteka konsolidacija materiala, zaradi teže zgoraj ležečih plasti. Kadar so temeljna tla zasičena ali v primerih, ko je jedro nasipa grajeno iz vlažne, malo prepustne glin, sočasno z naraščanjem obremenitev narašča tudi presežni poreni tlak, kar ima lahko za posledico porušitev brežin že v času gradnje. K nestabilnosti brežin prispeva tudi relativno kratek čas gradnje ter vgradnja materiala, ki ima večjo vlažnost od optimalne, saj ta razvije večje porene tlake, kakor material z vlago manjšo od optimalne. V Sloveniji je znan primer porušitve dela pregrade za Travnikom v času gradnje, do katere je prišlo zaradi vdora zaledne vode v nasipno telo pregrade.

### **3.6.4 Stabilnost brežine na suhi strani pri polni akumulaciji**

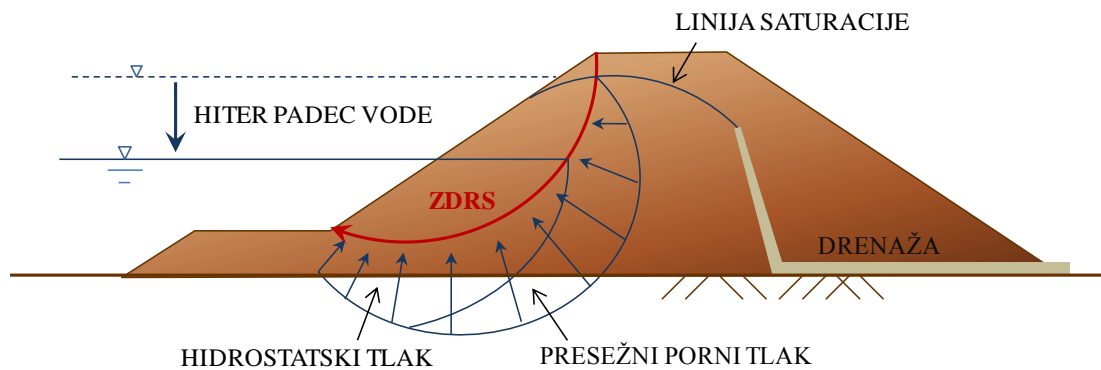
Pri računu stabilnosti brežine na suhi strani pri polni akumulaciji, ki predstavlja glavno statično in hidravlično obremenitev, moramo upoštevati dovolj velike varnostne faktorje, ki pa so vselej odvisni od tveganja, ki ga za okolico predstavlja porušitev nasipa. Pri običajnih obratovalnih pogojih imamo v nasipu le hidrodinamične tlake. Stabilnost preverjamo z računi, v katerih upoštevamo efektivne vrednosti strižne trdnosti ( $c'$ ,  $\varphi'$ ) in potencialno precejno polje. V primeru, da poreni tlak v jedru nasipa pri prvem polnjenju akumulacije do maksimalne kote še ni v celoti disipiral, lahko pride do dodatnega znižanja varnosti.



Slika 3.14: Zdrs dela brežine pri polni akumulaciji.

### 3.6.5 Stabilnost vodne strani brežine nasipa pri hitrem praznjenju akumulacije

Običajno je poleg potresne obremenitve kritična stabilnost vodne strani brežine zaradi velikih strujnih sil vode, ki ob hitrem znižanju gladine v akumulaciji zastaja v telesu nasipa. To ima za posledico pojav zastojnega poregga tlaka na vodni strani nasipa. Posledica hitrega praznjenja akumulacije je tako zmanjšanje varnosti brežin na vodni strani, vendar minimalna varnost brežine na nastopi nujno pri največjem znižanju gladine vode, zato moramo preveriti kako na varnost vplivajo različne spremembe gladine akumulacije. Račun se izvaja z efektivnimi vrednostmi strižne trdnosti  $c'$  in  $\phi'$ . Tlaki vode v nasipu ostajajo ob hitrem praznjenju in pri malo prepustnem nasipnem materialu praktično enaki kot pri polni akumulaciji.



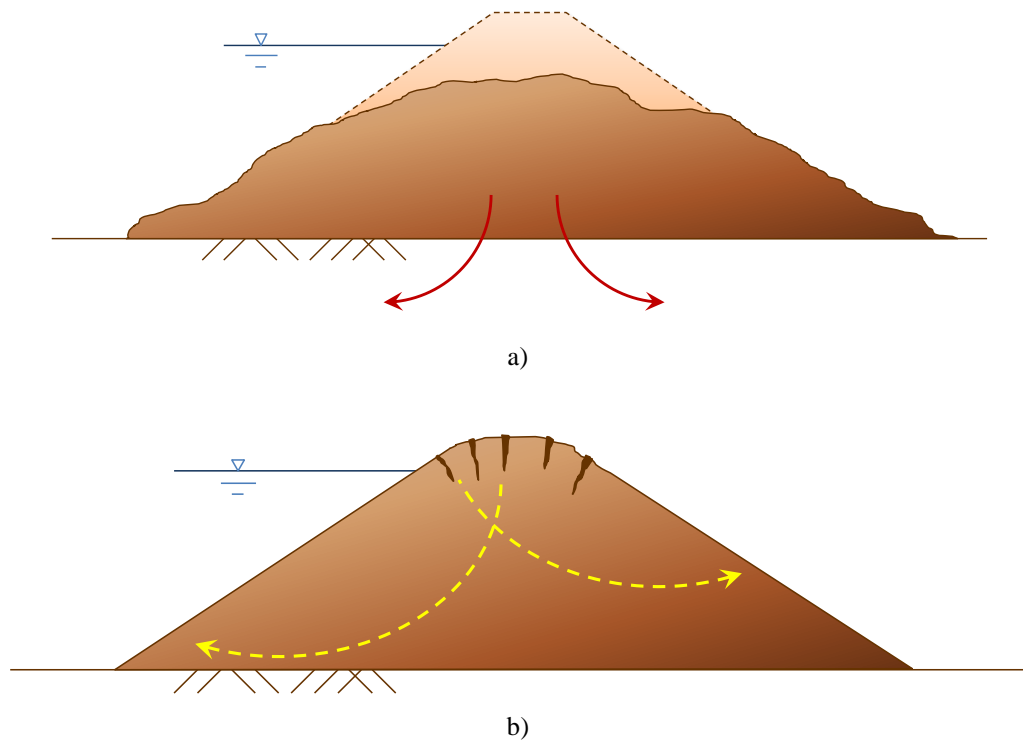
Slika 3.15: Zdrs dela brežine zaradi hitrega znižanja gladine vode.

### 3.6.6 Poškodbe zaradi potresne obremenitve

Poškodbe nasipov zaradi potresne obremenitve lahko razdelimo v dve skupini. V prvo spadajo poškodbe, ki so posledica likvifikacije ali utekočinjenja materiala. Običajno pride do pojava likvifikacije v primeru slabo zgoščenega z vodo zasičenega peščenega ali meljastega materiala, ob hipni dinamični obremenitvi. Pri tem porni tlak doseže velikost začetnih totalnih



napetosti, stika med zrnji ni več in zemljina izgubi vso svojo trdnost in se začasno utekočini. Nastale deformacije v splošnem vodijo k preoblikovanju nasipa in tudi do porušitve nasipa zaradi precejjanja. V drugem primeru, ko nasip leži na dobrih temeljnih tleh, pride do nastanka klinastih razpok, ki se povečujejo s povečevanjem potresne obremenitve in imajo za posledico nastanek globokih krožnih drsin.



Slika 3.16: Potresna obremenitev: a) likvifikacija materiala, b) nastanek razpok in globokih krožnih drsin.

### 3.7 Tehnično opazovanje

Tehnično opazovanje nasipa določata višina nasipa in količina akumulirane vode. Izvaja se med samo gradnjo ter v fazi uporabe zemeljskega objekta. Pri tehničnem opazovanju kontroliramo:

- posedke nasipa (posedalne plošče, horizontalni inklinometri),
- deformacije (geodetske meritve točk na površini, vertikalni inklinometri),
- porne tlake (piezometri),
- količino precejne vode,
- seizmično aktivnost (akcelometri, seizmografi).

## **4 PREDSTAVITEV BAZENA HE BREŽICE**

### **4.1 Opis trase nasipov**

Gradnja energetskih nasipov za potrebe HE Brežice je predvidena na levem in desnem bregu Save v skupni dolžini cca. 13 km. Naravni teren je enostaven za gradnjo, saj je raven, terasast in se le blago spušča od Krškega proti Brežicam. Kota terena v Krškem je na 152–153 m, na lokaciji pregradnega objekta za HE Brežice pa je kota na cca. 145–146 m.

### **4.2 Karakteristični geološki prerez tal**

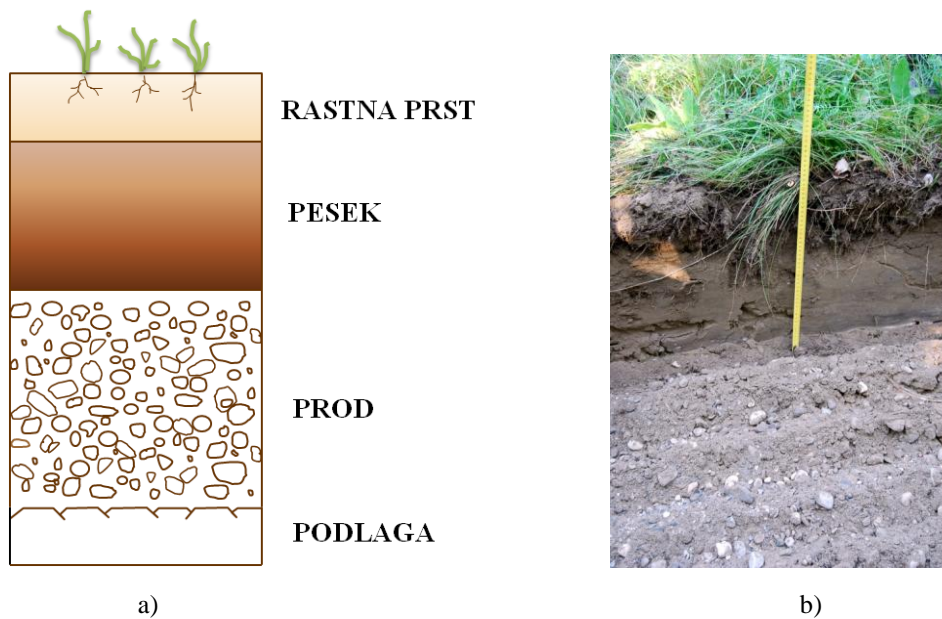
Ob spodnjem toku Save imajo vse terasaste ravnice podobno geološko zgradbo, ki je prikazana v Preglednici 4.1. Pod površinsko plastjo se nahaja od nekaj decimetrov do nekaj metrov debela plast mladih poplavnih sedimentov, ki po zrnavostni sestavi spadajo med drobne peske in meljaste peske. Pod peski se nahaja več metrska plast srednje do debelo zrnatega proda, ki leži na predkvartarni podlagi.

Vzdolž trase načrtovanih nasipov se debelina in sestava peska zelo hitro spreminjata v vzdolžni ter tudi prečni smeri, pri čemer debelina peščenih tal variira med 0 in 5 metrov, zato težko govorimo o karakterističnem geološkem prerezu tal. Spremenljivost sestave peščenega sloja je posledica poplavnih zasutij številnih starejših meandrov, regulacije struge Save in površinskega odlaganja sedimentov iz mlajših poplavnih tokov.

Debelina peščenega sloja narašča v smeri vodnega toka, torej od Krškega proti pregradnemu objektu HE Brežice in je debelejša ob strugi Save. Več peščenih nanosov je na desnem bregu.

Preglednica 4.1: Karakteristični geološki prerez tal. (Vir: Elaborat KMTal.)

Sloj	Debelina (m)	Opis sloja
1. sloj RASTNI POKROV	0,3–0,8	Površinska plast: orna zemlja, gozdna prst, travna ruša, humus
2. sloj PESEK	0–5	Zelo rahli poplavni sedimenti, prevladuje pesek in meljast pesek, podrejeno meljna glina. Po izvoru mlad poplavni nanos, zelo neenakomerne sestave. Veliko korenin in premoga, tudi steklo. Največ korenin je v bližini Save in v topolovih nasadih
3. sloj PROD NIZKE TERASE	4 – > 10	Karbonatni prod, srednje gost
4. sloj PREDKVARTARNA PODLAGA		Miocenski melj

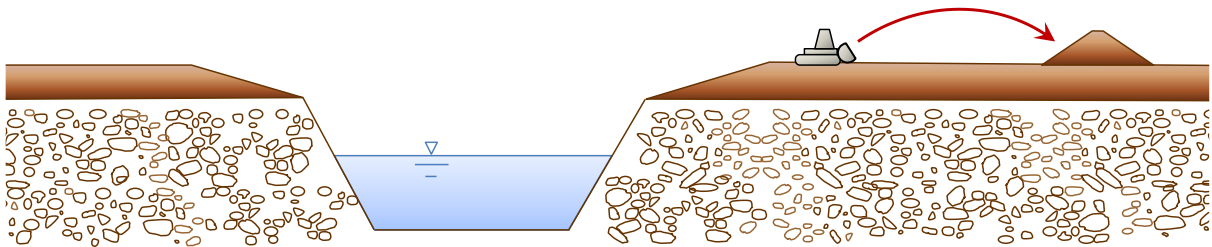


Slika 4.1: Karakteristični geološki prerez tal: a) shematski prikaz, b) dejansko stanje na terenu (razkop DR-1).

### 4.3 Idejna zasnova gradnje energetskih nasipov iz peska

Osnovna ideja temelji na predpostavki, da bi peščeno plast, ki prekriva teren, odrinili iz smeri struge proti vzdolžni osi nasipa, kjer bi odrinjen material vgradili v nasip (Slika 4.2). S tem

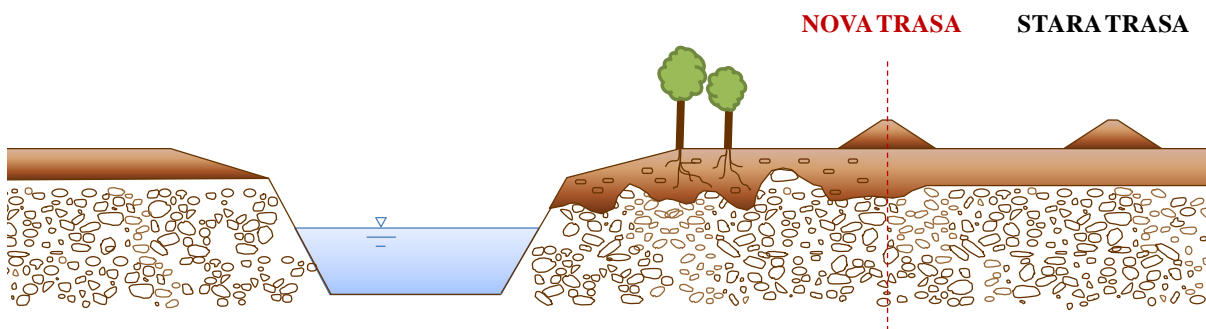
postopkom bi pridobili 1,4 milijona m<sup>3</sup> lokalnega materiala, kar bi vplivalo tako na ekonomski kot tudi okoljevarstveni vidik gradnje.



Slika 4.2: Shematski prikaz okoljsko in ekonomsko učinkovitega izkoriščanja lokalnih materialov za gradnjo energetskih nasipov.

Zaradi zahtev soglasodajalcev je v času projektiranja prišlo do premaknitve trase nasipov bližje strugi Save (Slika 4.3). S tem so se razmere v temeljnih tleh močno poslabšale. Glavne spremembe so naslednje:

- lokalno zelo povečana debelina peska v trasi nasipov,
- globoke korenine,
- prisotnost premoga.



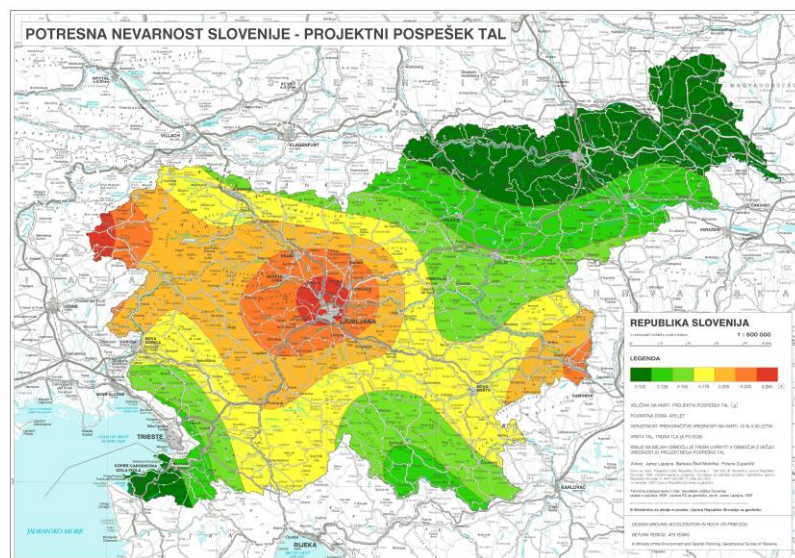
Slika 4.3: Shematski prikaz spremenjenega poteka trase z novimi ugotovitvami: lokalno povečane debeline peska, veliko premoga in globoke korenine.

Količine prekrivne rodovitne prsti in humusa ter količine peska in melja, ki so po zadnjih podatkih raziskav na razpolago znotraj akumulacijskega bazena, so prikazane v Preglednici 4.2.

Preglednica 4.2: Količina melja in peska ter humusa na območju akumulacije. (Vir: IRGO, 2009.)

	<b>Melj, pesek (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Humus (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Levi breg</b>	1.200.000	600.000
<b>Desni breg</b>	1.100.000	600.000

Gradnja energetskih nasipov na spodnji Savi je specifična tudi zaradi stalne seizmične aktivnosti Krške kotline. Krška kotlina je tektonska udorina, ki se pogreza že od zgornjega pliocena. V primeru rabe lokalnih peskov za gradnjo se le-ti ob potresni aktivnosti podvrženi nastanku likvifakcije, zato bo določitev projektnih seizmičnih parametrov lokacije odločujoča pri dokončnem sprejemanju sklepov o ravnanju s peski v temeljnih tleh in v nasipih. Obnašanje peskov pri potresni obremenitvi bo obravnavano v diplomski nalogi Jasne Smolar.



Slika 4.4: Karta potresne ogroženosti Slovenije – projektni pospešek tal. (Vir: [www.arso.gov.si](http://www.arso.gov.si).)

## **5 EKSPERIMENTALNI DEL**

### **5.1 Uvod**

V okviru svoje diplomske naloge sem opravila laboratorijske in terenske preiskave v obsegu, ki je bil potreben za ocenitev izvedljivosti gradnje energetskih nasipov iz lokalnih peskov. Preden smo zasnovali program raziskav, smo identificirali vprašanja, na katera morajo raziskave odgovoriti, in sicer:

- ali je mogoče peske ustrezno zgostiti,
- ali je možno peske vgrajevati v nasipe pod nadzorovanimi in sledljivimi pogoji,
- kakšne so fizikalne in mehanske lastnosti vgrajenih peskov,
- ali je dopustno melje in peske pustiti v temeljnih tleh pod nasipi in kakšne so tehnološke možnosti njihovega poboljšanja,
- kako zasnovati gradnjo nasipov z uporabo peskov,
- kakšen material uporabiti za gradnjo filtrov za zavarovanje nasipov iz peska pred notranjo erozijo.

### **5.2 Program raziskav**

Raziskave, ki sem jih izvedla, so potekale sočasno z raziskavami, ki jih je za potrebe izdelave geološko geotehničnega elaborata izvajal IRGO, in za potrebe izdelave ekspertnega mnenja o uporabnosti peska, izvajal UL FGG. Moje delo je obsegalo:

- sodelovanje pri izvajanju raziskovalnih jaškov, vzorčenje materiala v jaških in izvajanje in situ meritev v jaških,
- laboratorijske preiskave vzorcev iz raziskovalnih jaškov,
- sodelovanje pri gradnji poskusnega nasipa, meritve med gradnjo in instrumentiranje nasipa za geotehnično opazovanje,
- kontrolne odvzeme vzorcev iz poskusnega nasipa in ponovne kontrolne preiskave v laboratoriju ter
- opazovanje nasipa.

### 5.2.1 Odvzem vzorcev na terenu

Na terenu smo vzdolž trase nasipov izvajali vzorčenje tal za potrebe ocenitve relativne zgoščenosti raščenih tal in za ocenitev vgradljivosti materialov, ki bi jih izkopal na odseku med strugo Save in traso nasipov. Dne, 13.6.2009, smo na levem bregu Save opravili 11 razkopov, dne, 20.6.2009, pa 15 razkopov na desnem bregu Save. Pri tem smo v vsakem razkopu vzorčili vse značilne plasti znotraj peščenega sloja. V nekaterih jaških peskov ni bilo mogoče intaktno vzorčiti, saj so bili tako rahli, da so se prosto sipali iz izkopne brežine.

S krožno ploščo z lahko padajoča utežjo smo na mejnicah med sloji merili deformacijske lastnosti plasti v naravnem stanju kot vrednosti dinamičnega deformacijskega modula ( $E_{vd}$ ), pri čemer so ti podatki zgolj informativni, saj so se v plasteh razvile velike deformacije pod ploščo že ob nameščanju plošče v potrebno lego.



Slika 5.1: Raziskovalni jaški: a) intaktno vzorčenje v raziskovalnem jašku, b) poskus ugotavljanja togosti naravnih plasti s krožno ploščo.



Slika 5.2: Lokacije opravljenih razkopov in poskusnega nasipa.

Pri pregledu jaškov smo identificirali naslednje posebnosti:

- zelo gost sistem drevesnih in drugih korenin, tako živih kot odmrlih, ki so se gale tudi več kot 2 m globoko v tla,
- pojav lamin in plasti z visoko koncentracijo premogovih delcev med peskom,
- zelo rahlo sestavo in nizko vlago posameznih plasti in
- veliko spremenljivost debeline in sestave peščene plasti.

### 5.2.2 Laboratorijske preiskave

V laboratoriju Katedre za mehaniko tal na UL FGG smo opravili laboratorijske preiskave po metodah opisanih v Prilogi A. Preiskali smo 27 vzorcev zemljin, odvzetih iz 25 raziskovalnih jaškov na levem in desnem bregu bodočega bazena HE Brežice.



### Program laboratorijskih preiskav

Program laboratorijskih preiskav je obsegal nabor klasičnih geotehničnih preiskav, ki pa so bile dopolnjene z nekaterimi manj znanimi in redko izvajanimi preiskavami za potrebe določanja disperzivnosti in občutljivosti zemljin na pojav notranje erozije. Laboratorijske preiskave smo opravili po naslednjih metodah:

Klasifikacija zemljin (USCS)	JUS U.B1.001
Ugotavljanje vlažnosti, $w$ (%)	SIST/ISO/TS 17892 – 1:2004
Ugotavljanje gostote drobnozrnatih zemljin, $\rho$ , $\rho_d$ ( $t/m^3$ )	SIST/ISO/TS 17892 – 2:2004
Ugotavljanje gostote drobnozrnatih zemljin – metoda s piknometrom	SIST/ISO/TS 17892 – 3:2004
Ugotavljanje zrnastostne sestave	SIST/ISO/TS 17892 – 4:2004
Edometrski preskus s postopnim obremenjevanjem, $E_{oed}$ (kPa)	SIST/ISO/TS 17892 – 5:2004
Enoosni tlačni preizkus, $q_u$ (kPa)	SIST/ISO/TS 17892 – 7:2004
Neposredni strižni preskus, $c'$ (kPa), $\varphi'$ ( $^\circ$ )	SIST/ISO/TS 17892 – 10:2004
Ugotavljanje prepustnosti s konstantnim in spremenljivim hidravličnim padcem	SIST/ISO/TS 17892 – 11:2004
Atterbergove meje plastičnosti, $w_P$ , $w_L$ , $I_P$	SIST/ISO/TS 17892 – 12:2004
Določanje nasipne gostote	ASTM D 4254 – 00
Standardni Proctorjev preizkus, $w_{opt}$ (%), $\rho_{dmax}$ ( $kg/m^3$ )	DIN 18127
Ugotavljanje vsebnosti lahkih delcev (masni %)	JUS B.B8.034
Določanje gorljivih in organskih snovi (masni %)	JUS U.B1.024
Določanje disperzivnosti zemljin – metoda svaljka	BS 1377: Part 5: 1990 točka 6.3
NEF – No Erosion Filter test	Sherard et al. 1984

### 5.2.3 Gradnja poskusnega nasipa in kontrolne raziskave na poskusnem nasipu

Gradnja poskusnega nasipa je bila predvidena z namenom, da se v dejanskih okoliščinah preveri zanesljivost rezultatov laboratorijskih raziskav. Poskusni nasip je bil zgrajen na levem bregu Save, cca. 500 m gorvodno od pregradnega objekta HE Brežice. Gradnja nasipa je potekala v času med 27.9.2009 in 1.10.2009.

Najprej je bilo potrebno pripraviti temeljna tla. Pripravljalna dela so obsegala:

- odstranitev dreves, štorov in površinskega rastnega sloja,
- izkop cca. 90 cm površinskega sloja peska (izkopani material je bil shranjen na začasni deponiji nasipnega materiala),
- buldožersko izravnavo temeljnih tal z rahlim padcem proti severu ter
- komprimiranje temeljnih tal z vibracijskim valjarjem.

Sledila je gradnja nasipa s komprimiranjem nasipnega materiala v plasteh debeline cca. 0,4 m v kontroliranih pogojih. Zgoščanje nasipnega materiala se je izvajalo s pomočjo vibracijskega valjarja tipa Bomag, statične teže 12 ton, ki ni bil opremljen s sistemom CCC. Kasneje je bil valjar zamenjan za lažji valjar statične teže 8 ton.

Poskusni nasip je bil dolg cca. 40 m in širok cca. 10 m ter po vzdolžni osi razdeljen na tri prečne profile P1, P2 in P3, v območju katerih so se izvajale kontrolne meritve. Kontrolne meritve so obsegale:

- meritve gostote in vlage z izotopsko sondo,
- meritve gostote in vlage s kalibriranimi cilindri,
- meritve togosti plasti s krožno ploščo,
- odvzem vzorcev za kontrolne raziskave v laboratoriju.

V nasip sta bili, 1.10.2009, vgrajeni dve posedalni plošči za merjenje posedanja nasipa po komprimaciji in plastične cevi za izvajanje meritev prepustnosti z nalivanjem in hkratnim opazovanjem erozije.

## 5.2.4 Opazovanje nasipa

Do decembra 2009 je bila izvedena ena kontrolna meritev posedanja ter en ogled stanja nasipa. Ogled nasipa dne, 21.11.2009, je pokazal, da je nasip iz peska zelo ranljiv na notranjo erozijo. Izpiranje smo lahko opazili na vseh šibkih mestih nasipa (to so vse diskontinuitete nastale ob vgradnji posedalnih plošč in cevi) kljub temu, da je bil sam nasip zaščiten z geotekstilijo.

Možnosti nadaljnjega opazovanja so bile prekinjene zaradi poplav v decembru 2009, ki so močno poškodovale telo nasipa.



a)



b)



c)



d)

Slika 5.3: Poskusni nasip: a) 10.10.2009, b) 21.11.2009, opazno je izpiranje materiala, c) nasip po poplavah v decembru 2009 (Vir: Laboratorij KMTal.), d) 23.1.2010.

## 5.3 Rezultati raziskav

### 5.3.1 Indeksne preiskave

Rezultati indeksnih preiskav so zbrani v preglednicah, in sicer ločeno za levi in desni breg. Vzorcem odvzetim na terenu smo po standardnih metodah, ki so opisane v Prilogi A določili:

- naravno vlago,
- zrnastostno sestavo materiala,
- gostota zrn brez por in votlin,
- naravno gostoto,
- nasipno gostoto,
- mejo plastičnosti in mejo židkosti finih zrn,
- izgubo pri žarjenju ter
- vsebnost lahkih zrn.

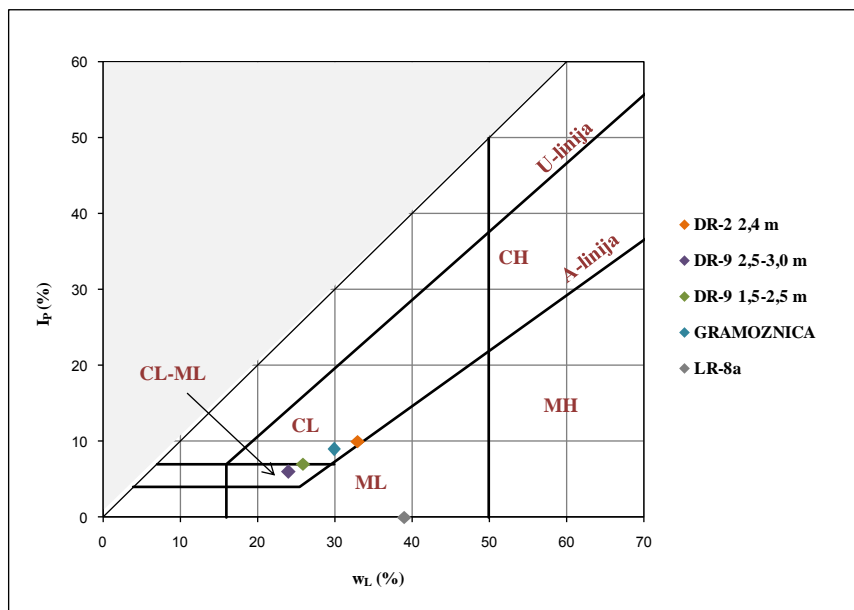
Preglednica 5.1: Indeksni kazalniki lastnosti izkopnega materiala, izkopi levi breg.

Indeksni kazalnik lastnosti	LR-1	LR-1	LR-2	LR-4	LR-8a	LR-8a
	0,9 m	1,8 m	0,9 m	2,3 m	0,9 m	2,3 m
Naravna vlaga, $w$ (%)	8,7	20,9	18,1	3 – 31	10,0	21,5
Gostota zrn, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )					2,64	
Naravna gostota, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,36	1,38	1,61		1,4	1,23
Naravna suha gostota, $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,25	1,15	1,36		1,27	1,01
Nasipna gostota, $\rho_{nas}$ (g/cm <sup>3</sup> )		1,08				1,01
Naravni količnik por, $e_0$	1,11	1,31	0,941		1,08	1,61
Maksimalni količnik por, $e_{max}$		1,44				1,61
Optimalna vlaga, $w_{opt}$ (%), (SPP)						27,5
Max. suha gostota, $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> ) (SPP)						1,34
Izguba po žarjenju na 400 °C, (%)		5,1		0,4 – 0,7		
Vsebnost lahkih delcev, (%)		6,7		0		12,2
Meja plastičnosti, $w_p$ (%)						Ni pl.
Meja židkosti, $w_L$ (%)	41	49				39

Preglednica 5.2: Indeksni kazalniki lastnosti izkopnega materiala, izkopi desni breg.

<b>Indeksni kazalnik lastnosti</b>	<b>DR-1a</b>	<b>DR-2</b>	<b>DR-3</b>	<b>DR-4</b>	<b>DR-7</b>	<b>DR-9</b>
	<b>0,9 m</b>	<b>2,4 m</b>	<b>1,9 m</b>	<b>1,0 m</b>	<b>1,1 m</b>	<b>2,5 m</b>
Naravna vlaga, $w$ (%)	15,7	16 - 23	15,6	4,6	5,4	17,1
Gostota zrn, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )		2,56				
Naravna gostota, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,57	1,49	1,33		1,39	
Naravna suha gostota, $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,36	1,21	1,15		1,32	
Nasipna gostota, $\rho_{nas}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,11	1,04	1,30			1,28
Naravni količnik por, $e_0$	0,941	1,19			1,00	
Maksimalni količnik por, $e_{max}$	1,38	2,56				1,06
Optimalna vlaga, $w_{opt}$ (%), (SPP)		19,5				13,4
Max. suha gostota, $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> ) (SPP)		1,58				1,77
Izguba po žarjenju na 400 °C, (%)	8,2	5,6	5,5		0,9	1,2
Vsebnost lahkih delcev, (%)	14,9	9,3	7,5		0,2	1,1
Meja plastičnosti, $w_p$ (%)		23				18
Meja židkosti, $w_L$ (%)		33				24

Atterbergove meje plastičnosti smo določili na petih vzorcih meljastih peskov z različnimi deleži finih zrn. Položaj finih delcev (frakcije 0–0,5 mm) je prikazan na AC diagramu na Sliki 5.4. Vsi materiali so nizko plastični, tako je  $w_L < 40$  % in ležijo tik ob A-liniji, ki razmejuje gline in melje. Vzorec LR-8a ni plastičen.

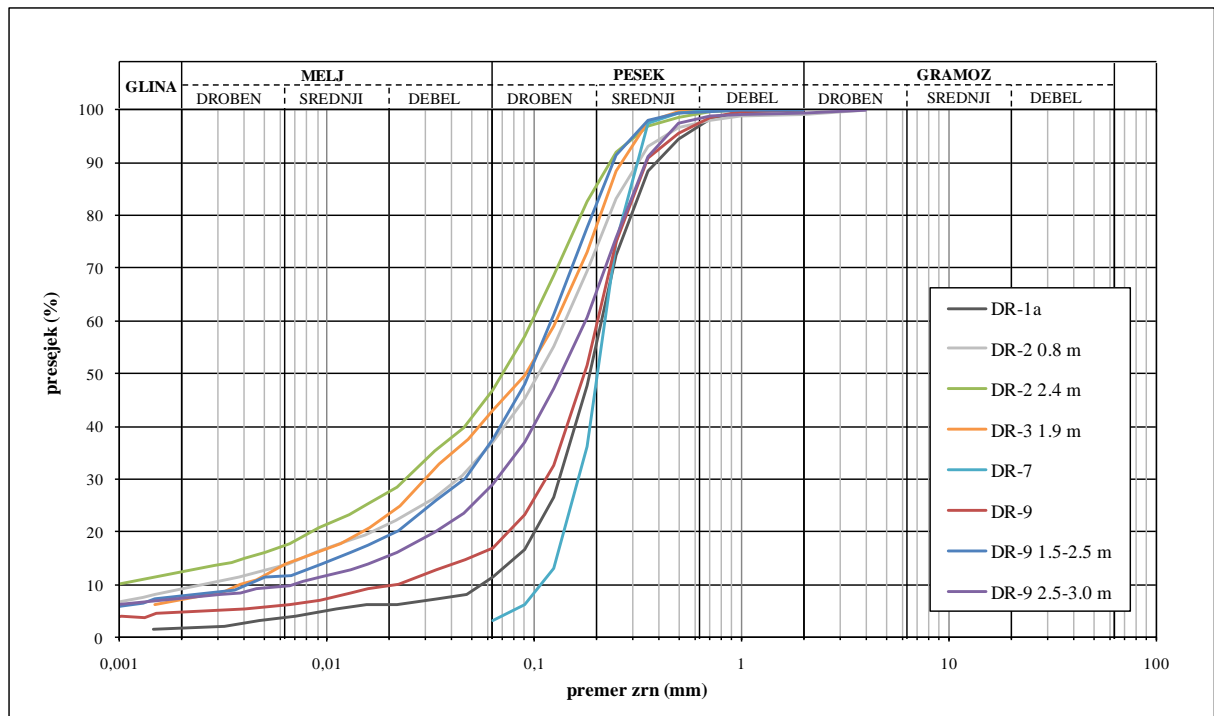


Slika 5.4: Položaj finih zrn v AC diagramu.

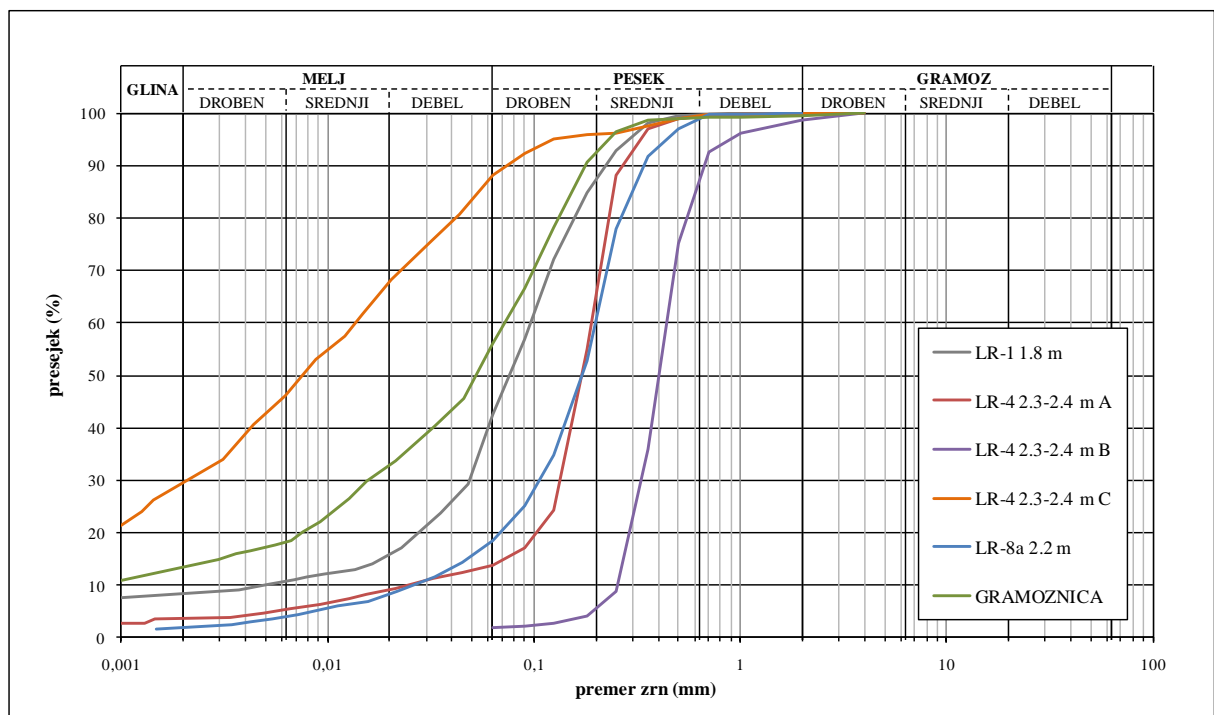
Zrnovostna sestava materiala sodi med najpomembnejše indeksne kazalnike lastnosti. Na Sliki 5.5 so prikazane krivulje zrnivosti vzorcev odvzetih na desnem bregu, na Sliki 5.6 pa vzorcev odvzetih na levem bregu. Glede na zrnovostno sestavo lahko vzorce razdelimo v pet skupin (Preglednica 5.3).

Preglednica 5.3: Razdelitev materiala glede na zrnovostno sestavo.

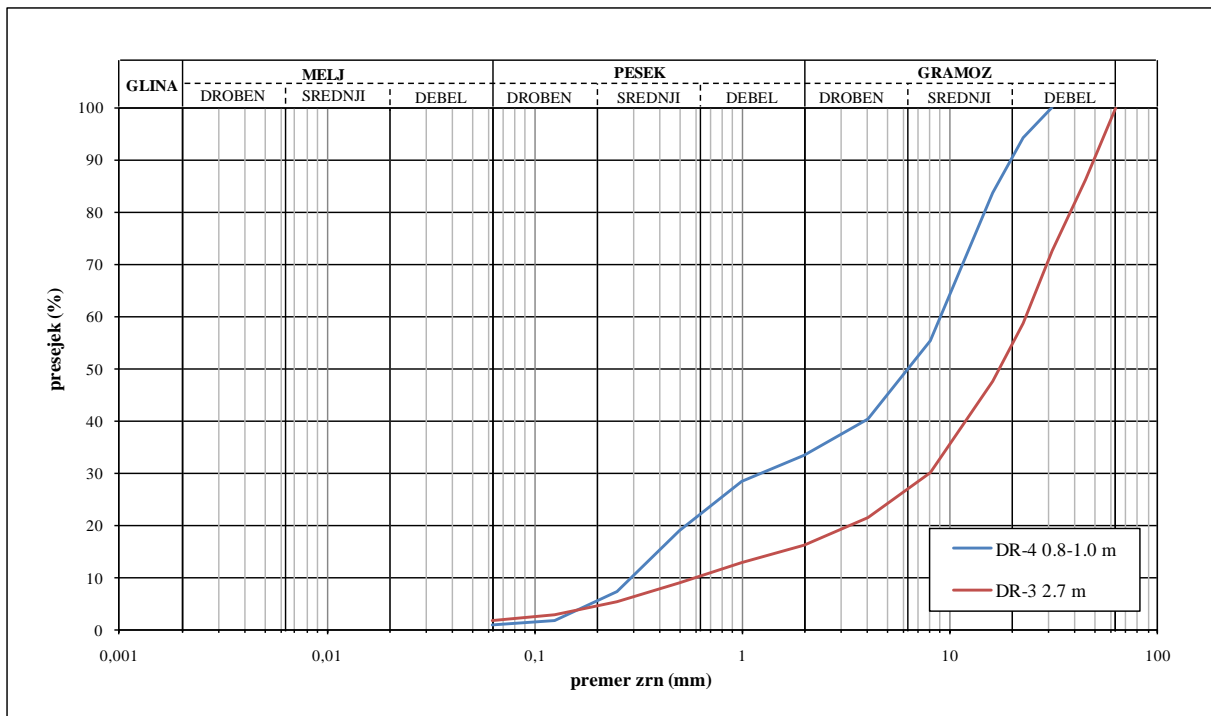
1	čisti melji (v lečah med plastmi meljastega peska)	LR-4 2,3–2,4 m C	
2	drobni meljasti peski z deležem drobne frakcije med 30–50 %	GRAMOZNICA LR-1 1,8 m,	DR-2 0,8 m DR-2 2,4 m DR-3 1,9 m DR-9 1,5–2,5 m DR-9 2,5–3,0 m
3	meljasti drobni peski z deležem drobne frakcije med 12–20 %	LR-4 2,3–2,4 m A LR-8a 2,2 m	DR-1a DR-9
4	uniformirani srednji peski (v lečah med plastmi meljastega peska)	LR-4 2,3–2,4 m B	
5	slabo granuliran gramoz, pod slojem meljastega peska		



Slika 5.5: Krivulje zrnivosti materialov odvzetih iz razkopov na desnem bregu.



Slika 5.6: Krivulje zrnivosti materialov odvzetih iz razkopov na levem bregu.



Slika 5.7: Krivulji zrnivosti gramozov in gramozne plasti pod peski.

Iz rezultatov indeksnih preiskav lahko ugotovimo naslednje:

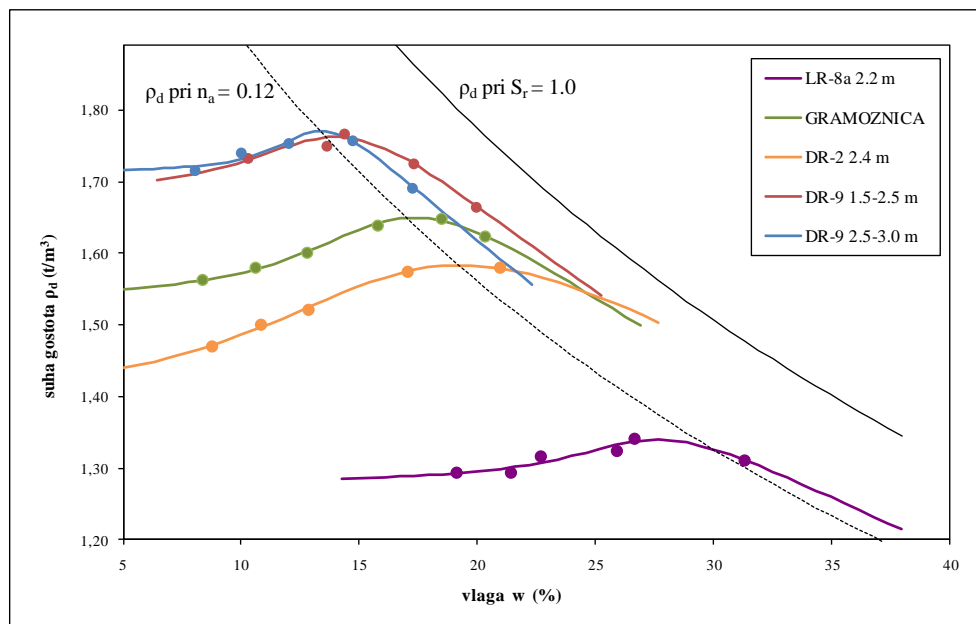
- aluvijalna plast ima širok razpon zrnovostne sestave, kljub temu pa je prevladujoča komponenta droben in srednji pesek,
- fina zrna so nizko plastična,
- vlažnost posameznih plasti je zelo spremenljiva, nekatere plasti so skoraj suhe, druge pa zelo vlažne,
- posamezne plasti so zelo rahle in imajo gostoto, ki ustreza rahlo nasutemu stanju,
- lokalno je opažena visoka vsebnost premogovih delcev.

### 5.3.2 Preiskave vgradljivosti

#### 5.3.2.1 Standardni Proctorjev preizkus

Zgostljivost materiala smo v laboratoriju preverjali z uporabo standardnega Proctorjevega preizkusa (*SPP*). Rezultati reprezentativnih vzorcev so prikazani na Sliki 5.8.



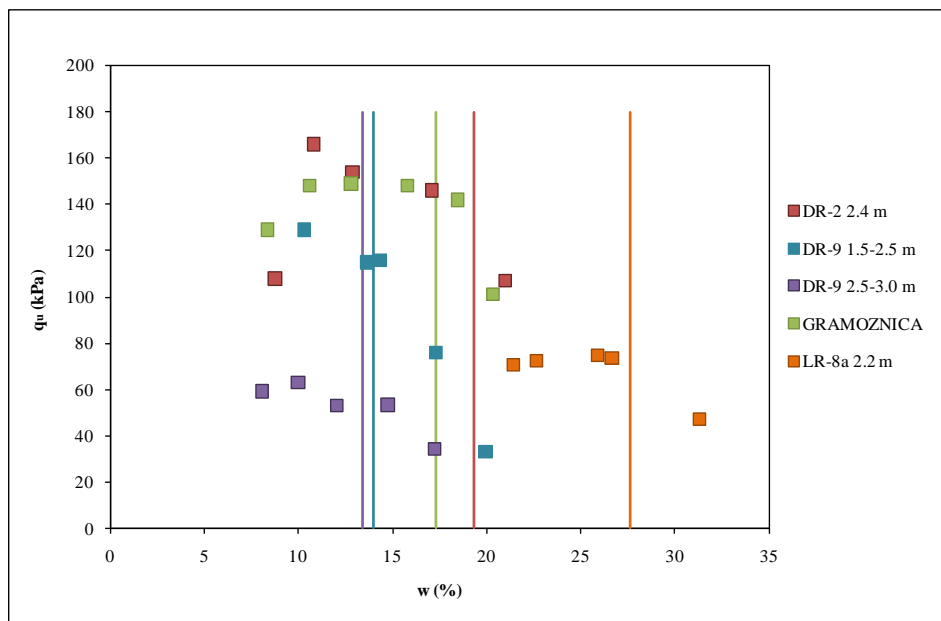


Slika 5.8: Proctorjeve krivulje zgoščenosti preiskovanega materiala.

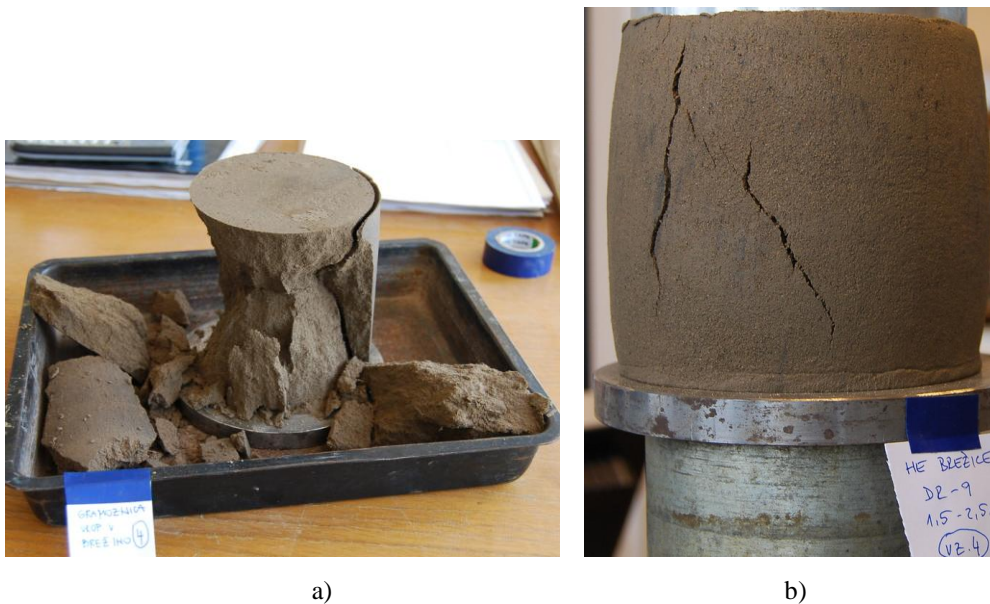
Iz Proctorjevih krivulj lahko ocenimo, da se preiskani material zadovoljivo mehansko vgrajuje, vendar pri vgrajevanju potrebuje veliko vode. Referenčne gostote, ki smo jih dosegli, se gibljejo med 1,58 do 1,77 t/m<sup>3</sup>. Zaradi velike vsebnosti premoga ima vzorec LR-8a 2,2 m najnižjo suho gostoto in najvišjo optimalno vlago.

### 5.3.2.2 Kontrola enoosne tlačne trdnosti

Preizkušancem zgoščenim po postopku *SPP* smo določili enoosno tlačno trdnost. Na Sliki 5.9, kjer so prikazani rezultati preiskav lahko vidimo, da vzorci z višjim deležem finih frakcij izkazujejo višjo enoosno tlačno trdnost. Ta upada z vlago višjo od optimalne. Večina vzorcev se je porušila na podoben način, in sicer z nastankom razpok v vertikalni smeri. Izjema so le vzorci z vlago višjo od optimalne, pri katerih je prišlo do sodčkaste porušitve.



Slika 5.9: Enoosna tlačna trdnost v odvisnosti od vlage zemljine; vertikalne črte predstavljajo optimalno vlago za posamezen vzorec.

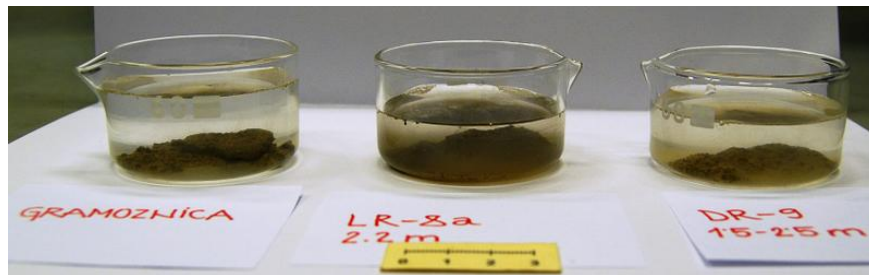


Slika 5.10: Določanje enoosne tlačne trdnosti: a) vzorec se je porušil zaradi nastanka razpok v vertikalni smeri, b) sodčkasta porušitev vzorca.

### 5.3.2.3 Ocena disperzivnosti meljastih peskov

Disperzivnost meljastih peskov smo poskušali ugotoviti s pomočjo metode svaljka, in sicer na treh vzorcih: LR-8a 2,2 m; GRAMOZNICA; DR-9 1,5–2,5 m. Po opazovanju smo preizkušance razporedili v naslednje razrede:

- GRAMOZNICA – 1. razred (nedisperzivna)
- LR-8a 2,2 m – 3. razred (disperzivna)
- DR-9 1,5-2,5 m – 2. razred (disperzivna)



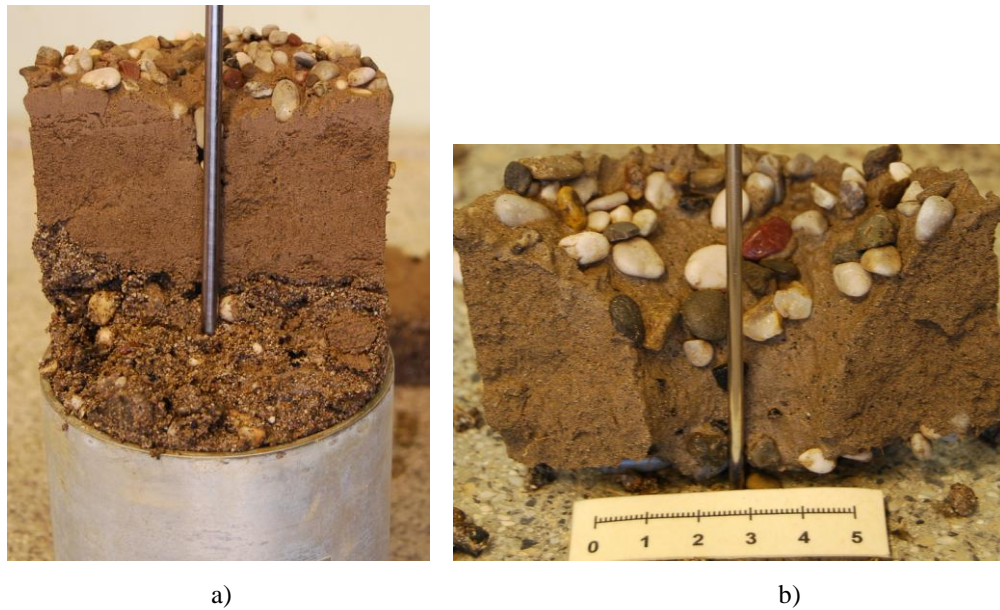
Slika 5.11: Kalnost vode za različne vzorce po petih minutah. (Vir: Laboratorij KMTal.)

#### 5.3.2.4 Filtrska sposobnost naravnega gramoza

Filtrska sposobnost naravnega gramoza smo določili z *NEF* (Non Erosion Filter) testom.

V prvem primeru smo v cilinder nabili 5 cm naravnega gramoza vzorca DR-4 0,8–1,0 m frakcije 0–22 mm. Nanj smo nabili 4 cm preizkušanca iz nahajališča v GRAMOZNICI, skozi katerega smo naredili luknjico premera 5 mm. Naravni filter (gramoz) je zadovoljivo opravil svojo funkcijo, saj ni prišlo do izpiranja preizkušanca, filtrska plast pa je ostala čista.

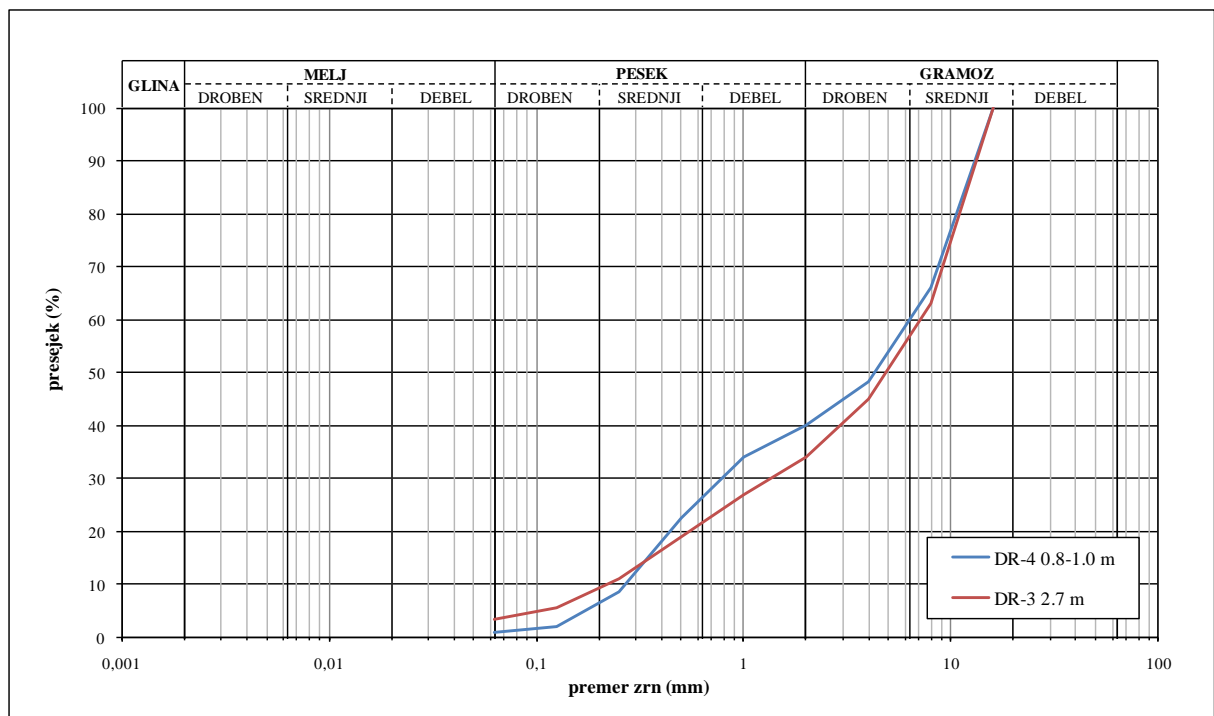
V drugem primeru smo na nasut filter frakcije 4–8 mm nabili preizkušanelec iz GRAMOZNICE ter skozenj napravili luknjico premera 3 mm. Takoj, ko smo odprli dovod vode, je skozi perforirano spodnjo ploskev začela teči umazana voda, kar je bila posledica izpiranja preizkušanelega materiala. Po razgradnji smo lahko to trditev le potrdili, saj se je luknjica v tesnilni plasti povečala iz 3 mm na 25 mm.



a)

b)

Slika 5.12: Rezultati NEF testa (Vir: Laboratorij KMTal.): a) vzorec peska in filtrska plast iz naravnega gramoza, b) tesnilna plast pri uporabi neustreznega filtra.

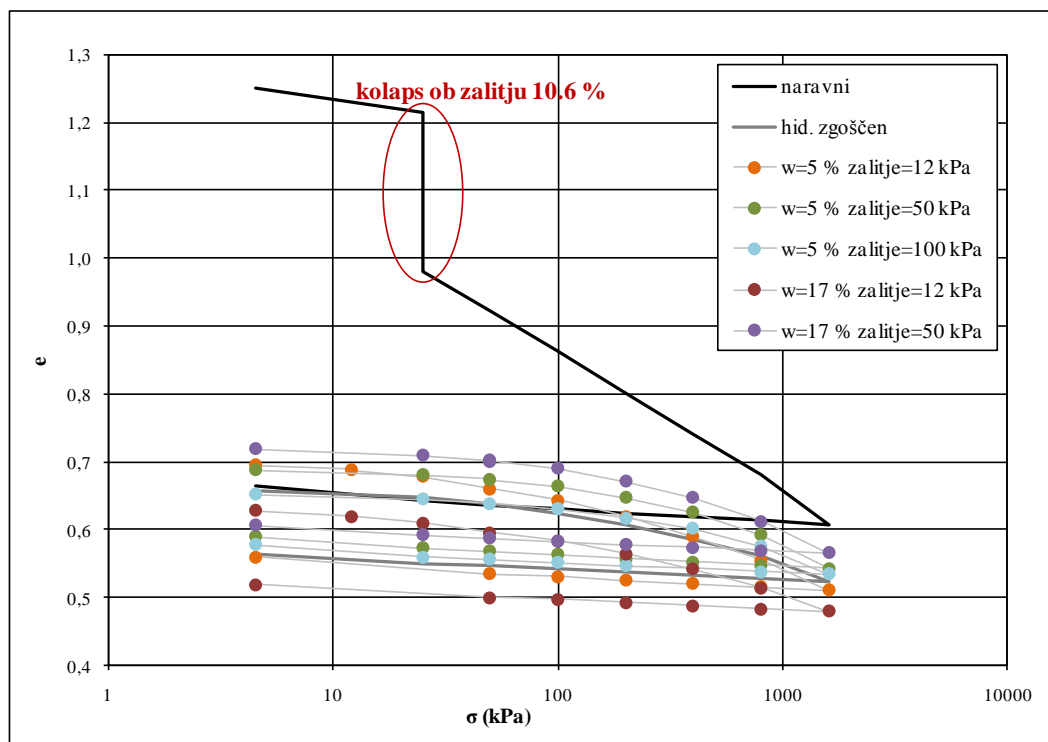


Slika 5.13: Zrnovostni sestavi frakcije 0–16 mm za gramoze DR-4 0,8–1,0 m in DR-3 2,7 m.

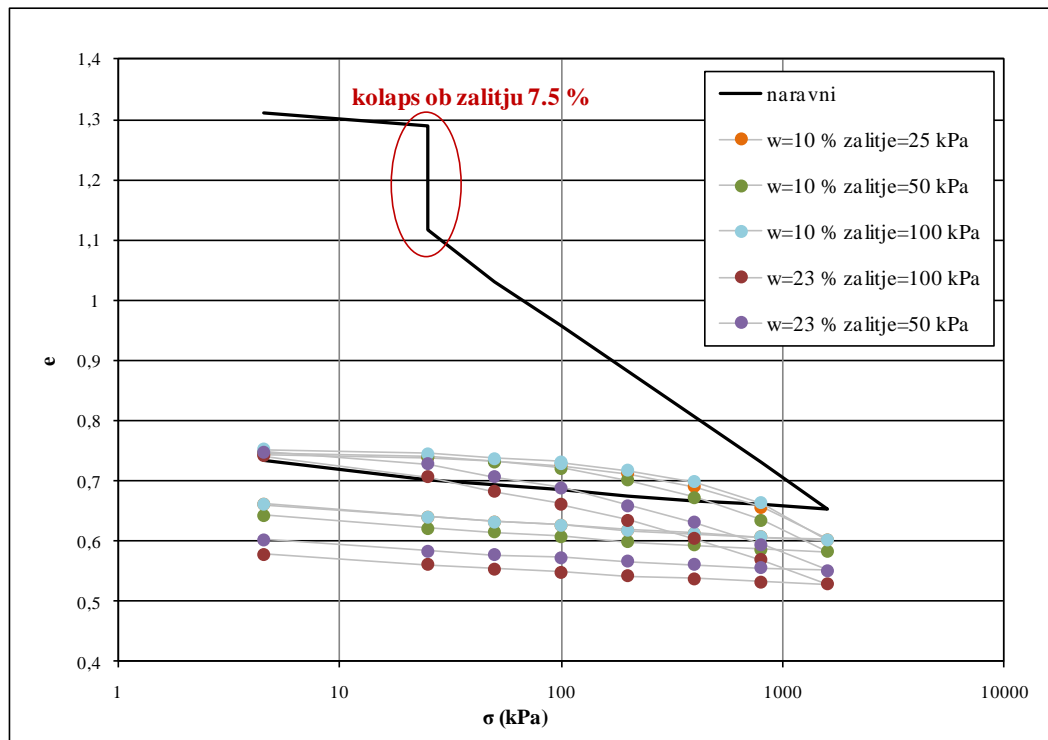
### 5.3.3 Deformabilnost in kolaps

Edometrske module stisljivosti smo določili na dveh vzorcih: GRAMOZNICA in DR-9 1,5–2,5 m. Preizkušance smo za vgradnjo pripravili na naslednji način:

- po 3 preizkušance smo nabili na suhi strani Proctorjeve krivulje, jih konsolidirali in zalili pri treh različnih bremenskih stopnjah (12, 25, 50 in 100 kPa),
- po dva preizkušanca smo nabili pri vlagah na mokri strani Proctorjeve krivulje, jih konsolidirali in zalili pri različnih bremenskih stopnjah,
- po en preizkušanec je bil vgrajen pri gostoti, ki ustreza naravni gostoti na terenu,
- en preizkušanec je bil pripravljen s hidravličnem zgoščanjem.

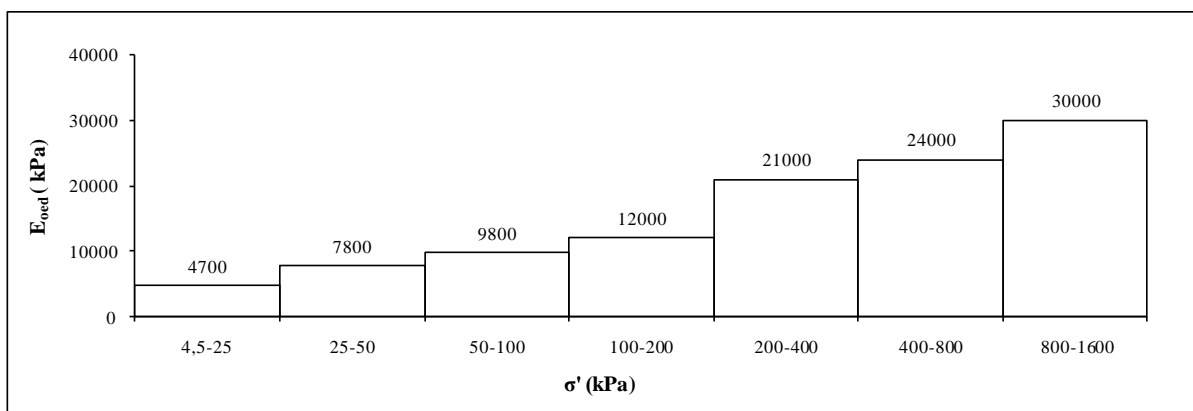


Slika 5.14: Rezultati preiskave stisljivosti na vzorcu DR-9 1,5–2,5 m.



Slika 5.15: Rezultati preiskave stisljivosti na vzorcu GRAMOZNICA.

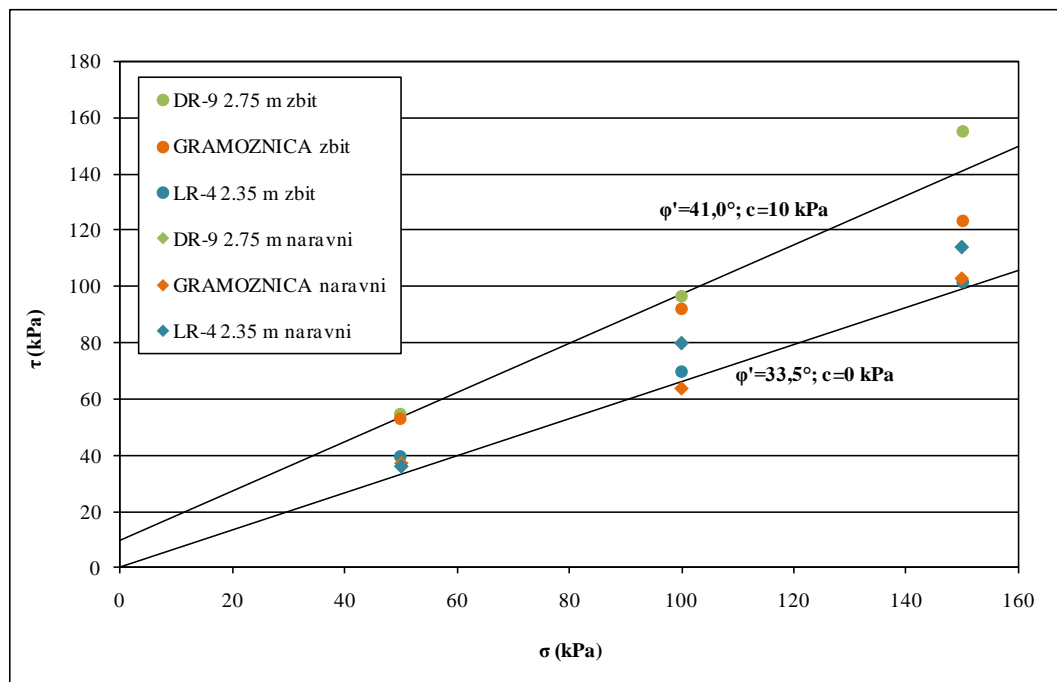
Oba vzorca vgrajena pri naravni gostoti sta ob zalitju kolapsirala za 7,5 % oziroma 10,6 %. Preostali preizkušanci, ki so bili mehansko ali hidravlično zgoščeni niso kolapsirali ne glede na vlago ob vgradnji ali bremensko stopnjo. Izmerjeni edometriški moduli nabitih materialov se gibljejo v okviru vrednosti, ki veljajo za srednje peske:  $E_{oed} = 5\text{--}15$  MPa. Pri visokih obremenitvah ( $\Delta\sigma = 800\text{--}1600$  kPa) pa se vrednosti dvignejo na  $E_{oed} = 18\text{--}30$  MPa, kar po standardni nomenklaturi ustreza gostim peskom.



Slika 5.16: Moduli stisljivosti v povezavi z bremenskimi stopnjami za idealno, 100 % zgoščen pesek, vzorec DR-9,  $e = 0,644$ .

### 5.3.4 Strižna odpornost

Strižno trdnost materiala smo določili z neposrednim strižnim preskusom, in sicer na rahlo zbitih preizkušancih, s katerimi smo se hoteli približati naravnemu stanju zemljine in preizkušancih zbitih na maksimalno gostoto po SPP. V obeh primerih smo preizkušance zalili pri polni obremenitvi, saj bodo materiali v energetskih nasipih po izgradnji hidroelektrarne vselej saturirani. Kot lahko vidimo na Sliki 5.17, je strižna trdnost materialov dokaj visoka in za vrednotenje materialov za potrebe vgradljivosti ni relevantna. Preizkušanci vgrajeni v naravnem stanju imajo zelo majhno oz. skoraj nično kohezijo, medtem ko pri zbitih vzorcih kohezija nekoliko naraste.



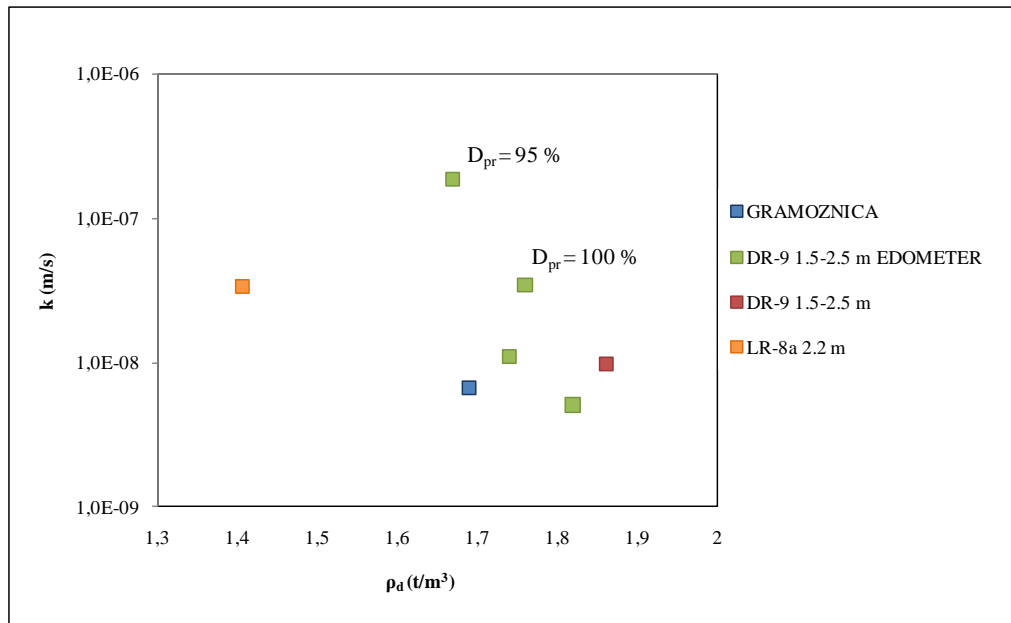
Slika 5.17: Rezultati strižnih preiskav naravnih in nabitih materialov.

### 5.3.5 Prepustnost

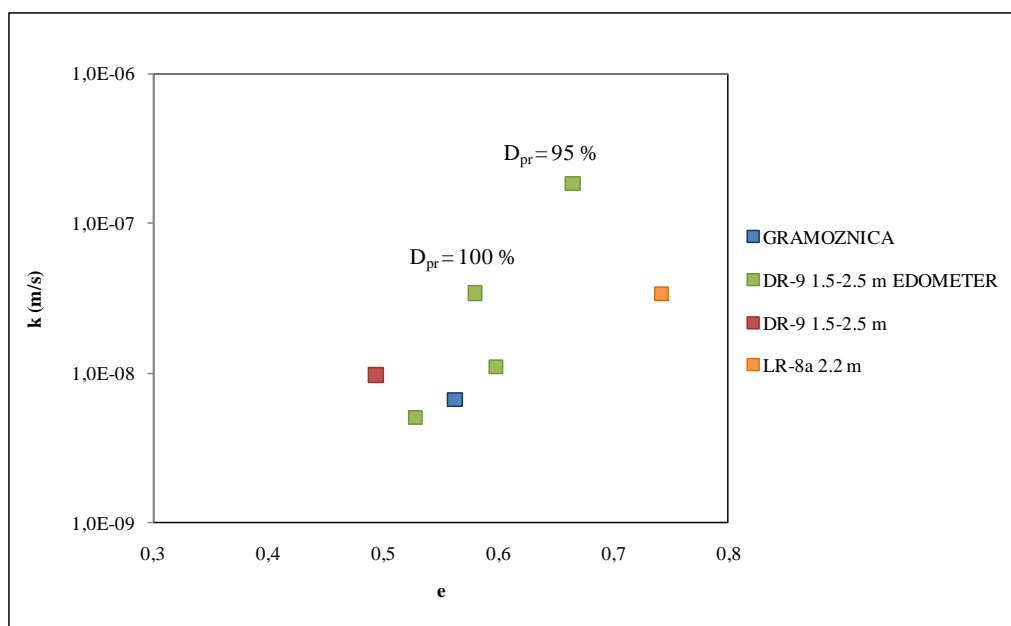
Prepustnost materiala smo določili v edometru in v triosni celici. V edometru smo določili prepustnost preizkušancu DR-9 1,5–2,5 m vgrajenem pri naravni vlagi in pri vlagi na mokri strani Proctorjeve linije pri bremenskih stopnjah 100 in 800 kPa. Zaradi velikega raztrosa rezultatov smo preiskavo vodoprepustnosti opravili še v triosni celici, kjer smo preiskali še dva vzorca: LR-8a 2,2 m in GRAMOZNICA. Kot lahko vidimo na Sliki 5.18, je

vodoprepustnost materiala močno odvisna od zgoščenosti materiala in je lahko pri 95 % zgoščenosti tudi do 10-krat višja kot pri 100 % zgoščenosti.

Na splošno lahko ocenimo, da je vodoprepustnost preiskovanih peskov majhna, kar je predvsem posledica vsebnosti finih zrn.



Slika 5.18: Preiskava prepustnosti v odvisnosti gostote.



Slika 5.19: Preiskave prepustnosti v odvisnosti od količnika por.



### 5.3.6 Rezultati terenskih raziskav

#### 5.3.6.1 Podatki predhodnih raziskav

Poskusni nasip je bil zgrajen v bližini raziskovalnega jaška LR-8a na levem bregu reke Save. Raziskovalni jašek LR-8a predstavlja glede na ugotovitve primerljivih raziskav na terenu karakteristično lokacijo za gradnjo nasipov na nizvodnem delu trase, za levi in desni breg. Podatke iz raziskovalnega jaška najdemo v Preglednici 5.1 in Preglednici 5.4.

Preglednica 5.4: Sestava tal na lokaciji raziskovalnega jaška LR-8a.

Globina (m)	Opis
0,0–0,9	melj s koreninami
0,9–2,2	peščen melj z lečami čistega peska in premoga
2,2–4,0	meljast pesek
4,0–	peščen prod

#### 5.3.6.2 Priprava temeljnih tal za gradnjo nasipa – ugotovitve

Zgoščanje materiala je bilo izvedeno z 12-tonskim vibracijskim valjarjem, pri čemer začetni prehodi valjarja niso bili učinkoviti, saj je bila dosežena zgoščenost  $D_{PR}$ : 74–84 %. Možni vzroki za slabše zgoščanje so lahko posledica prisotnosti korenin ali prenizke vlage zemljine v tleh.



Slika 5.20: Priprava temeljnih tal. (Vir: Laboratorij KMTal.)

Vlaženje temeljnih tal se je izvajalo s pomočjo cisterne za vodo, vendar zaradi nizke prepustnosti zemljine voda ni penetrirala v globino, temveč je odtekala v curkih po padnici pripravljenega planuma temeljnih tal. Zaradi mehke podlage se je prvotno urejen planum temeljnih tal ob vlaženju uničil, pri čemer so nastale globoke kolesnice. Po ekvilibraciji vlage je bila z zgoščanjem dosežena do največ 92 % zgoščenost.



Slika 5.21: a) vlaženje temeljnih tal s pomočjo cisterne za vodo (Vir: Laboratorij KMTal.), b) vlaženje materiala na začasni deponiji.

Kontrolne meritve zgoščenosti in togosti so pokazale veliko nehomogenost rezultatov meritev in tudi znatne razlike v rezultatih dobljenih s klasično metodo s cilindri in meritvami z izotopsko sondo. S klasično metodo zgoščanja z valjarji temeljnih tal ni bilo možno enakomerno zgotiti do povprečne zgoščenosti nad  $D_{PR}$ : 90 % in togosti utrjene površine  $E_{vd}$  nad 7,5 MPa.

### 5.3.6.3 Gradnja poskusnega nasipa

Pri gradnji poskusnega nasipa smo za nasipni material uporabili peske iz izkopov na lokaciji. Material je bil shranjen na začasni deponiji, kjer smo ga negovali in vlažili s savsko vodo. Površinsko so bile že na sami deponiji, kasneje tudi med vgradnjo materiala v nasip odstranjene korenine z ročnim grabljanjem, vendar se je tak postopek pokazal kot zamuden in premalo učinkovit. V kontroliranih pogojih smo v nasip vgradili 5 nasipnih plasti debeline 0,4 m.

Na prvih treh nasipnih plasteh se je zaznaval močan vpliv odziva mehkih temeljnih tal v podlagi, togost vgrajenih plasti pa je bila nizka,  $E_{vd}$  pod 7,5 MPa. Velik vpliv na slabše zgoščanje materiala imajo v materialu prisotne korenine, ki jih bo potrebno pri gradnji energetskih nasipov odstraniti. Na peti nasipni plasti so bile dosežene višje togosti,  $E_{vd} > 10$  MPa, ki so posledica ekvibracije vlage v deponiranem materialu in zmanjšanja vplivov mehke podlage. Meritve so pokazale, da je treba za ekvibracijo vlage material negovati in vlažiti že na deponiji, saj je vlaženje pri vgrajevanju v plast premalo učinkovito.

Pri kontroli kakovosti nasipnih plasti so bili rezultati meritev z izotopsko sondo in klasično metodo s cilindri primerljivi. Opazili pa smo, da so vlage dobljene s cilindri nekoliko nižje, suhe gostote pa le za spoznanje višje od tistih, dobljenih z izotopsko sondo. V peti nasipni plasti je bil delež premoga majhen, kar je pripomoglo k primerljivosti rezultatov dveh povsem različnih tipov meritev.

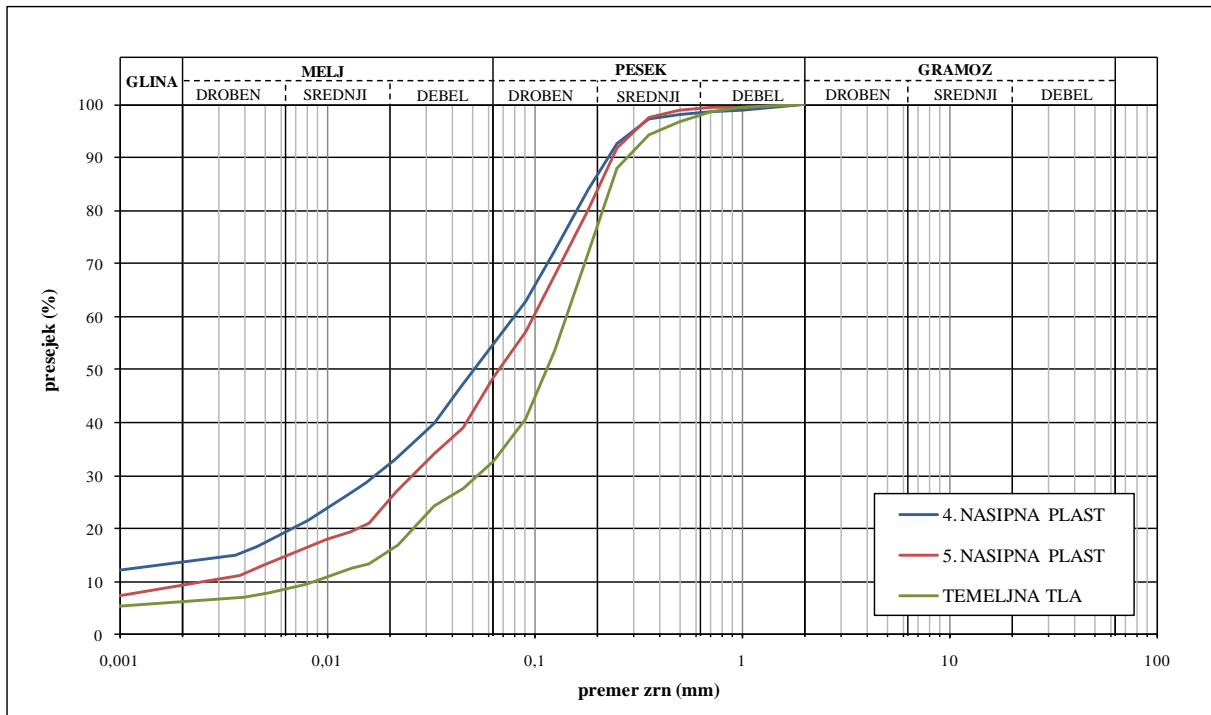


Slika 5.22: a) zgoščanje nasipnega materiala z vibracijskim valjarjem, b) končna podoba poskusnega nasipa.

### 5.3.7 Kontrolne laboratorijske preiskave

Med gradnjo poskusnega nasipa so bili v temeljnih tleh in nasipnih plasteh odvzeti kontrolni vzorci za laboratorijske preiskave. Te so bile opravljene po enakih postopkih kot preiskave vzorcev iz raziskovalnih jaškov. Iz rezultatov preiskav, ki so zbrani v Preglednici B7, je razvidno, da se zrnastostna sestava materiala v temeljnih tleh poskusnega nasipa ujema z vzorcem DR-9 1,5 m, zrnastostna sestava nasipnega materiala pa se ujema z vzorcem z

oznako GRAMOZNICA. Rezultate s poskusnega nasipa lahko tako posplošimo za celotno obravnavano območje nasipov za HE Brežice.



Slika 5.23: Krivulje zrnivosti materiala iz poskusnega polja.

#### 5.4 Povzetek ugotovitev

S pomočjo laboratorijskih in terenskih preiskav smo prišli do naslednjih zaključkov:

- lokalno razpoložljiv material je rahel droben in srednji pesek, ki lokalno vsebuje velike količine premoga,
- peski vsebujejo veliko korenin, ki jih je potrebno pred vgrajevanjem odsejati,
- vlažnost posameznih plasti peska je zelo spremenljiva,
- pesek pri naravni gostoti kolapsira,
- preiskani material se ob zadostni količini vode zadovoljivo mehansko vgrajuje,
- strižna trdnost peska je dokaj visoka,
- peski so malo prepustni za vodo,
- peski so občutljivi na notranjo erozijo,
- gramoz, ki se nahaja na lokaciji je primeren za uporabo v filtrski plasti.

Za potrebe gradnje nasipov je potrebno:

- zgotiti temeljna tla,
- odstraniti bogat koreninski sistem,
- posebno pozornost nameniti filtrom,
- posebno pozornost nameniti utekočinjenju peska,
- pred vgradnjo peska v nasipe je potrebno iz njega odstraniti korenine in ga primerno navlažiti.

## 6 ZAKLJUČEK

V svoji diplomski nalogi sem raziskovala uporabnost lokalnih peskov za gradnjo energetskih nasipov v bazenu HE Brežice. Energetski nasipi iz peska se bodo v Sloveniji gradili prvič, zato so dobljeni rezultati laboratorijskih in terenskih preiskav zanimivi tudi za kasnejšo uporabo pri gradnji drugih podobnih zemeljskih objektov.

Temeljna tla na trasi nasipov so zelo bogata s koreninskim sistemom in premogom. Koreninski sistem predstavlja veliko nevarnost za nastanek poti skozi katere pronica voda ter povzroči izpiranje drobnozrnatega materiala. Prav tako so temeljna tla zelo rahla in podvržena strukturnemu kolapsu. Zaradi korenin in nevarnosti kolapsa bo potrebno temeljna tla pred gradnjo nasipov sanirati. Presojajo o tem, s kakšnim postopkom bo možno izvesti učinkovito sanacijo temeljnih tal, bo moral izdelati projektant.

Na območju med strugo Save in traso nasipov bo možno pridobiti zadostne količine nasipnega materiala, ki ga bo ob ustrezni vlažnosti možno primerno zgostiti v nasipe do zgoščenosti od 95 %–97 % po Proctorju. Podobno, kakor pri temeljnih tleh, bo potrebno tudi nasipnemu materialu odstraniti korenine.

Ker so zgoščeni peski malo prepustni in slabo injektibilni, bo potrebno tem lastnostim prilagoditi načine tesnjenja. Zelo verjetno bodo nasipi tesnjeni z uporabo geosintetičnih bentonitnih trakov GCL. Tudi tesnitev z bentonitnimi trakovi bo prvič uporabljena v energetskih nasipih v Sloveniji.

Posebno pozornost pri gradnji energetskih nasipov bo potrebno nameniti vgradnji filtrov in pravilni izvedbi drenažnih kanalov na suhi strani nasipov, saj so peščeni nasipi zelo občutljivi na izpiranje. Prodnati material, ki se nahaja na trasi nasipov, je primeren za gradnjo filtrskih slojev.

Celotno konstrukcijsko zasnovano nasipov bo potrebno prilagoditi lastnostim peska. Idealni nasipi iz peska naj bi bili široki, z visokim nasipnim platojem in blagim naklonom brežin.

Z raziskavami smo tako dokazali, da so peski na lokaciji HE Brežice primerni za mehansko vgrajevanje v energetske nasipe, vendar bo potrebno pred vgradnjo opraviti določene izboljšave materiala z odsejavanjem korenin in dodatnim vlaženjem ter homogeniziranjem. Pri dokončni presoji ustreznosti lokalnih peskov za vgradnjo v energetske nasipe bo tako odločilna potresna obremenitev in z njo likvifikacija peščenega materiala.

Z vgradnjo lokalnih peskov v energetske nasipe se bomo izognili izgradnji deponij viškov neuporabnega materiala, močno skrajšali transportne poti in znižali izpuste CO<sub>2</sub>, kar bo imelo pozitivne tako okoljske, kakor tudi finančne učinke.

## **VIRI**

### **Uporabljeni viri**

BSI. 1981. Code of practice for Earthworks. BS 6031: f. 30–35.

JUS. 1980. Projektovanje nasutih brana i hidrotehničkih nasipa. U.C5.020: f. 1, 2.

Logar, J., 2005. Priprava slovenskih tehničnih specifikacij za geotehnično projektiranje. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor: str. 122–125.

Nonveiller, Ervin., 1983. Nasute brane, Projektiranje i građenje. Zagreb, Školska knjiga: str. 30–42 in 188–198 in 310–337.

Oblak, B., 2006. Načrtovanje, gradnja in spremljava zemeljskih del pri gradnji prometnic - nasipi in vkopi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer: str. 40–43 in 84, 85.

Petkovšek, A., 2010. Geotehnična študija ravnanja z lokalnimi peski v temeljnih tleh in ocena njihove uporabnosti za vgradnjo v energetske nasipe. Geotehnični elaborat. Ljubljana, IRGO consulting d.o.o.: 10 str.

Pulko, B., 1997. Gradnja visokih nasipov iz materialov mejne kakovosti. V: Ašanin Gole, P. (ur.). Zbornik strokovnega posveta: Zemeljska dela pri gradnjah in rekonstrukcijah cest. Gornja Radgona, MEGRA, 10. mednarodni sejem gradbeništva in gradbenih materialov, 16. aprila 1997. Ljubljana, DRC, družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: str. 14–19.

Sherarard, L. J., Woodward, J. R., Gizienski, F. S., Clevenger, A. W. 1963. Earth-Rock dams, Engineering Problems of design and Construction. New York, John Wiley & Sons, Inc: str. 81–91 in 115–157.



Steinman, Franc, Banovec, Primož. 2004. Hidrotehnika, Vodne zgradbe I. Ljubljana, KMTe: str. 9 – specifičnost hidrotehničnih objektov, str. 1–13 – načrtovanje zemeljskih pregrad.

Wahlstrom E., Ernest. 1974. Dams, dam foundations, and reservoir sites. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing company: str. 142, 143.

Design and Construction of Embankment Dams

<http://aitech.ac.jp/~narita/tembankmentdam1.pdf> (6.2.2010)

Flood protection in the Netherlands

<http://www.rws.iwr.usace.army.mil/wksp2006July10.html> (20.1.2009)

Karta potresne nevarnosti (intenzitete)

[http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/intenzitete\\_potresov.html](http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/intenzitete_potresov.html) (25.2.2009)

Nasipi i brane

[http://info.grad.hr!/res/odbfiles/1789/radni%20materijali/szavits-g7\\_nasipi\\_i\\_brane-radno.pdf](http://info.grad.hr!/res/odbfiles/1789/radni%20materijali/szavits-g7_nasipi_i_brane-radno.pdf)  
(25.11.2009)

Nasip za obrambo pred morjem – Nizozemska

[http://www.bugbog.com/gallery/netherlands\\_pictures/netherlands\\_pictures\\_dr.html](http://www.bugbog.com/gallery/netherlands_pictures/netherlands_pictures_dr.html)  
(12.4.2010)

Nasip za akumulacijo vode za HE Blanca

<http://www.hes.si/he-blanca-fotogalerija.html> (15.3.2009)

Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad

<http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2004/seizmicnost.pdf> (25.2.2010)

Porušitev zemeljske pregrade – Teton dam

[http://web.mst.edu/~rogersda/teton\\_dam/Failure%20of%20Teton%20Dam.jpg](http://web.mst.edu/~rogersda/teton_dam/Failure%20of%20Teton%20Dam.jpg) (25.2.2009)

Univerzitetni študijski program gradbeništvo

<http://www2.fgg.uni-lj.si/index.php?page=static&item=225> (25.11.2009)

### **Ostali viri**

Nonveiller, E., 1987. Kliženje in stabilizacija kosina. Zagreb, Školska knjiga: str. 24, 31, 43.

Šuklje, L., 1984. Mehanika tal. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo:  
str. 37, 38, 43.

Hidroelektrarne na spodnji Savi

<http://www.hes.si/he-brezice.html> (16.1.2010)

Kompaktorji za zemljo

<http://www.teknoxgroup.com/si/ponudba/gradbena-mehanizacija/kompaktorji> (16.1.2010)

Probability of dike failure due to uplifting and piping

<http://ssor.twi.tudelft.nl/~jan/pdfs/noopod.pdf> (18.4.2009)

## **PRILOGE**

### **Priloga A Laboratorijske in terenske preiskave za ugotavljanje vgradljivosti materiala**

#### **A1 Laboratorijske preiskave**

- A1.1 Določanje zrnastostne sestave
- A1.2 Določanje Atterbergovih meja
- A1.3 Klasifikacija zemljin
- A1.4 Ugotavljanje vlažnosti
- A1.5 Standardni Proctorjev preizkus
- A1.6 Določanje enosne tlačne trdnosti
- A1.7 Neposredni strižni prekus
- A1.8 Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem
- A1.9 Določitev lahkih delcev
- A1.10 Določanje gorljivih in organskih snovi
- A1.11 Določanje nasipne gostote
- A1.12 Ugotavljanje prepustnosti s konstantnim hidravličnim padcem
- A1.13 Določanje disperzivnosti zemljin – metoda svaljka
- A1.14 NEF – No Erosion Filter test

#### **A2 Terenske preiskave**

- A2.1 Meritev gostote in vlage z izotopskim merilnikom
- A2.2 Plošča z lahko padajočo utežjo
- A2.3 Meritev posedkov s pomočjo posedalne plošče

### **Priloga B Rezultati geomehanskih laboratorijskih preiskav**

### **Priloga C Rezultati terenskih preiskav na poskusnem nasipu**

## **Priloga A Laboratorijske in terenske preiskave za ugotavljanje vgradljivosti materiala**

### **A1 Laboratorijske preiskave**

#### **A1.1 Določanje zrnastostne sestave (SIST/ISO/TS 17892 – 4:2004)**

Zrnastostno sestavo v laboratoriju določamo s pomočjo sejanja na sitih in z areometriranjem. Mokro sejalno preiskavo izvajamo v primeru, ko imamo več kot 10 % finih frakcij, sicer lahko naredimo le suho sejalno analizo. Znano maso zemljine, ki smo jo predhodno namočili postavimo na stavek sit za mokro sejanje, in sicer na zgornje sito z največjimi odprtini. Uporabljen sita izberemo glede na zrnastostno sestavo materiala, ki ga sejemo. Mokro sejanje je končano, ko skozi najmanjše sito z odprtini 0,063 mm teče čista voda. Odsejke posušimo ter jih suho presejemo skozi standardni set sit. Po končanem sejanju tehtamo material in določimo frakcije zemljine, ki so ostale na posameznem situ. V primeru, da izgubimo več kot 1 % mase materiala, moramo sejalno analizo ponoviti. Areometrijo izvajamo na zrnih manjših od 0,063 mm. Znano maso zemljine dispergiramo v vodi, nato jo zlijemo v merilni valj, kjer s pomočjo areometra v točno določenih časovnih intervalih odčitavamo gostoto suspenzije z merilne skale areometra. Vzporedno merimo temperaturo suspenzije.

Kot rezultat analize zrnastosti, dobimo koeficient enakomernosti  $C_u$  in koeficient zrnastosti  $C_c$ .

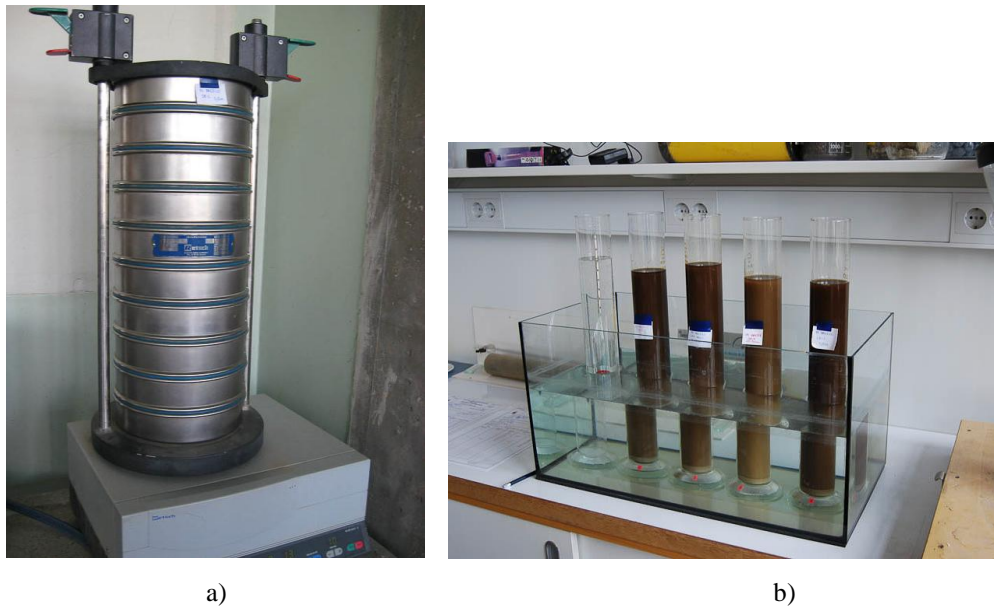
$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (\text{A.1})$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{A.2})$$

$d_{60}$ ... premer zrn, ki ustreza presejku 60 %

$d_{30}$ ... premer zrn, ki ustreza presejku 30 %

$d_{10}$ ... premer zrn, ki ustreza presejku 10 %



Slika A1: Določanje zrnastostne sestave: a) suha sejalna analiza, b) areometrija.

### A1.2 Določanje Atterbergovih meja (SIST/ISO/TS 17892 – 12:2004)

Za vsako drobnozrnato zemljino lahko določimo značilna stanja vlažnosti, med katerimi so v geomehaniki najpogosteje uporabljena meja krčenja, meja plastičnosti ter meja židkosti. Mejo plastičnosti  $w_p$  v laboratoriju določimo na materialu presejanem skozi sito 0,5 mm. Tega zgnemo v plastično kroglo, iz katere nato oblikujemo svaljke, dolge 3 cm in debele 3 mm. Meja plastičnosti je dosežena v točki prvega razpada svaljka. Vlažnost zemljine, ki smo ji določili mejo plastičnosti nato določimo s sušenjem v peči, sam izračun vlažnosti pa je identičen izračunu vlažnosti pri določanju naravne vlažnosti zemljine.

Mejo židkosti  $w_L$  določimo na materialu presejanem skozi sito 0,5 mm, katerega smo predhodno navlažili. Pripravljeno zmes pregnetemo in vgradimo v posodico standardnih dimenzij, kjer jo nato preiskujemo s konusnim penetrometrom. Merimo ugrez normiranega konusa, nato določimo vlago zmesi. Celoten postopek ponovimo še trikrat pri tem pa zmesi vsakič dodamo nekaj vode ter jo dobro pregnetemo. Pazimo, da so točke ugreza enakomerno razporejene, in sicer med 7 mm in 15 mm. Rezultate preiskave vnesemo v diagram ugrez konusa v odvisnosti od vlažnosti, kjer pri ugrezu 10 mm odčitamo pripadajočo vlažnost, ter tako določimo mejo židkosti. Kot rezultat določanja Atterbergovih meja, dobimo mejo plastičnosti, mejo židkosti, indeks plastičnosti ter indeks konsistence. Rezultati preiskave se

uporabljajo za klasifikacijo drobnozrnatih in mešanih zemljin ter za opis konsistenčnega stanja zemljine.

$$I_p = w_L - w_P \quad (\text{A.3})$$

$$I_C = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \quad (\text{A.4})$$

$I_p$ ... indeks plastičnosti

$I_C$ ... indeks konsistence

$w_L$ ... meja židkosti

$w_P$ ... meja plastičnosti

$w$ ... vlažnost

Preglednica A1: Odvisnost konsistenčnega stanja od indeksa konsistence.

Indeks konsistence ( $I_C$ )	Opis konsistenčnega stanja
$I_C < 0$	židko konsistenčno stanje
$0 < I_C < 0,33$	lahko gnetno konsistenčno stanje
$0,33 < I_C < 0,66$	srednje gnetno konsistenčno stanje
$0,66 < I_C < 1$	težko gnetno konsistenčno stanje
$I_C > 1$	poltrdo konsistenčno stanje



a)



b)

Slika A2: Določanje Atterbergovih meja: a) židkost, b) plastičnost. (Vir:Laboratorij KMTal.)

### A1.3 Klasifikacija zemljin (JUS U.B1.001)

Zemljine s podobnimi lastnostmi, po modificirani AC klasifikaciji, razvrščamo v tri skupine. To so debelozrnate zemljine, drobnozrnate zemljine in šote. Debelozrnate zemljine se naprej delijo na gramoze in peske, drobnozrnate zemljine pa se delijo na melje, organske zemljine in gline. Vsaka vrsta zemljine je označena z dvema simboloma – črkama, pri tem prva črka označuje eno od podskupin glavnih vrst zemljine, drugi simbol pa nadaljnjo delitev vsake od podskupin. Pri debelozrnatih zemljinah ima pri klasifikaciji odločilen pomen zrnavost oz. granulometrični sestav zemljine. Če zemljino sestavljajo pretežno (več kot 50 %) zrna večja od 2 mm, takšno zemljino uvrščamo med gramoze, če pa je v zemljini več kot 5 % zrnja velikosti med 0,06 in 2 mm, zemljino klasificiramo kot pesek. Na klasifikacijo vplivata tudi koeficient enakomernosti  $C_u$  in koeficient zrnivosti  $C_c$ . Pri drobnozrnatih zemljinah si pri klasifikaciji pomagamo s krivuljo zrnivosti, mejo židkosti in indeksom plastičnosti. Zemljino, ki jo sestavljajo pretežno zrna večja od 0,002 mm in manjša od 0,063 mm uvrščamo med melje, zemljino, ki jo sestavljajo pretežno zrna manjša od 0,002 mm, pa klasificiramo kot gline. Koherentne zemljine glede na mejo židkosti in indeks plastičnosti razvrstimo med zelo stisljive (H) in malo stisljive (L). Meja med zelo in malo stisljivimi zemljinami je pri meji židkosti  $w_L = 50$  %. S pomočjo indeksa plastičnosti in meje židkosti je definirana tako imenovana A-linija, ki v koordinatnem sistemu  $w_L - I_P$  predstavlja mejo med glinami, ki ležijo nad A-linijo ter melji in organskimi zemljinami, ki ležijo pod A-linijo. Organske zemljine ločimo od meljev po barvi, vonju in po vidnih organskih primeseh.

### A1.4 Ugotavljanje vlažnosti (SIST/ISO/TS 17892 – 1:2004)

Vlažnost zemljine v laboratoriju določamo s sušenjem v peči pri 105 °C. Iz ustrezno hranjenih vzorcev materiala odvzamemo reprezentativni vzorec, ga stehamo v posodi znane mase in damo sušiti v peč. Po 24 urah vzorec vzamemo iz peči, ga ohladimo v eksikatorju in ponovno stehamo. Vlago določimo po naslednji relaciji.

$$w = \frac{m_m - m_s}{m_s} \times 100 \% \quad (\text{A.5})$$

$w$ ... vlažnost

$m_s$ ... masa suhega materiala

$m_m$ ... masa mokrega materiala

### A1.5 Standardni Proctorjev preizkus (DIN 18127)

S pomočjo Proctorjevega preizkusa določimo optimalno vlažnost zemljine za vgradnjo v nasipe, saj je sposobnost zgoščevanja zemljine pri neki energiji odvisna od vlažnosti le-te.

V standardnem jeklenem valju premera 10 cm in višine 11,7 cm zgostimo zemljino pri izbrani vlažnosti v treh slojih. Vsak sloj zgostimo s 25 udarci bata teže 25 N, ki ga spustimo z višine 30,5 cm (standardna energija pri SPP-ju znaša  $610 \text{ kNm/m}^3$ ). Jeklen valj z zemljino stehtamo ter na reprezentativnih delih vzorca določimo vlago materialu. Iz dobljenih podatkov določimo suho prostorninsko težo  $\gamma_D$  po enačbi A.6.

$$\gamma_D = \frac{W_s}{V} = \frac{W}{V(1+w)} = \frac{\gamma}{1+w} \quad (\text{A.6})$$

$\gamma_D$ ... suha prostorninska teža

$\gamma$ ... prostorninska teža vlažne zemljine

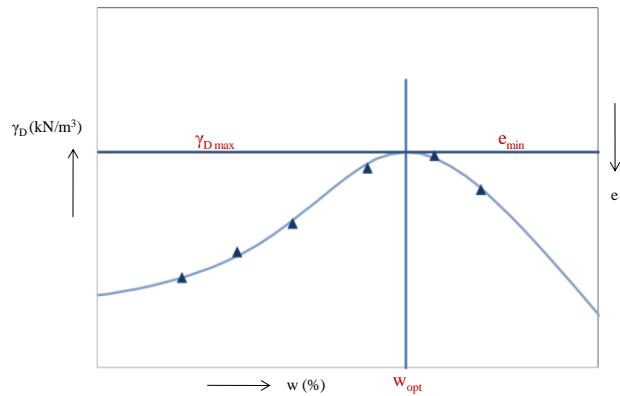
$w$ ...vlažnost

Suha prostorninska teža pri izmerjeni vlažnosti predstavlja točko v diagramu  $\gamma_D = \gamma_D(w)$ . Vzorcju nato spremenimo vlago in opisan postopek ponovimo, to storimo pri najmanj petih različnih vlažnostih. V diagramu  $\gamma_D = \gamma_D(w)$  izmerjene točke povežemo s krivuljo ter odčitamo največjo suho prostorninsko težo in vlago pri kateri je mogoče zemljino najbolj zgostiti. Tako dobimo optimalno vlago.





a)



b)

Slika A3: SPP: a) nabijanje vzorca v laboratoriju, b) določanje maksimalne suhe prostorninske teže.

### A1.6 Določanje enoosne tlačne trdnosti (SIST/ISO/TS 17892 – 7:2004)

Preiskava enoosne tlačne trdnosti prostih valjastih vzorcev je poenostavljena oblika nekonsolidirane-nedrenirane triosne preiskave. Ustrezno pripravljen vzorec, ki je lahko intakten ali pregneten, vgradimo v stiskalnico, kjer ga razmeroma hitro obremenimo v vertikalni smeri, pri čemer je bočna totalna napetost med preiskavo vseskozi enaka nič. Vertikalno silo povečujemo do porušitve vzorca, pri tem merimo silo in vertikalne pomike. S pomočjo preiskave enoosne tlačne trdnosti ugotavljamo nedrenirane strižne trdnosti kohezivnih zemljin. Maksimalna vertikalna napetost je tako enaka enoosni tlačni trdnosti  $q_u$ .

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \text{ [kPa]} \quad (\text{A.7})$$

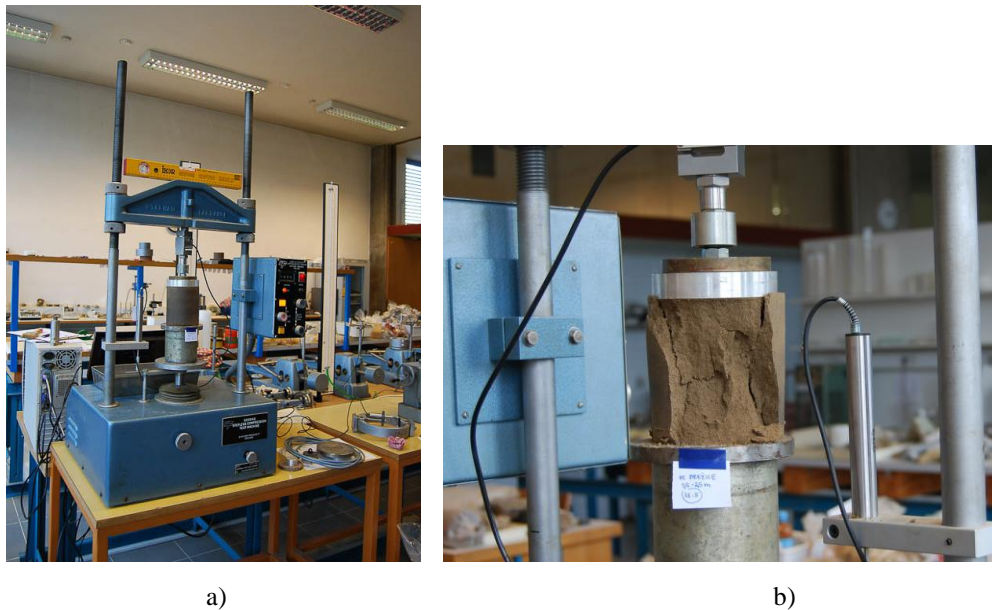
$$\sigma_1 = q_u \quad (\text{A.8})$$

$$c_u = q_u/2 \quad (\text{A.9})$$

$\sigma_1$ ...normalna napetost

$q_u$ ...enoosna tlačna trdnost

$c_u$ ...nedrenirana strižna trdnost



Slika A4: Enoosna tlačna trdnost: a) stiskalnica, b) porušitev vzorca med preiskavo.

### A1.7 Neposredni strižni preskus (SIST/ISO/TS 17892 – 10:2004)

Strižna trdnost zemljine je maksimalna strižna napetost, ki jo zemljina lahko prenese. Do porušitve zemljine pride, ko strižna napetost preseže strižno trdnost. To določamo s pomočjo direktne strižne preiskave, kjer zemljino preiskujemo v strižni celici velikosti 60 x 60 mm in višine 20 mm, ki je horizontalno razdeljena na dva dela. Spodnja polovica je fiksna, zgornja polovica pa je premična v horizontalni smeri. Vzorec, ki ga vgradimo v strižno celico, najprej preko togega bata obremenimo z vertikalno normalno obtežbo  $\sigma$ . Po končani konsolidaciji začnemo vzorec strižno obremenjevati tako, da potiskamo premično polovico celice s konstantno hitrostjo, dokler ne pride do prestriga vzorca. Med strižno preiskavo merimo strižno silo, horizontalni zdrsek in vertikalni premik vzorca. Če delimo vertikalno silo in strižno silo s prerezom vzorca, dobimo normalno in strižno napetost na vsiljeni horizontalni porušni ploskvi.

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad (\text{A.10})$$

$$\tau = \frac{F_S}{A} \quad (\text{A.11})$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (\text{A.12})$$

$\tau$ ... strižna napetost

$\sigma$ ... normalna napetost

$F_N$ ... normalna sila

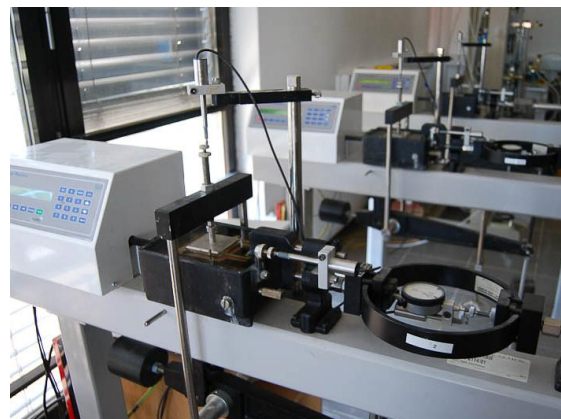
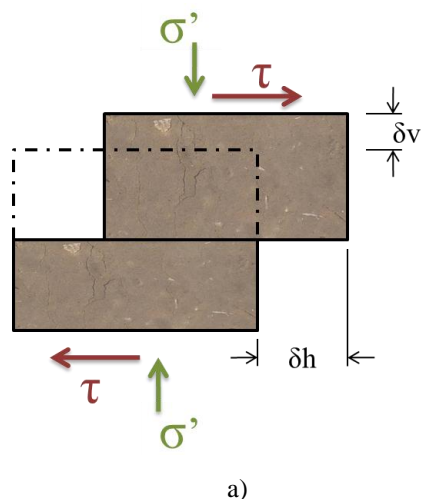
$F_S$ ... strižna sila

$A$ ... površina vzorca

$\tau_f$ ... strižna trdnost

$c'$ ... kohezija

$\varphi'$ ... strižni kot



Slika A5: Neposredni strižni preskus: a) princip delovanja naprave, b) izvajanje preskave.

### A1.8 Edometrski preskus s postopnim obremenjevanjem (SIST/ISO/TS 17892 – 5:2004)

S pomočjo edometrskе preiskave v laboratoriju preiskujemo obnašanje zemljine pri enodimenzijem obremenjevanju ali razbremenjevanju. Vzorec zemljine cilindrične oblike premera 70 ali 75 mm ter višine 19,1 mm se vstavi v tog kovinski obroč in vgradi v edometrski aparat med dve porozni ploščici. Po vgradnji vzorec v rednih časovnih intervalih postopno vertikalno obremenjujemo. Z vsakim inkrementom obtežbe se le-ta poveča z dvakratnim faktorjem do končne vrednosti, ki jo določajo predvidene napetosti v temeljnih tleh pred in po obremenitvi. Vzorec tako obremenimo s sledečimi bremenskimi stopnjami: 4.5, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 1200 ... ter ga nato v enakih stopnjah razbremenimo. Med vsako bremensko stopnjo merimo vertikalne premike (skrčke pri obremenitvi in dvižke pri

razbremenitvi) oziroma spremembo višine vzorca v odvisnosti od časa. Iz končne spremembe višine vzorca v vsaki bremenski stopnji lahko določimo stisljivost vzorca v odvisnosti od obtežbe in modul stisljivosti. Edometriški modul je enak kvocientu med spremembo vertikalne efektivne napetosti  $\Delta\sigma'$  in vertikalne deformacije  $\varepsilon_1$ .

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\rho} h_\alpha [kPa] \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta\sigma' = \sigma'_\beta - \sigma'_\alpha \quad (\text{A.14})$$

$$\Delta\rho = \rho_\beta - \rho_\alpha \quad (\text{A.15})$$

$h_\alpha$  ... višina edometriškega vzorca pri napetosti  $\sigma'_\alpha$

$\Delta\rho$  ... razlika med končnim in začetnim posedkom



Slika A6: Edometriški aparat.

### A1.9 Določitev lahkih delcev (JUS B.B8.034)

Lahke delce lahko v laboratoriju določamo tako, da material (zrnavost nad 0,25 mm) znane teže stremo v merilni valj in prelijemo z raztopino cinkovega klorida  $ZnCl_2$ . Pripravljeno zmes premešamo in pustimo, da se lahki delci dvignejo na površje. Plavajoče lahke delce skupaj z raztopino previdno odlijemo ter postopek ponavljamo, dokler ne odstranimo vseh

lahkih delcev. Te posušimo in stehtamo ter določimo odstotek lahkih delcev na skupno suho maso materiala.

#### **A1.10 Določanje gorljivih in organskih snovi (JUS U.B1.024)**

Vsebnost gorljivih in organskih snovi lahko določimo tudi z žaroizgubo pri kateri v posebnih žarilnih lončkih žarimo material frakcije 0,063–1,0 mm pri 450 °C. Z žarjenjem na 450 °C sežgemo le organske delce – premog, ne povzročimo pa razpada apnenca. Lončke ohladimo v eksikatorju, jih stehtamo in določimo odstotek lahkih delcev.

#### **A1.11 Določanje nasipne gostote (ASTM D 4254 – 00)**

Nasipno gostoto oziroma minimalno gostoto zemljine določamo na posušenih vzorcih. V valj nasujemo preizkušane znane mase in valj začepimo, nato ga v vertikalni smeri obrnemo za 180 ° (tako, da čep gleda navzdol). Takoj zatem valj postavimo v prvotno vertikalno lego in odčitamo volumen zemljine. Postopek ponavljamo toliko časa, dokler niso odčitki volumna zemljine v razponu 1 %.



Slika A7: Določanje nasipne gostote.

### **A1.12 Ugotavljanje prepustnosti s konstantnim hidravličnim padcem (SIST/ISO/TS 17892 – 11:2004)**

Prepustnost s konstantnim hidravličnim padcem merimo v triosni celici. Vzorec za preiskavo pripravimo tako, da ga obrežemo s pomočjo obrezovalnika na premer 70 mm ter višino približno 100 mm. V primeru, da vzorec ni intakten, temveč pregneten, ga moramo predhodno zgostiti (npr. s Proctorjevim aparatom). Pripravljen vzorec stehamo in premerimo nato pa ga vgradimo v celico, ki mora biti očiščena. Na spodnji bat namestimo drenažno ploščico, nanjo položimo filter papir in nanj vzorec na katerega položimo filter papir in drenažno ploščico. Čez vzorec napnemo membrano in ga vstavimo v celico, ki jo nato zalijemo z vodo. Sledi saturacija vzorca s pomočjo vakuma pri kontroliranih pogojih, tej pa konsolidacija vzorca pri določenem tlaku. Po končani konsolidaciji z razliko tlakov (20 kPa) med zgornjo in spodnjo ploskvijo preizkušanca povzročimo precejanje vode skozi preizkušane pri konstantnem hidravličnem gradientu. Pri treh tri zaporednih enakih odčitkih prepustnosti lahko s preiskavo zaključimo. Vzorec razgradimo, ga stehamo in izmerimo njegovo višino in premer.



a)



b)

Slika A8: Prepustnost v triosni celici: a) naprava za izvajanje meritev, b) vgrajeni vzorci med preiskavo.

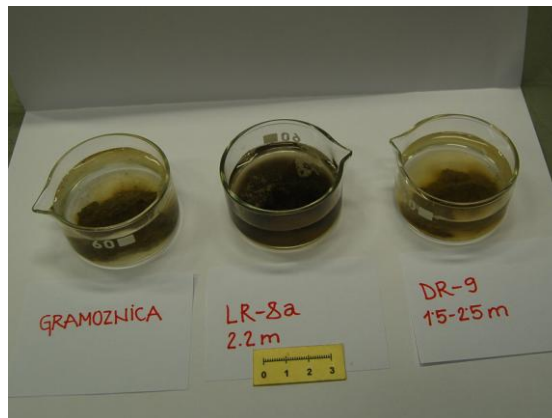
### **A1.13 Določanje disperzivnosti zemljin – metoda svaljka (BS 1377: Part 5: 1990 točka 6.3)**

V 100 mL čašo nalijemo destilirano vodo. Iz vzorca zemljine navlaženega na optimalno vlago, ki jo določimo s pomočjo Proctorjevega preizkusa oblikujemo svaljke debeline 6–10

mm in dolžine približno 30–40 mm. Pripravljen svaljek potopimo v vodo in opazujemo dogajanje po 5 in 10 minutah. Zemljino razvrstimo v razred glede na opazovanja.

Preglednica A2: Delitev zemljin na razrede disperzivnosti po metodi svaljka.

Razred		Obnašanje
1	nedisperzivne	ni reakcije; svaljek lahko razpade, ni oblačka kalne vode okoli svaljka
2	nedisperzivne	rahla reakcija; slabo viden oblaček okoli svaljka
3	disperzivne	srednja reakcija; dobro viden oblaček okoli svaljka, ki se v jezikih razširja po dnu posode
4	disperzivne	močna reakcija; oblaček kalne vode prekriva celotno dno posode

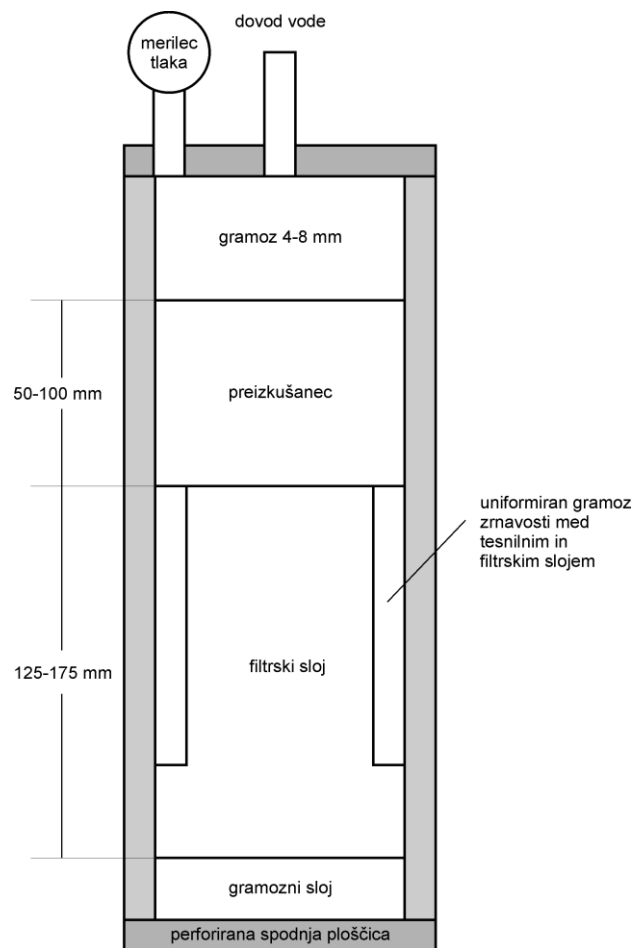


Slika A9: Določanje disperzivnosti zemljin različnim vzorcem. (Vir: Laboratorij KMTal.)

#### A1.14 NEF – No Erosion Filter test (Sherard et al. 1984)

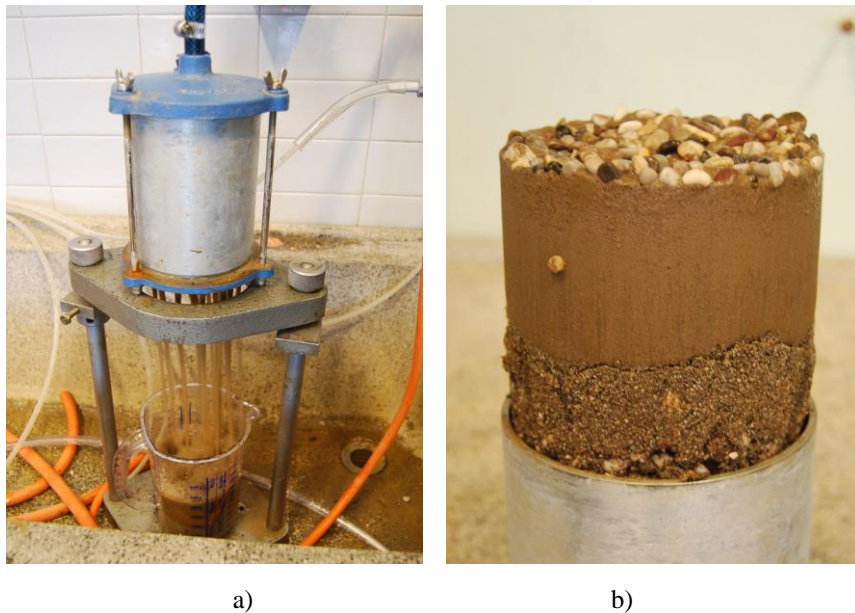
NEF je namenjen preiskavi zemljin, ki naj bi se vgrajevale v tesnilne sloje nasipov in nasutih zemeljskih pregrad. Postopek same preiskave je sledeč: v cilinder premera 100 mm s perforirano spodnjo ploskvijo vgradimo uniformiran gramoz ali pesek dovolj drobne frakcije, da prepreči spiranje filtra (okoli 2 cm). Na plast peska ali gramoza nasujemo filtrski sloj debeline 125–175 mm. Zgornji dve tretjini filtrskega sloja ob robu nadomestimo z uniformiranim peskom bolj drobne frakcije od filtrskega sloja, s čimer preprečimo tok vode ob stenah cilindra. Na filtrski sloj vgradimo preizkušavec debeline 50–100 mm in ga preluknjamo s palčko debeline 1–10 mm (odvisno od zrnivosti). Na preizkušavec nasujemo gramoz frakcije 4–8 mm, ki preprečuje erozijo preizkušanca zaradi dotoka vode. Cilinder na

zgornji strani zatesnimo s pokrovom na katerega priključimo dovod vode. Prostor nad preizkušancem saturiramo. Preizkušanec preko pokrova izpostavimo pritisku vode iz pipe (približno 4 bari) pri tem opazujemo čistost vode in morebitno odnašanje preizkušanca zvezno s časom. Po preiskavi preizkušanec razgradimo in preverimo morebitno zablatenost filtra ter velikost luknjice v preizkušancu. V primeru, da filter deluje dobro, je izpiranje preizkušanca zanemarljivo. V tem primeru sta debelina in izgled preizkušanca nespremenjeni. Filter ne izpolnjuje svoje naloge, kadar je izpiranje preizkušanca znatno v prvih 60 sekundah in se nadaljuje praktično z nespremenjeno jakostjo.



Slika A10: Shema naprave za merjenje filtrske sposobnosti zemljin. (Vir: Laboratorij KMTal.)





Slika A11: NEF (Vir: Laboratorij KMTal.): a) preiskava vzorca, b) vzorec po preiskavi.

## A2 Terenske preiskave

### A2.1 Meritev gostote in vlage z izotopskim merilnikom

Na terenu merimo doseženo gostoto sloja tal  $\rho$  in vlago  $w$  nasipnega materiala z izotopsko sondo. Iz dobljenih vrednosti lahko določimo suho prostorninsko težo materiala.

$$\gamma_D = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (\text{A.16})$$

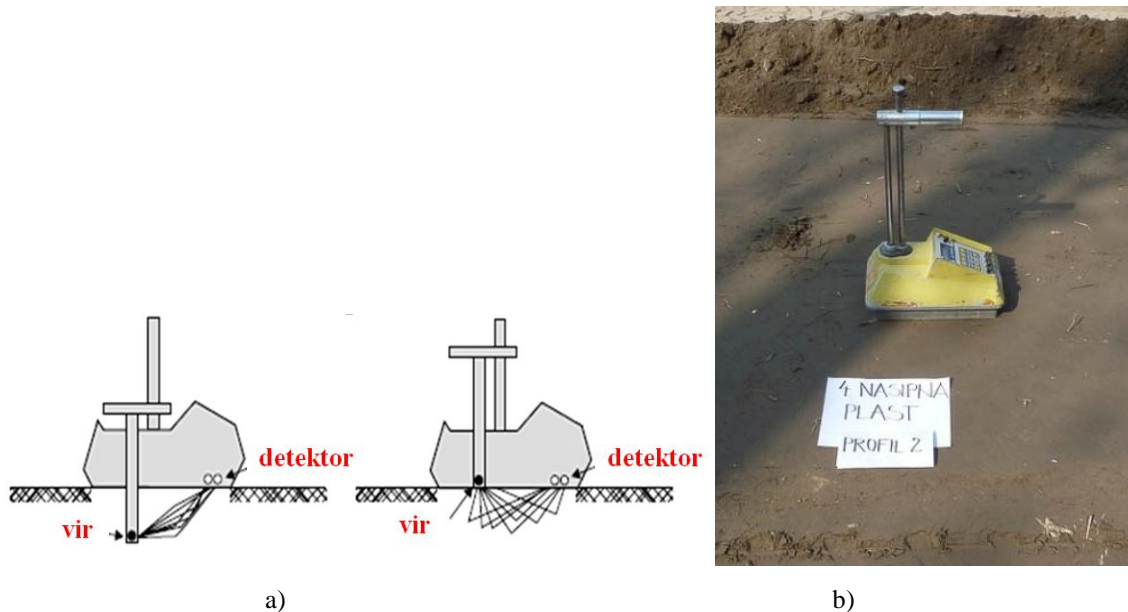
$\gamma_D$ ... suha prostorninska teža

$\gamma$ ... prostorninska teža

$w$ ... vlaga

Izotopska sonda je sestavljena iz vira hitrih nevtronov, detektorjev, naprave za odčitavanje in vira električne energije. Vir nevtronov se postavi na površino zgoščenega nasipnega sloja ali se preko posebne sonde vtisne v tla. Iz stopnje oslavitve sevanja, ki ga oddaja vir, je možno posredno, na osnovi predhodnih umeritev, določiti vlažnost zemljine. Pri meritvi vlage je izkoriščena upočasnitev sevanja nevtronov iz vira zaradi kolizije z vodikovimi jedri. Intenzivnost sevanja, ki doseže detektor, je v direktni zvezi s stanjem prispelih modificiranih

nevtronov in predstavlja merilo za količino vlage v zemljini ob predpostavki, da je voda edini vir vodika. Sevanje se povečuje s povečanjem količine vode v zemljini. Gostota materiala se določa na podlagi intenzitete prehoda gama žarkov skozi tla. Emisija žarčenja, ki jo prejme detektor, je obratno sorazmerna gostoti tal. Merilna naprava mora biti predhodno ustrezno umerjena. Meritve so lahko nezanesljive v primeru prisotnosti organskih tal ter v primeru, da so v tleh večji kamni.



Slika A12: Izotopski merilnik: a) princip delovanja naprave, b) opravljanje meritev na četrti nasipni plasti poskusnega nasipa.

## A2.2 Plošča z lahko padajočo utežjo

S pomočjo plošče z lahko padajočo utežjo merimo dinamični deformacijski modul  $E_{vd}$ . Napravo sestavljajo krožna jeklena plošča premera 200 mm, navpično vodilo za prosto padajočo utež mase 10 kg, katere sunek pri udarcu na spodnjo vzmet mora trajati 18 ms in katerega sila znaša največ 7,07 kN. Na vrhu vodila je zaklep, ki zadrži utež pred meritvijo na natančno določeni višini. V napravo je vgrajen elektronski merilnik pospeška plošče, ki se aktivira ob sunku, ki ga ob padcu povzroči utež. Izmerjeni potek pospeška se dvakrat integrira, s čimer dobimo posedek plošče, nato pa iz znanega sunka sile še dinamični deformacijski modul. Po treh ponovitvah meritve se kot rezultat izpiše povprečje vseh treh meritev.



Slika A13: Meritve dinamičnega deformacijskega modula četrte nasipne plasti.

### A2.3 Meritev posedkov s pomočjo posedalne plošče

Posedalna plošča je izdelana iz debelejšje jeklene pločevine na katero je na sredini privarjena jeklena cev. Plošča se vgradi na površje temeljnih tal pod dnom nasipa ali v sam nasip tako, da je privarjena cev v vertikalnem položaju. V primeru, da posedalno ploščo vgradimo na površje temeljnih tal, moramo s povečevanjem višine nasipa ustrezno podaljšati tudi cev posedalne plošče. S pomočjo posedalne plošče lahko na enostaven način spremljamo razvoj posedkov površja temeljnih tal pod nasipi, tako v času gradnje kot tudi po izgradnji ali le posedke samega nasipa. Posedanje spremljamo z rednim geodetskim snemanjem položaja vrha cevi posedalne plošče.



a)



b)

Slika A14: Posedalna plošča: a) vgrajevanje posedalne plošče, b) vgrajena plošča.

## **Priloga B      Rezultati geomehanskih laboratorijskih preiskav**

Preiskave smo opravili: M. Merc, M. Maček, J. Smolar in M. Gramec.

Preglednica B1: Indeksni kazalniki karakterističnih materialov.

Vzorec	Razkop	Globina m	Opis vzorca	USCS klasifikacija	Naravna vlaga	Atterbergovi konsistenčni meji		Indeks plastičnosti I <sub>p</sub>	Indeks konsistence I <sub>c</sub>	Gostota		Suha gostota ρ <sub>d</sub>	Količnik por e <sub>naravn</sub>	Nasipna gostota ρ <sub>min</sub>	Maksimalni količnik por e <sub>max</sub>	Gostota zrn Ps	Delež lahkih snovi - organske snovi		
						w <sub>p</sub>	w <sub>L</sub>			ρ	ρ <sub>d</sub>						Žarjenje (400°C)	ZnCl (1.6 g/cm <sup>3</sup> )	
LR-1		0,9	meljast pesek	SM	8,67					1,36	1,25	1,11							
		1,8	meljast pesek	SM	20,9					1,38	1,15	1,31	1,44					5,1	6,7
LR-2		0,9	meljast pesek	SM	18,1					1,61	1,36	0,941							
LR-4	A		meljast pesek (rjav)	SM	10,2													0,7	0,0
B		2,3-2,4	slabo granuliran pesek (siv)	SP	3,73													0,4	0,0
C			pusta glina, poltma- težkogneta, rjava	CL	31,9														
LR-8a		0,9	meljast pesek	SM	10,0					1,40	1,27	1,08							
		2,2	meljast pesek	SM	21,5	ni pl.	39			1,23	1,01	1,61	1,61	1,01	2,64				12,2
GRAMOZNIKA (levi breg)		0,5	pusta glina,	CL	4,77					1,32	1,26	1,10							
		0,7	poltrdna/trdna, s 44%		3,63						1,27	1,22	1,16						
		0,9	peska		9,41						1,28	1,17	1,26						
DR-1a			slabo granuliran pesek z meljem	SP-SM	5,06	21	30	9	2,77					1,11	1,38	2,64	2,7	3,8	
DR-2		0,8	meljast pesek	SM	15,7					1,57	1,36	0,941		1,11	1,38			8,2	14,9
		2,4	glinast pesek	SC	23,7					1,41	1,21	1,19						4,8	6,2
DR-3		1,9	meljast pesek	SM	16,4	23	33	10	1,66		1,49	1,21	1,19		1,04	1,54	2,56	5,6	9,3
		2,7	slabo granuliran gramoz	GP	15,6					1,33	1,15	1,30						5,5	7,5
DR-4		0,8-1,0	slabo granuliran gramoz s peskom	GP	2,70														
DR-7		1,1	slabo granuliran pesek	SP	5,43					1,39	1,32	1,00						0,9	0,2
		1,5-2,5	meljast pesek	SM	14,7					1,28	1,11	1,38	1,38	1,16	2,64			1,28	10,7
DR-9		2,5-3,0	glinast pesek	SC	16,3	19	26	7	1,38					1,17	1,26	2,78		2,9	0,8
			meljast, glinast pesek	SC-SM	17,1	18	24	6	1,14					1,28	1,06			1,2	1,1

\* Ležeče – vizualna ocena celotne zrnavosti ali pa samo narave finih frakcij.

Preglednica B2: Parametri zrnavosti.

Vzorec		Opis vzorca	USCS klasifikacija	Zrnavost						
Razkop	Globina m			<63µm %	D <sub>10</sub> mm	D <sub>30</sub> mm	D <sub>60</sub> mm	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	
LR-1	1,8	<i>meljast pesek</i>	SM	0,005	0,049	0,10	19,3	5,00		
LR-4	2,3-2,4	<i>meljast pesek (rijav)</i>	SM	0,025	0,134	0,19	7,54	3,78		
B		<i>slabo granuliran pesek (siv)</i>	SP	0,254	0,328	0,44	1,72	0,97		
C		<i>pusta glina, poltrna-težkogneta, rijava</i>	CL	/	/	/	/	/		
LR-8a	2,2	<i>meljast pesek</i>	SM	0,026	0,106	0,20	7,65	2,19		
GRAMOZINICA (levi breg)		<i>pusta gina, poltrdna/trdna, s 44% peska</i>	CL	0,0008	0,016	0,07	91,7	4,45		
DR-1a		<i>slabo granuliran pesek z meljem</i>	SP-SM	0,056	0,133	0,21	3,79	1,49		
DR-2	0,8	<i>meljast pesek</i>	SM	0,003	0,043	0,14	56,1	5,21		
	2,4	<i>glinast pesek</i>	SC	0,0009	0,024	0,10	104	6,18		
DR-3	1,9	<i>meljast pesek</i>	SM	0,004	0,030	0,13	33,9	1,81		
	2,7	<i>slabo granuliran gramoz</i>	GP	0,599	7,98	23,0	38,5	4,62		
DR-4	0,8-1,0	<i>slabo granuliran gramoz s peskom</i>	GP	0,295	1,25	8,97	30,4	0,592		
DR-7	1,1	<i>slabo granuliran pesek</i>	SP	0,108	0,163	0,22	2,03	1,12		
		<i>meljast pesek</i>	SM	0,022	0,114	0,20	9,08	2,86		
DR-9	1,5-2,5	<i>glinast pesek</i>	SC	0,004	0,046	0,12	28,9	4,20		
	2,5-3,0	<i>meljast, glinast pesek</i>	SC-SM	0,007	0,066	0,18	26,2	3,62		

Preglednica B3: Parametri strižne trdnosti.

Vzorec		Opis vzorca	USCS klasifikacija	Vlaga pri preiskavi w %	Gostota $\rho$ t/m <sup>3</sup>	Suba gostota $\rho_{st}$ t/m <sup>3</sup>	Zgoščenost D <sub>nr</sub> %	Neposredni strižni preskus			
Razkop	Globina m							c kPa	$\varphi$ °	$\varphi$ °	$\varphi$ (c=0 kPa) °
LR-4 B	2.3-2.4	slabo granuliran pesek	SP	/	1,54	1,40		5,0	34,0		36,0
GRAMOZNICA (levi breg)		pusta glina, poltrdna/trdna, s 44% peska	CL	4,87	1,47	1,37	83	8,6	31,5		34,5
DR-9	2.5-3.0	meljast, glinast pesek	SC-SM	21,0	1,90	1,57	95	2,3	33,5		34,0
				/	2,02	1,52	86	19	35,0		41,0
				15,1		1,76	99	0,0	37,5		37,5
								1,7	45,0		45,5

\* Ležeče – ocena pred strigom, vgrajen v nasutem stanju.

Preglednica B4: Rezultati preiskav deformabilnosti.

Vzorec		Opis vzorca	USCS klasifikacija	Dodaten opis	EDOMETRSKI PRESKUS S POSTOPNIM OBREMENJEVANJEM																							
					Začetna vlaga	Začetna saturacija	Končna vlaga	Začetni koeficient	Costota zemljine	Suha gostota	Zgoščenost	$\sigma_v$	$\varepsilon$	Zalitje (obremenitev in deformacija ob zalitju)	Modul stisljivosti $E_{o,ed}$													
Razkop	Globina				$w_z$	Sr	$w_k$	$e_0$	$\rho$	$P_u$	$D_{pr}$	kPa	%															
	m				%	%	%		t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	%		%															
GRAMOZNICA (levi breg)		pus ta glna, poltrdna/ trdna, s 44% peska	CL	suhi	9,06	35	22,0	0,674	1,72	1,58	96	25	0,01	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					8,99	36	21,7	0,677	1,72	1,57	95	50	0,02	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					8,98	35	22,2	0,681	1,71	1,57	95	100	0,12	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					21,8	85	18,3	0,674	1,92	1,58	96	100	0,02	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					22,0	85	19,0	0,681	1,92	1,57	95	50	0,01	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					9,97	22	22,6	1,22	1,31	1,19	72	25	7,51	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					5,82	23	19,0	0,705	1,73	1,63	92	50	0,04	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					5,54	23	18,9	0,661	1,77	1,67	95	100	0,00	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					5,48	21	18,8	0,712	1,71	1,62	92	12	0,12	4,5-12	12-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800								
					18,7	70	19,1	0,746	1,89	1,59	90	50	0,01	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
					19,3	83	16,9	0,648	2,01	1,69	95	12	0,00	4,5-12	12-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800								
					5,72	13	19,9	1,27	1,29	1,22	69	25	10,6	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600								
21,1	87	19,6	0,676	2,01	1,66	94	4,5	0,00	4,5-25	25-50	50-100	100-200	200-400	400-800	800-1600													
				hid. zbit																								

suhi - vgrajen na suhi strani Proctorjeve linije, zbit na 95 %  $D_{pr}$

naravni - zgoščen na naravno gostoto

mokri - vgrajen na mokri strani Proctorjeve linije, zbit na 95 %  $D_{pr}$

hidravlično zbit - zbit s tresenjem v saturiranem stanju



Preglednica B5: Rezultati preiskav vodoprepustnosti v edometru in triaksialni celici.

Vzorec		EDOMETRSKI PRESKUS S POSTOPNIM OBREMENJEVANJEM																
		Opis vzorca		USCS klasifikacija	Dodaten opis		Začetna vlaga	Končna vlaga	Začetni količnik por	Gostota zemljine	Suha gostota zemljine	Zgoščenost	Vodoprepustnost s spremenljivim hidravličnim padcem (edometer)			Prepustnost v celici		
Razkop	Globina m					$w_z$ %	$w_k$ %	$e_0$	$\rho$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	$D_{pr}$ %	$\sigma_v$ (kPa)	$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$k$ m/s	$\Delta p$ kPa	$k$		
LR-8a	2,2	meljast pesek		SM	zbit po SPP	26,5	28,9	0,742	1,78	1,41	105				20	3,4E-08		
GRAMOZNICA (levi breg)		pusta glina, poltrdna/trdna, s 44% peska		CL	zbit po SPP	18,0	20,0	0,562	1,99	1,69	102				20	6,7E-09		
DR-9	1,5-2,5	glinast pesek		SC	zbit po SPP	19,3	16,9	0,645	2,01	1,69	95	100	800					
						5,48	18,8	0,716	1,71	1,62	92	100	800					
						14,1	17,3	0,494	2,12	1,86	105	1,74	1,82	1,1E-08	5,1E-09	1,67	1,76	1,9E-07

Preglednica B6: Rezultati preiskav vgradljivosti po Proctorju in pripadajočih trdnosti.

Vzorec		Opis vzorca	USCS klasifikacija	Vlaga pri preiskavi	Gostota	Suha gostota	Zgoščenosť	SPP		Enoosna tlačna trdnost									
Razkop	Globina m							w %	$\rho$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_d$ t/m <sup>3</sup>	D <sub>pr</sub> %	w <sub>opt</sub> %	$\rho_{dmax}$ t/m <sup>3</sup>	$\epsilon$ %	q <sub>u</sub> kPa				
LR-8a	2,2	meljast pesek	SM					27,5	1,34			vz2	25,9	1,67	1,32	99	3,1	74,6	
												vz3	22,7	1,61	1,32	98	2,7	72,4	
												vz4	21,4	1,57	1,29	97	2,7	70,7	
												vz5	26,6	1,70	1,34	100	2,9	73,5	
												vz6	31,3	1,72	1,31	98	5,5	47,3	
																			17,4
GRAMOZNIČA (levi breg)		pusta glina, poltrdna/trdna, s 44% peska	CL										vz1	8,37	1,69	1,56	95	2,3	129
													vz2	10,6	1,75	1,58	96	2,9	148
													vz3	12,8	1,80	1,60	97	2,9	149
													vz4	15,8	1,90	1,64	99	2,9	148
													vz5	18,5	1,95	1,65	100	3,9	142
													vz6	20,3	1,95	1,62	98	5,9	101
DR-2	2,4	glinast pesek	SC										vz1	8,75	1,60	1,47	93	2,3	108
													vz2	10,8	1,66	1,50	95	2,3	166
													vz3	12,9	1,72	1,52	96	2,5	154
													vz4	17,1	1,84	1,57	100	3,1	146
													vz5	21,0	1,91	1,58	100	4,3	107
DR-9	1,5-2,5	glinast pesek	SC										vz5	10,3	1,91	1,73	98	2,1	129
													vz1	13,6	1,99	1,75	99	2,8	115
													vz2	14,3	2,02	1,77	100	2,7	116
													vz3	17,3	2,02	1,72	97	5,5	75,9
													vz4	19,9	2,00	1,66	94	9,7	33,0
DR-9	2,5-3,0	meljast, glinast pesek	SC-SM										vz1	8,07	1,85	1,72	97	2,1	59,3
													vz2	10,0	1,91	1,74	98	2,2	63,0
													vz3	12,0	1,96	1,75	99	2,0	53,1
													vz4	14,7	2,02	1,76	99	3,0	53,4
													vz5	17,2	1,98	1,69	95	4,7	34,4

Preglednica B7: Indeksni kazalniki lastnosti materialov, parametri zrnavosti, rezultati preiskav vgradljivosti po Proctorju in rezultati preiskav vodoprepustnosti v edometru in triaksialni celici.

Vzorec	Profil	Opis vzorca	USCS klasifikacija	Naravna vlaga		Začetna vlaga		Gostota		Suha gostota		Zgoščenost		Zrnavost						SPP		Začetni količnik por		Količnik por ob preiskavi		Prepusnost v triaksialni celici															
				w	%	w <sub>z</sub>	%	ρ	t/m <sup>3</sup>	ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>	D <sub>pr</sub>	%	<63μm	%	D <sub>10</sub>	mm	D <sub>30</sub>	mm	D <sub>60</sub>	mm	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	w <sub>opt</sub>	%	ρ <sub>dmax</sub>	t/m <sup>3</sup>	e <sub>0</sub>	e	Δp	kPa	k	m/s								
Temeljna tla	P1	meljast pesek	SM	25,0		1,59		1,27		85																															
	P2			26,4		1,65		1,30		87																															
	P3			21,7		1,67		1,37		92																															
				10,6																																					
1. plast	P1	meljast pesek	SM	20,9		1,70		1,41		90																															
	P2			22,3		1,72		1,41		90																															
	P3			20,5		1,71		1,42		90																															
2. plast	P1	meljast pesek	SM	18,7		1,82		1,54		98																															
	P2			21,8		1,77		1,45		92																															
	P3			22,8		1,79		1,46		93																															
3. plast	P1	meljast pesek	SM	24,5		1,85		1,49		95																															
	P2			23,1		1,82		1,48		94																															
	P3			23,8		1,83		1,48		94																															
4. plast	P1	pusta glina, siva, s 45%	CL	23,3		1,83		1,49		97																															
	P2			21,5		1,85		1,52		99																															
	P3			21,7		1,86		1,53		99																															
	P3			22,1		1,75		1,43		93																															
5. plast	P1	meljast pesek	SM	23,0		1,75		1,43		93																															
	P2			17,6		1,76		1,49		93																															
	P2			15,2		1,71		1,49		93																															
	P3			15,6		1,80		1,54		96																															
				17,0		1,77		1,53		96																															

\* Za 1., 2. in 3. nasipno plast smo privzeli  $\rho_{dmax} = 1.57 \text{ t/m}^3$  (povprečje izmerjene vrednosti 4. in 5. nasipne plasti).

## **Priloga C      Rezultati terenskih preiskav na poskusnem nasipu**

Preiskave smo opravili: T. Križnik, M. Maček, J. Smolar in M. Gramec.

Preglednica C1: Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti temeljnih tal in prve nasipne plasti.

Plast	Datum	Št. prehodov		profil	globina cm	IZOTOPSKA SONDA				DIN. P. E <sub>vd</sub> MPa	VALJ - LABORATORIJ			
		+št. stat. preh. po vib. preh.	w			ρ	ρ <sub>d</sub>	D <sub>pr</sub>	w		ρ	ρ <sub>d</sub>	D <sub>pr</sub>	
														%
TEMELJNA TLA	28.9.2009	0x statično (pred tem nekaj statičnih prehodov)	P-2	0	11,0	1,36	1,22	82	4,6					
			P-2	0	8,00	1,37	1,27	85						
			P-2	25	8,60	1,24	1,14	77						
			P-2	25	12,2	1,16	1,04	70						
				0	<b>9,50</b>	<b>1,37</b>	<b>1,25</b>	<b>84</b>						
		1x statično	P-2	0	9,90	1,37	1,25	84						
			2x statično	P-1	0	21,8	1,44	1,18	79					
				P-2	0	23,0	1,70	1,38	93					
				P-3	0	23,0	1,65	1,34	90					
		4x statično	P-1	15	17,9	1,37	1,16	78						
					<b>21,4</b>	<b>1,54</b>	<b>1,27</b>	<b>85</b>						
			P-1	0	33,6	1,62	1,22	82						
			P-2	0	31,2	1,74	1,32	89						
		6x statično	P-3	0	20,2	1,69	1,40	94						
					<b>28,3</b>	<b>1,68</b>	<b>1,31</b>	<b>88</b>						
			P-1	0	37,5	1,66	1,21	81		25,0	1,59	1,27	85	
			P-1	0						24,9	1,59	1,27	85	
			P-2	0	23,8	1,70	1,37	92		22,9	1,62	1,32	88	
			P-2	0	27,9	1,73	1,35	91		30,0	1,68	1,29	87	
			P-3	0	11,8	1,53	1,37	92		18,3	1,58	1,33	90	
								7,4	25,2	1,76	1,41	94		
									<b>24,4</b>	<b>1,63</b>	<b>1,31</b>	<b>88</b>		
		I. NASIPNA PLAST	28.9.2009	2x statično	P-1	0	19,4	1,20	1,00	64				
					P-1	0	22,4	1,56	1,28	81				
P-2	0				20,7	1,55	1,28	82						
P-2	0				24,6	1,62	1,30	83						
P-3	0				18,9	1,54	1,30	82						
P-3	0				24,3	1,60	1,28	82						
				<b>21,7</b>	<b>1,51</b>	<b>1,24</b>	<b>79</b>							
1x vibro + 1x statično	P-1			0	22,1	1,65	1,35	86						
	P-1			0	23,9	1,68	1,35	86	6,1					
	P-2			0	26,2	1,70	1,35	86						
	P-2			0	30,1	1,73	1,33	85	5,4					
	P-3			0	22,1	1,62	1,33	85						
	P-3		0	21,6	1,77	1,46	93	5,6						
			<b>24,3</b>	<b>1,69</b>	<b>1,36</b>	<b>87</b>								
3x vibro + 1x statično	P-1		0	22,4	1,85	1,51	96		20,9	1,70	1,41	90		
	P-2		0	22,4	1,78	1,46	93		22,3	1,72	1,41	90		
	P-3		0	21,0	1,77	1,46	93		20,5	1,71	1,42	90		
			<b>21,9</b>	<b>1,80</b>	<b>1,48</b>	<b>94</b>		<b>21,2</b>	<b>1,71</b>	<b>1,41</b>	<b>90</b>			
29.9.2009	še +1x statično drugi dan		P-1	0	24,9	1,83	1,47	93						
			P-1	0	26,1	1,82	1,44	92						
			P-2	0	21,3	1,74	1,44	92						
			P-2	0	26,5	1,86	1,47	94						
			P-3	0	22,0	1,73	1,42	90						
			P-3	0	24,5	1,81	1,45	93						
		P-2	25	22,0	1,58	1,30	83							
		P-2	15	20,6	1,62	1,35	86							
		<b>24,2</b>	<b>1,80</b>	<b>1,45</b>	<b>92</b>									

Preglednica C2: Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti druge nasipne plasti.

Plast	Datum	Št. prehodov		profil	globina	IZOTOPSKA SONDA				DIN. P.	VALJ - LABORATORIJ				
		+št. stat. preh. po vib. preh.	cm			w	$\rho$	$\rho_d$	$D_{pr}$	$E_{vd}$	w	$\rho$	$\rho_d$	$D_{pr}$	
						%	$t/m^3$	$t/m^3$	%	MPa	%	$t/m^3$	$t/m^3$	%	
2.NASIPNA PLAST	29.9.2009	1x vibro + 1x statično	P-1	0	20,1	1,60	1,33	85							
			P-1	0	19,8	1,65	1,38	88							
			P-2	0	23,0	1,71	1,39	88							
			P-2	0	26,5	1,71	1,35	86							
			P-3	0	30,0	1,77	1,36	86							
			P-3	0	24,0	1,70	1,37	87							
					<b>23,9</b>	<b>1,69</b>	<b>1,36</b>	<b>87</b>							
		2x vibro + 1x statično	P-1	0	24,2	1,65	1,33	84							
			P-1	0	21,8	1,69	1,38	88	7,6						
			P-2	0	25,8	1,85	1,47	94							
			P-2	0	26,5	1,76	1,39	89	6,0						
			P-3	0	27,5	1,81	1,42	90							
			P-3	0	26,1	1,76	1,39	89	4,7						
			P-2	15	23,1	1,85	1,50	96							
				<b>25,3</b>	<b>1,75</b>	<b>1,40</b>	<b>89</b>								
		3x vibro + 3x statična	P-1	0	21,7	1,67	1,37	87							
			P-1	0	22,1	1,65	1,35	86							
			P-2	0	24,2	1,79	1,44	92							
			P-2	0	26,2	1,82	1,44	92							
			P-3	0	23,3	1,83	1,48	94							
			P-3	0	29,7	1,76	1,35	86							
					<b>24,5</b>	<b>1,75</b>	<b>1,41</b>	<b>90</b>							
		4x vibro + 3x statično	P-1	0	24,0	1,69	1,37	87							
			P-1	0	23,1	1,71	1,39	89	9,4	18,7	1,82	1,54	98		
			P-2	0	24,5	1,84	1,48	94							
			P-2	0	25,6	1,84	1,47	93	8,5	21,8	1,77	1,45	92		
			P-3	0	27,9	1,79	1,40	89							
			P-3	0	27,3	1,87	1,47	94	8,0	22,8	1,79	1,46	93		
			P-2	15	21,2	1,92	1,59	101							
				<b>25,4</b>	<b>1,79</b>	<b>1,43</b>	<b>91</b>			<b>21,1</b>	<b>1,79</b>	<b>1,48</b>	<b>94</b>		

\* Opomba: povprečne vrednosti izotopske sonde zajemajo le površinske meritve.



Preglednica C4: Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti četrte nasipne plasti.

Plast	Datum	Št. prehodov	profil	globina	IZOTOPSKA SONDA				DIN. P.	VALJ - LABORATORIJ				
		+št. stat. preh. po vib. preh.			w	$\rho$	$\rho_d$	$D_{pr}$	$E_{vd}$	w	$\rho$	$\rho_d$	$D_{pr}$	
				cm	%	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	%	MPa	%	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	%	
4. NASIPNA PLAST	30.9.2009	1x vibro + 1x statično - valjar 8 ton	P-1	0	24,2	1,80	1,45	94						
			P-1	0	26,9	1,85	1,46	95						
			P-2	0	24,1	1,77	1,43	93						
			P-2	0	23,4	1,80	1,46	95						
			P-3	0	24,0	1,85	1,49	97						
			P-3	0	24,0	1,75	1,41	92						
					<b>24,4</b>	<b>1,81</b>	<b>1,45</b>	<b>94</b>						
		2x vibro + 2x statično	P-1	0	25,5	1,85	1,48	96						
			P-1	0	27,2	1,84	1,45	94	7,2					
			P-2	0	26,3	1,84	1,46	95						
			P-2	0	23,6	1,85	1,50	97	7,3					
			P-3	0	24,1	1,89	1,53	99						
			P-3	0	24,6	1,79	1,43	93	7,0					
			P-2	25	25,0	1,84	1,47	96						
		P-2	15	25,1	1,83	1,46	95							
				<b>25,2</b>	<b>1,84</b>	<b>1,47</b>	<b>96</b>							
		3x vibro + 2x statično	P-1	0	25,5	1,83	1,46	95						
			P-1	0	25,8	1,85	1,47	95						
			P-2	0	25,0	1,87	1,49	97						
			P-2	0	26,6	1,88	1,49	97						
			P-3	0	25,9	1,88	1,50	97						
			P-3	0	24,6	1,85	1,49	96						
				<b>25,6</b>	<b>1,86</b>	<b>1,48</b>	<b>96</b>							
		4x vibro + 2x statično	P-1	0	23,8	1,84	1,49	97						
			P-1	0	25,3	1,85	1,47	96	6,9	23,3	1,83	1,49	97	
			P-2	0	24,4	1,90	1,52	99						
			P-2	0	25,5	1,91	1,52	99	6,3	21,5	1,85	1,52	99	
			P-3	0	23,3	1,93	1,56	101						
			P-3	0	25,5	1,87	1,49	97	7,1	21,7	1,86	1,53	99	
			P-2	25	24,8	1,87	1,50	97						
			P-2	15	24,1	1,88	1,51	98						
				<b>24,6</b>	<b>1,88</b>	<b>1,51</b>	<b>98</b>			<b>22,2</b>	<b>1,85</b>	<b>1,51</b>	<b>98</b>	

\* Opomba: povprečne vrednosti izotopske sonde zajemajo le površinske meritve.



Preglednica C5: Rezultati kontrolnih preiskav zgoščenosti in togosti pete nasipne plasti.

Plast	Datum	Št. prehodov +št. stat. preh. po vib. preh.	profil	globina cm	IZOTOPSKA SONDA				DIN. P.	VALJ - LABORATORIJ					
					w	$\rho$	$\rho_d$	$D_{pr}$	$E_{vd}$	w	$\rho$	$\rho_d$	$D_{pr}$		
					%	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	%	MPa	%	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	%		
5.NASIPNA PLAST	30.9.2009	1x vibro + 2x statično	P-1	0	21,8	1,75	1,43	90							
			P-1	0	18,9	1,74	1,46	91							
			P-2	0	18,7	1,78	1,50	94							
			P-2	0	16,2	1,78	1,53	96							
			P-3	0	16,7	1,81	1,55	97							
			P-3	0	17,6	1,69	1,44	90							
						<b>18,3</b>	<b>1,76</b>	<b>1,49</b>	<b>93</b>						
		2x vibro+ 2x statično	P-1	0	20,9	1,78	1,47	92							
			P-1	0	18,6	1,76	1,49	93	9,2						
			P-2	0	16,8	1,79	1,53	96							
			P-2	0	16,7	1,77	1,51	95	12,2						
			P-3	0	16,7	1,81	1,55	97							
			P-3	0	16,6	1,72	1,48	92	15,4						
						<b>17,7</b>	<b>1,77</b>	<b>1,51</b>	<b>94</b>						
		3x vibro + 2x statično	P-1	0	18,0	1,86	1,58	99							
			P-1	0	20,1	1,75	1,46	91							
			P-2	0	19,2	1,82	1,53	95							
			P-2	0	16,7	1,78	1,52	95							
	P-3		0	17,3	1,84	1,57	98								
	P-3		0	16,6	1,79	1,53	96								
					<b>18,0</b>	<b>1,81</b>	<b>1,53</b>	<b>96</b>							
	4x vibro + 2x statično	30.9.2009	P-1	0	23,4	1,80	1,46	91							
			P-1	0	19,2	1,77	1,49	93	10,8	17,6	1,76	1,49	93		
			P-2	0	18,7	1,82	1,53	96		15,2	1,71	1,49	93		
			P-3	0	16,7	1,84	1,58	99	13,6						
			P-3	0	18,2	1,79	1,51	94		15,6	1,77	1,53	96		
			P-2	25	18,5	1,70	1,44	90	18,5						
						<b>19,2</b>	<b>1,80</b>	<b>1,51</b>	<b>95</b>		<b>16,1</b>	<b>1,75</b>	<b>1,50</b>	<b>94</b>	
		1.10.2009	P-1	0						10,5					
			P-1	0						12,1					
			P-2	0						11,0					
			P-2	0						14,5					
P-3			0						16,8						
P-3			0						18,3						

\* Opomba: povprečne vrednosti izotopske sonde zajemajo le površinske meritve.