

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica doktorske disertacije.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is an original PDF file of doctoral thesis.

When citing, please refer as follows:

Smolar, J. 2016. Prepoznavanje lastnosti in trajnostno upravljanje s sedimenti iz vodnih okolij. = Recognition of properties and sustainable management of sediments from water environments. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentorica Petkovšek, A.)

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6156/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 08-12-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za *gradbeništvo*
in *geodezijo*



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
GRAJENO OKOLJE

Kandidatka:

JASNA SMOLAR

**PREPOZNAVANJE LASTNOSTI IN TRAJNOSTNO
UPRAVLJANJE S SEDIMENTI IZ VODNIH OKOLIJ**

Doktorska disertacija številka: 44/GO

**RECOGNITION OF PROPERTIES AND SUSTAINABLE
MANAGEMENT OF SEDIMENTS FROM WATER
ENVIRONMENTS**

Doctoral thesis No.: 44/GO

Komisija za doktorski študij je na 9. seji 23. septembra 2014, po pooblastilu s 30. seje Senata Univerze v Ljubljani z dne 20. januarja 2009, dala soglasje k temi doktorske disertacije.

Za mentorico je bila imenovana doc. dr. Ana Petkovšek.

Ljubljana, 5. december 2016

Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Ana Petkovšek,
- izr. prof. Janko Logar,
- doc. dr. Ana Mladenović, ZAG in UL NTF,
- izr. prof. dr. Dušan Žagar,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 10. seji, 7. maja 2014.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Janko Logar,
- izr. prof. dr. Dušan Žagar,
- doc. dr. Ana Mladenović, ZAG in UL NTF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 31. seji, 21. septembra 2016.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- doc. dr. Ana Petkovšek, mentorica,
- izr. prof. dr. Janko Logar,
- izr. prof. dr. Dušan Žagar,
- doc. dr. Ana Mladenović, ZAG in UL NTF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 33. seji, 23. novembra 2016.

Spodaj podpisana študentka Jasna Smolar, vpisna številka 26700152, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Prepoznavanje lastnosti in trajnostno upravljanje s sedimenti iz vodnih okolij.

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobila vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označila;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnala v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobila soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

Podpis študentke:

J. Smolar

Ljubljana, 23. november 2016

Popravki

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.131.4/54: 532.13:(043)
Avtor:	Jasna Smolar
Mentor:	doc. dr. Ana Petkovšek
Naslov:	Prepoznavanje lastnosti in trajnostno upravljanje s sedimenti iz vodnih okolij
Tip dokumenta:	Doktorska disertacija
Obseg in oprema:	282 str., 46 pregl., 222 sl., 89 en.
Ključne besede:	mulj, identifikacijske lastnosti, reologija, izboljšanje z vezivi, lezenje, modelni opis

Izvleček

V vodnih plovnih poteh in umetnih akumulacijah na kopnem se kopičijo sedimenti, ki izvirajo iz naravnega geološkega zaledja in so po mineralni in zrnastostni sestavi podobni zemljinam. Nakopičeni sedimenti zmanjšujejo obratovalno in funkcionalno varnost teh objektov, zato jih je potrebno redno odstranjevati in odlagati na drugem mestu. Odlaganje se lahko izvaja s premeščanjem znotraj vodnega telesa ali s skladiščenjem na kopnem. V umetnih akumulacijah na kopnem so uskladiščeni tudi industrijski mulji. Zaradi visoke vlage in rahle strukture je trdnost muljev praviloma nižja od trdnosti zemljin pri vlagi na meji židkosti, številni mulji imajo tiksotropen značaj.

V disertaciji smo raziskovali ali so terenske in laboratorijske raziskave ter materialni modeli, uveljavljeni za zemljine, primerni tudi za identifikacijo lastnosti in napoved obnašanja muljev. Preiskovali smo reful iz Luke Koper in mulj kemične sadre, ki nastaja pri proizvodnji titanovega dioksida v Celju. Oba mulja sta skladiščena na kopnem v umetnih akumulacijah, ki predstavljajo omejitve pri načrtovanju razvoja infrastrukture in proizvodnje. Akumulacije refula so zgrajene za nizkimi obodnimi nasipi, akumulaciji mulja sadre pa za visokima nasutima pregradama Za Travnikom in Bukovžlak, ki sta objekta visokega tveganja.

Lastnosti muljev smo identificirali s terenskimi in laboratorijskimi preiskavami. Rezultate smo iz vrednotili v luči klasične geomehanike, upoštevaje posebnosti, ki izvirajo iz okolja nastanka in novega sedimentacijskega okolja. Raziskali smo vpliv soli na indeksne lastnosti refula, preverili omejitve terenske opreme in veljavnost semiempiričnih zvez, razvitih za zemljine, za vrednotenje terenskih raziskav mulja sadre. Z reološkimi raziskavami smo pokazali široko uporabnost ConTec Viscometra 5, razvitega za malte in betone, tudi na področju sedimentov. Ovrednotili smo občutljivost muljev in njihovo tiksotropno obnašanje. Raziskali smo možnost izboljšanja refula z anorganskimi vezivi.

Iz rezultatov laboratorijskih preiskav in iz parametrov poskusnih tlačnih filtracij suspenzij muljev smo določili parametre za modelne izračune konsolidacijskega lezenja, sušenja v akumulacijah in tlačne filtracije. Ugotovili smo, da lahko konsolidacijsko lezenje v edometru dobro opišemo s Soft soil creep modelom v Plaxisu, da z 1D modelom, razvitim za sušenje plazine iz plazu Slano Blato, ne moremo ustrezno ovrednotiti sušenja muljev v akumulacijah in da lahko tudi s preiskavo stisljivosti v edometru zadovoljivo opišemo tlačno filtracijo.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.131.4/54: 532.13:(043)
Author: Jasna Smolar
Supervisor: Assist. Prof. Ana Petkovšek, PhD
Title: Recognition of properties and sustainable management of sediments from water environments
Document type: Doctoral dissertation
Scope and tools: 282 p., 46 tab., 222 fig., 89 eq.
Key words: mud, index properties, rheology, improvement with additives, creep, modeling

Abstract

Sediments from natural geological hinterland accumulate inside waterways and man made accumulations on land. Their grain size distribution and mineral composition are comparable with soils. Accumulated mud reduces safe operation and functionality of these facilities. Thus, it should be permanently removed and disposed of inside the water body or on land. Industrial muds are also stored in man made accumulations on land. Due to high water content, strength of muds is usually lower than strength of soils with water content at liquid limit. Some muds exhibit thixotropic behaviours.

In this thesis, the validity of in situ and laboratory test methods and material models, developed for soils, for the identification of mud properties and for the prediction of their behaviour, were investigated. Two muds were examined: dredged marine sediment – reful from the Port of Koper and red gypsum mud, which is by-product in the production of titanium dioxide in Celje. Both are deposited on land, in accumulations which present limitations in the planning of the infrastructure and production. Reful is deposited in shallow lagoons, while red gypsum mud is stored behind two large embankments Za Travnikom and Bukovžlak, which represents high risk facilities.

Properties of muds were identified with in situ and laboratory investigations. Results were interpreted in the light of classical soil mechanics, taking into account the specificities which emanate from the mud origin and from new sedimentation environment. The influence of salty pore water on the index properties of reful was determined. The limitations of in situ measuring sensors for the investigation of muds were checked. The validity of semi empirical relationships, developed for evaluation of in situ tests in soils, for the description of red gypsum mud properties were analysed. ConTec Viscometer 5, designed for mortars and concrete, was recognized as suitable also for rheological investigations of muds. The sensitivity and thixotropic behaviours of muds were evaluated. The improvement of reful was investigated by mixing it with inorganic binders.

From the results of laboratory tests and from trial pressure filtration tests, technological and material parameters for model description of consolidation creep, drying and pressure filtration, were estimated. Results show that Soft soil creep model is suitable for the description of consolidation creep, while basic 1D model, developed for the computation of the Slano Blato landslide drying, is not completely appropriate for the description of drying of mud in the accumulation and oedometer test is suitable also for the prediction of the pressure filtration parameters.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc.dr. Ani Petkovšek za izkazano zaupanje in priložnost. Hvala za dostopnost, pomoč in nesebično predajanje znanja in izkušenj.

Hvala g. Željku Blažeki za pomoč in pozitivno energijo.

Hvala sodelavcem Katedre za mehaniko tal z laboratorijem, posebej dr. Mateju Mačku za konstruktivne pogovore in pomoč pri nalogi ter Miranu Mercu za vse ure, ki sva jih skupaj preživela v laboratoriju.

Hvala predstavnikom podjetij Cinkarna Celje d.d. in Luka Koper d.d. za dostopnost in dovoljenje za objavo podatkov.

Hvala doc.dr. Ani Mladenovič in dr. Vesni Zalar Serjun za izvedene mineraloške analize in diskusije.

Hvala izvajalcem terenskih preiskav.

Hvala najbližjim, da ste poskrbeli, da je bil nasmeh vedno kažipot mojih dni.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO VSEBINE	VII
KAZALO PREGLEDNIC	XI
KAZALO SLIK	XIII
LIST OF TABLES	XXII
LIST OF FIGURES	XXIV
SIMBOLI	XXXIV
OKRAJŠAVE	XXXVII
1 UVOD	1
1.1 Ozadje naloge in opredelitev znanstvenega problema	1
1.2 Cilji in hipoteze	4
1.3 Metodologija dela	5
1.4 Struktura naloge	5
2 SEDIMENTACIJA, MEHANIZMI IN OPIS OBNAŠANJA SEDIMENTOV	8
2.1 Osnovna terminološka opredelitev	8
2.2 Sedimenti iz vodnih okolij	10
2.2.1 <i>Odločitveni dejavniki ravnanja s sedimenti iz vodnih okolij</i>	11
2.3 Sedimentacija, vplivi na sediment in procesi po sedimentaciji	13
2.4 Sediment – v vodnem okolju dvo fazni sistem	13
2.4.1 <i>Trdnina</i>	14
2.4.2 <i>Tekočina</i>	15
2.4.3 <i>Zrak</i>	16
2.4.4 <i>Fazna razmerja v sedimentu</i>	16
2.5 Struktura sedimentov	18
2.5.1 <i>Struktura v nekoherentnih zemljinah</i>	18
2.5.2 <i>Struktura v koherentnih zemljinah</i>	20
2.5.3 <i>Strukturni kolaps</i>	23
2.5.4 <i>Likvifakcija</i>	24
2.5.5 <i>Tiksotropija</i>	25
2.5.6 <i>Reopeksija</i>	26
2.6 Osmotska sukcija	26
2.6.1 <i>Sukcija in vodni potenciali</i>	26
2.6.2 <i>Meritve osmotske sukcije (π)</i>	27
2.6.3 <i>Osmotska sukcija različnih raztopin, različnih koncentracij</i>	28
2.7 Vpliv soli na indeksne, fizikalne in mehanske lastnosti zemljin	30
2.7.1 <i>Sol in indeksne lastnosti zemljin</i>	30
2.7.2 <i>Evaporacija</i>	31
2.7.3 <i>Sušenje sedimentov s prisotno osmotsko sukcijo</i>	32
2.8 Reologija	33
2.8.1 <i>Zgodovina</i>	33
2.8.2 <i>Modeli za opis reoloških lastnosti</i>	34
2.8.3 <i>Konsolidacija</i>	36
2.8.4 <i>Strižno lezenje</i>	40
2.8.5 <i>Reometrija – merjenje z reometri in viskometri</i>	41
2.9 Izboljšanje lastnosti sedimentov z dodatki	45
2.9.1 <i>Organski dodatki - flokulanti</i>	45

2.9.2	<i>Anorganska veziva</i>	46
2.10	Znižanje vlage	48
3	MATERIALI V RAZISKAVI	51
3.1	Uvod	51
3.2	Reful	51
3.2.1	<i>Geološke značilnosti lokacije</i>	51
3.2.2	<i>Zgodovina geološko geotehničnih raziskav na območju Luke Koper</i>	52
3.2.3	<i>Okoljska karakterizacija morskega sedimenta in refula</i>	54
3.2.4	<i>Sedimentacija in sušenje refula v akumulacijah</i>	57
3.3	Mulj sadre	57
3.3.1	<i>Nastanek</i>	57
3.3.2	<i>Zgodovina raziskav mulja sadre</i>	58
3.3.3	<i>Okoljska karakterizacija sadre</i>	59
3.3.4	<i>Sedanje ravnanje z muljem sadre</i>	60
4	EKSPERIMENTALNE METODE	62
4.1	Uvod	62
4.2	Odvzem vzorcev za laboratorijske preiskave	62
4.3	Terenske preiskave	64
4.3.1	<i>Terenska krilna sonda (Field vane test)</i>	65
4.3.2	<i>Statični penetracijski preskus (CPT/CPTu)</i>	65
4.3.3	<i>Ploskovni dilatometrski preskus (DMT)</i>	65
4.4	Geomehanske laboratorijske preiskave	66
4.4.1	<i>Priprava preizkušancev</i>	67
4.4.2	<i>Indeksne preiskave</i>	67
4.4.3	<i>Preiskave stisljivosti in lezenja</i>	67
4.4.4	<i>Meritve sukcije</i>	68
4.4.5	<i>Meritve reoloških lastnosti</i>	70
4.4.6	<i>Meritve strižnega lezenja mulja sadre v cikličnem enostavnem strižnem aparatu</i>	72
4.5	Laboratorijske preiskave izboljšanega refula	74
4.5.1	<i>Veziva</i>	75
4.5.2	<i>Priprava mešanic</i>	75
4.5.3	<i>Ugotavljanje tlačne trdnosti alternativnih materialov in mešanic</i>	75
4.5.4	<i>Preiskave stisljivosti</i>	75
4.5.5	<i>Meritve sukcije</i>	76
4.6	Mineraloške analize	76
5	REZULTATI EKSPERIMENTALNEGA DELA	77
5.1	Uvod	77
5.2	Mineralna sestava	77
5.3	Vlaga in gostota sedimentov v akumulacijah	80
5.4	Zrnavostna sestava	82
5.4.1	<i>Morski sedimenti iz Luke Koper</i>	82
5.4.2	<i>Mulj sadre</i>	83
5.5	Indeksne lastnosti	84
5.5.1	<i>Vpliv soli na indeksne lastnosti refula</i>	86
5.5.2	<i>Krčenje zaradi sušenja</i>	87
5.6	Sukcija	89
5.6.1	<i>Reful</i>	90
5.6.2	<i>Mulj sadre</i>	92
5.7	Strižna trdnost merjena v laboratoriju	93
5.7.1	<i>Nedrenirana strižna trdnost</i>	94
5.7.2	<i>Drenirana strižna trdnost</i>	95
5.7.3	<i>Vpliv hitrosti na drenirano strižno trdnost refula</i>	96

5.8	Deformabilnost	96
5.8.1	<i>Reful</i>	96
5.8.2	<i>Mulj sadre</i>	98
5.9	Vodoprepustnost v zasičenem stanju	100
5.9.1	<i>Reful</i>	100
5.9.2	<i>Mulj sadre</i>	101
5.10	Rezultati terenskih preiskav v refulu	102
5.11	Rezultati terenskih preiskav v mulju sadre	103
5.11.1	<i>Merjeni podatki – CPTu in DMT</i>	104
5.11.2	<i>Korelacije meritev CPTu in DMT</i>	104
5.11.3	<i>Terenska klasifikacija mulja sadre</i>	106
5.11.4	<i>Prostorninska teža</i>	108
5.11.5	<i>Stisljivost</i>	111
5.11.6	<i>Nedrenirana strižna trdnost</i>	112
5.11.7	<i>Omejitve uporabljene merske opreme za izvedbo terenskih raziskav</i>	113
5.12	Zaključki	114
6	REOLOŠKE LASTNOSTI	117
6.1	Uvod	117
6.2	Strižno lezenje mulja sadre	117
6.3	Meritve v koaksialnih valjastih reometrih, τ_y in η_p	119
6.3.1	<i>Newtonska tekočina – vrednotenje reoloških parametrov</i>	120
6.3.2	<i>Ne-Newtonska tekočina – vrednotenje reoloških parametrov</i>	120
6.3.3	<i>τ_y in η_p medu in bentonita</i>	122
6.3.4	<i>Reološki parametri refula</i>	125
6.3.5	<i>Primerjava reoloških parametrov refula s podatki iz literature</i>	129
6.3.6	<i>c_{ur} in τ_{min} mulja sadre – meritve s krilno sondo</i>	132
6.3.7	<i>Tokovne krivulje mulja sadre</i>	135
6.4	Tiksotropija	137
6.5	Zaključki	139
6.5.1	<i>Reful</i>	139
6.5.2	<i>Mulj sadre</i>	139
7	IZBOLJŠANJE REFULA Z VEZIVI	141
7.1	Uvod	141
7.2	Veziva	141
7.2.1	<i>Elektrofiltrski pepel (EFP)</i>	141
7.2.2	<i>Papirniški pepel (MULEX)</i>	142
7.2.3	<i>Časovni prirast tlačne trdnosti</i>	144
7.3	Priprava refula	144
7.4	Priprava mešanic in preizkušancev	145
7.5	Rezultati fizikalno mehanskih preiskav	146
7.5.1	<i>Vpliv veziv na pH mešanice</i>	146
7.5.2	<i>Sukcija z vezivi izboljšanega refula</i>	147
7.5.3	<i>Stisljivost izboljšanega refula</i>	148
7.5.4	<i>Tlačna trdnost</i>	149
7.6	Rezultati mineraloških analiz	153
7.6.1	<i>Reful izboljšan z dodatkom 10m% EF pepela, mešanica (2)-9</i>	153
7.6.2	<i>Reful izboljšan z dodatkom 7m% EF pepela in 3m% apna, mešanica (2)-6</i>	155
7.6.3	<i>Reful izboljšan z dodatkom 7m% EF pepela in 3m% cementa, mešanica (2)-7</i>	157
7.6.4	<i>Reful izboljšan z dodatkom 10m% MULEXa, mešanica (2)-8</i>	159
7.6.5	<i>Primerjava monokarboaluminata v mešanicah z glavno komponento veziva EF pepel</i>	161
7.7	Zaključek	162
8	MODELIRANJE KONSOLIDACIJSKEGA LEZENJA	163

8.1	Uvod	163
8.2	Metoda določanja materialnih parametrov SSC modela	163
8.3	Materialni parametri SSC modela	167
8.3.1	<i>Reful</i>	167
8.3.2	<i>Mulj sadre</i>	169
8.4	Primerjava modela in meritev	170
8.5	Kontrolni izračuni s SSC modelom v programu Plaxis	172
8.5.1	<i>Geometrija modela in robni pogoji – Plaxis</i>	172
8.5.2	<i>Reful</i>	172
8.5.3	<i>Mulj sadre</i>	175
8.6	Zaključek	179
9	MODELIRANJE SUŠENJA	181
9.1	Uvod	181
9.2	Vpliv soli na hitrost sušenja – laboratorijski poskus	181
9.3	Lastnosti modela in potrebni materialni podatki	184
9.4	Modelni izračun sušenja refula	185
9.4.1	<i>Materialni parametri refula</i>	185
9.4.2	<i>Preverba delovanja numeričnega modela – simulacija laboratorijske preiskave</i>	187
9.4.3	<i>Numerični izračun sušenja refula v akumulaciji</i>	188
9.5	Modelni izračun sušenja mulja sadre	192
9.6	Določitev parametrov modela na zemljinah	196
9.7	Zaključek	198
10	MODELIRANJE OŽEMANJA / FILTRACIJE	199
10.1	Uvod	199
10.2	Teoretično ozadje izračunov	199
10.2.1	<i>Osnovne enačbe</i>	199
10.3	Parametri v izračunih	202
10.3.1	<i>Suspenzija morskega sedimenta</i>	202
10.3.2	<i>Suspenzija sadre</i>	203
10.4	Rezultati izračunov	204
10.4.1	<i>Izračuni s parametri iz poskusnih filtracij</i>	205
10.4.2	<i>Vpliv upornosti filtra</i>	206
10.4.3	<i>Vpliv upornosti filtrskega kolača</i>	207
10.5	Opis tlačne filtracije s konsolidacijo v edometru	208
10.6	Zaključek	210
11	RAZPRAVA K NAJPOMEMBNEJŠIM UGOTOVITVAM	211
11.1	Rezultati eksperimentov	211
11.1.1	<i>Temeljna vprašanja pred izvedbo eksperimentov</i>	211
11.1.2	<i>Odgovori po izvedbi eksperimentov</i>	213
11.2	Modeliranje obnašanja muljev v različnih pogojih zniževanja vlage	216
11.2.1	<i>Konsolidacijsko lezenje</i>	216
11.2.2	<i>Zračno sušenje</i>	217
11.2.3	<i>Ožemanje na tlačnih filtrih</i>	218
12	ZAKLJUČKI	219
12.1	Povzetek ugotovitev opravljenega dela	219
12.2	Uresničitev ciljev naloge	220
12.3	Evalvacija hipotez	220
12.4	Naloga in njen prispevek k znanosti	222
12.5	Smernice za nadaljnje delo	222
13	POVZETEK	224
14	SUMMARY	226
VIRI		228

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Možnosti rabe sedimentov iz vodnih okolij, povzeto po Bailey et al. (2013).	12
Preglednica 2.2: Relativna gostota zrn mineralov (Fredlund in Rahardjo, 1993).	14
Preglednica 2.3: Klasifikacija glede na velikost zrn po SIST EN ISO 14688.	14
Preglednica 2.4: Lastnosti idealne strukture sferičnih (kroglastih) zrn enake velikosti (Mitchel in Soga, 2005).	19
Preglednica 2.5: Osnovni reološki modeli.	34
Preglednica 2.6: Nekateri ostali reološki modeli (Barnes et al., 1989; Jeong, 2006).	36
Preglednica 2.7: Rezultati tlačne filtracije suspenzije sadre (Petkovšek, 2009).	50
Preglednica 2.8: Rezultati tlačne filtracije suspenzije refula (Kemijški inštitut).	50
Preglednica 3.1: Značilne fizikalno mehanske lastnosti morske glin v Luki Koper (Logar, 2010a).	53
Preglednica 3.2: Rezultati kemijskih analiz in situ sedimenta in refula iz Luke Koper.	55
Preglednica 3.3: Rezultati kemijskih analiz izlužkov pridobljenih iz in situ sedimenta in refula iz Luke Koper.	56
Preglednica 3.4: Značilne fizikalno mehanske lastnosti filtrskega kolača sadre (Petkovšek, 2014).	58
Preglednica 4.1: Odvzem porušenih in intaktnih vzorcev sedimentov (Sharma in Singh, 2015).	62
Preglednica 4.2: Pregled standardnih laboratorijskih preiskav.	66
Preglednica 4.3: Vretena in posode s preizkušancem v preiskavah z reometrom DV3T HB.	71
Preglednica 5.1: Mineralna sestava refula in mulja sadre.	78
Preglednica 5.2: Zastopanost posameznih mineralov v in situ sedimentu in v refulu.	79
Preglednica 5.3: Indeksni parametri naravno slanega refula in mulja sadre.	85
Preglednica 5.4: Vpliv slane vode na indeksne lastnosti morskih glin in bentonita (Smolar, 2015).	86
Preglednica 5.5: Parametri Brooks in Corey-eve funkcije za slan in opran reful.	92
Preglednica 5.6: Ključ za klasifikacijo mulja sadre po CPTu in DMT (Slike 5.42 do 5.44).	108
Preglednica 6.1: Vlaga vzorcev mulja sadre pred in po preiskavi in pogoji med preiskavo strižnega lezenja.	118
Preglednica 6.2: Kombinacije reometra, vretena in valja, uporabljene v raziskavi bentonitne suspenzije in rezultati preiskav (Binghamov model).	124
Preglednica 6.3: Kombinacije reometra, vretena in valja, uporabljene v raziskavi refula.	126
Preglednica 6.4: Lastnosti preizkušancev refula, ki smo jim izmerili reološke parametre.	126
Preglednica 6.5: Reološki parametri refula, τ_y (Pa), η_p (mPa·s) (Binghamov model).	127
Preglednica 6.6: Reološki parametri mulja sadre (Binghamov model); τ_y (Pa), η_p (mPa·s).	136
Preglednica 7.1: Kazalo mešanic refula z vezivi.	145
Preglednica 7.2: Tlačna trdnost 7 dni starih preizkušancev, pripravljenih iz različnih mešanic.	152
Preglednica 7.3: Kazalo preizkušancev za mineraloške analize.	153
Preglednica 8.1: Materialni parametri za opis deformacijskega obnašanja refula.	168

Preglednica 8.2: Materialni parametri za opis deformacijskega obnašanja mulja sadre iz ojezeritve (TJ1 in TJ4) in mulja sadre pod suhim nasipom (IN-1/15).	169
Preglednica 8.3: Materialni parametri refula za izračun s SSC modelom v Plaxisu.	173
Preglednica 8.4: Materialni parametri mulja sadre za izračun s SSC modelom v Plaxisu.	175
Preglednica 8.5: Parameter $C_{\alpha e}$, upoštevan v izračunu za posamezne bremenske stopnje.	176
Preglednica 9.1: Materialni parametri v 1D modelnem izračunu.	185
Preglednica 9.2: Materialni parametri refula.	185
Preglednica 9.3: Materialni parametri mulja sadre.	192
Preglednica 10.1: Upornost filtrskega kolača α (Leu, 1986).	201
Preglednica 10.2: Rezultati poskusnega ožemanja suspenzije refula (Kemijski inštitut).	202
Preglednica 10.3: Materialni in tehnološki parametri v izračunih ožemanja suspenzije refula.	203
Preglednica 10.4: Tehnološki parametri poskusnega ožemanja in vlaga filtrskega kolača sadre (Petkovšek, 2009).	204
Preglednica 10.5: Materialni in tehnološki parametri upoštevani v izračunih ožemanja suspenzije mulja sadre.	204
Preglednica 10.6: Materialni parametri muljev v izračunih parametra α .	209
Preglednica 10.7: Kolač refula – izračun filtracije iz edometriških preiskav stisljivosti.	209
Preglednica 10.8: Kolač sadre – izračun filtracije iz edometriških preiskav stisljivosti.	209

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Rezervoar št. 10 in tok rdeče sadre zaradi porušitve SZ dela, Ajka, Madžarska (Satelite imaging corporation, 2010).	2
Slika 1.2: Pogled na dolino Stava pred in po blatnem toku zaradi porušitve jalovinskih pregrad Prestavel (Petkovšek in Pulko (2015) po WISE Uranium Project (2009)).	3
Slika 2.1: Fazni diagram delno zasičene zemljine.	17
Slika 2.2: Shematski prikaz rahle (levo) in goste (desno) strukture zemljin (Mitchel in Soga, 2005).	19
Slika 2.3: Modeli pravilnega pakiranja sferičnih (kroglastih) zrn enakega premera (Mitchel in Soga, 2005; Petkovšek, 2006a).	19
Slika 2.4: Shema sataste strukture (Mitchel in Soga, 2005).	20
Slika 2.5: Shema ureditve zrn v dispergirani in neflokulentni strukturi (Das, 1993; Mitchel in Soga, 2005).	21
Slika 2.6: Načini stikovanja zrn (Das, 1993; Mitchel in Soga, 2005).	21
Slika 2.7: Flokulentna struktura (Das, 1993).	21
Slika 2.8: Solna flokulentna struktura (Das, 1993).	22
Slika 2.9: Ureditve zrn in skupkov na mikro nivoju (levo) in na makro nivoju (desno) (Das, 1993; Petkovšek, 2006a).	22
Slika 2.10: Struktura intaktne morske gline, prirejeno po Mitchel in Soga (2005).	23
Slika 2.11: SEM mikroposnetek refula (levo) in mulja sadre (desno).	23
Slika 2.12: Identifikacija strukturnega kolapsa v nezasičeni zemljini (Petkovšek, 2006a).	24
Slika 2.13: Lastnosti tiksotropnega materiala (Mitchel in Soga, 2005).	26
Slika 2.14: Osmotska sukcija slanah raztopin v odvisnosti od koncentracije.	29
Slika 2.15: Osmotska sukcija slanah raztopin v odvisnosti od elektroprevodnosti.	30
Slika 2.16: Razmerje E/E_p v odvisnosti od vlage (levo) in sukcije zemljine (desno) (Maček (2012) po Wilson et al. (1997)).	33
Slika 2.17: Maxwellov reološki model.	35
Slika 2.18: Kelvin - Voightov model.	35
Slika 2.19: Binghamov reološki model.	35
Slika 2.20: Izotahe za opis obnašanja krede (Šuklje, 1957).	38
Slika 2.21: Sistem izohron (prirejeno po Bjerrum (1967)) (levo) in shematski prikaz izračuna efektivnega časa lezenja (desno).	38
Slika 2.22: Shema naraščanja parametra τ_c zaradi vplivov lezenja, prirejeno po Bjerrum (1967).	39
Slika 2.23: Obnašanje gline med preiskavo lezenja v enostavnem strigu (Meschyan, 1995).	41
Slika 2.24: Senzorski sistemi reometrov: (a) koaksialni valjasti, (b) stožec in plošča in (c) dve vzporedni plošči (Zupančič-Valant, 2007).	41
Slika 2.25: Shematski prikaz rezultatov reoloških meritev v laboratoriju, prirejeno po Jeong et al. (2010).	43
Slika 2.26: Osnovni tipi tokovnih krivulj (Jeong, 2006).	44
Slika 2.27: Geočrevo, napolnjeno z refulom z dodanim flokulantom (foto: arhiv KMTAL).	45

Slika 2.28: Izbira veziv na podlagi indeksnih lastnosti zemljine (Texas Department of Transportation, 2005).	47
Slika 2.29: Izbira veziv na podlagi zrnastostne sestave zemljine (BV Kalk, 2004).	47
Slika 2.30: Model formiranja filtrskega kolača pri tlačni filtraciji, prirejeno po Theliander in Fathi-Najafi (1996). Legenda: $\Delta P_{m,i}$ – upad tlaka na filtru v času i , $\Delta P_{j,i}$ – upad tlaka na j -ti plasti filtrskega kolača, v času i , $\Delta x_{j,i}$ – debelina j -tega sloja filtrskega kolača, formiranega v času i .	49
Slika 3.1: Koprski zaliv s prikazano porazdelitvijo površin sedimentov (Ogorelec et al., 1991).	52
Slika 3.2: Sedimentološki prerez Koprskega zaliva (Ogorelec et al., 1997).	52
Slika 3.3: Pomola I in II, zgrajena na konsolidiranem refulu (Logar, 2010a).	53
Slika 3.4: Ena od akumulacij refula (foto: arhiv KMTAL).	54
Slika 3.5: Pogled na akumulacijo mulja sadre za pregrado Za Travnikom (foto: arhiv KMTAL).	58
Slika 3.6: Prečni prerez poskusnega nasipa iz filtrskega kolača sadre z vgrajeno mersko opremo (Petkovšek, 2014).	59
Slika 3.7: Prečni prerez lizimetra iz sadre (Petkovšek, 2014).	60
Slika 3.8: Rezultati analiz kakovosti vode precejene skozi lizimeter iz sadre, obdobje 2011-2016 (Smolar et al., 2016).	60
Slika 4.1: Shematski prikaz prereza akumulacije za odlaganje refula (zgoraj) in akumulacije za zadrževanje mulja sadre (spodaj) (Smolar, 2015).	63
Slika 4.2: Stanje površine v kasetah, kjer reful že več let miruje (fotografirano poleti 2015) (levo) in odvzem intaktnih vzorcev (desno) (foto: arhiv KMTAL).	63
Slika 4.3: Situacija ojezerjenega dela akumulacije Za Travnikom z vrisanimi lokacijami izvedbe terenskih meritev in vrtin, iz katerih je bil odvzet mulj sadre za laboratorijske preiskave. Izolinije na situaciji prikazujejo dno akumulacije pred polnjenjem (zgoraj). Jedro vrtine mulja sadre, shranjeno v PVC črevesih, dolžine 1 m (spodaj) (foto: arhiv KMTAL).	64
Slika 4.4: Piezokrogla, last podjetja SLP d.o.o., prvič uporabljena za preiskave mehkih sedimentov v Sloveniji (foto: arhiv KMTAL).	66
Slika 4.5: Veliki edometer – Rowe celica, v kateri smo s konsolidacijo iztiskali vodo iz sedimentov (foto: arhiv KMTAL).	68
Slika 4.6: Shema naprave Hyprop (Maček, 2012).	69
Slika 4.7: Shematski prečni prerez naprave WP4-T (Maček, 2012).	70
Slika 4.8: DV3T HB reometer (levo), koaksialni cilinder z vreteni (sredina) in krilne sonde (desno) (foto: arhiv KMTAL).	71
Slika 4.9: ConTec Viscometer 5 (levo), zunanji in notranji valj (desno). V zunanjem valju so vidna rebra, ki preprečujejo zdrs materiala po steni cilindra (foto: arhiv KMTAL).	72
Slika 4.10: Ciklični enostavni strižni aparat DTA-136 (zgoraj) in pogled na vgrajen preizkušaneč, obdan z žično membrano (spodaj) (foto: arhiv KMTAL).	74
Slika 4.11: Mehanizem obnašanja preizkušance v direktnem strigu (levo) in enostavnem strigu (desno).	74

Slika 5.1: SEM posnetek refula (levo) in mulja sadre iz ojezeritve (desno).	78
Slika 5.2: XRD spekter vzorca refula.	78
Slika 5.3: SEM mikro posnetek refula in rezultati EDS analize – zrno sljude.	79
Slika 5.4: SEM mikro posnetek refula in rezultati EDS analize – zrno glinenca.	79
Slika 5.5: SEM mikro posnetek refula in rezultati EDS analize – zrno framboidalnega pirita.	80
Slika 5.6: Profil vlage v akumulaciji refula (levo) in mulja sadre v ojezeritvi (desno).	81
Slika 5.7: Profil suhe gostote v akumulaciji refula (levo) in mulja sadre v ojezeritvi (desno).	81
Slika 5.8: Primerjava vlage mulja sadre pod vodnim pokrovom (modri simboli) in mulja sadre pod suhim nasipom (rdeči in zeleni simboli).	82
Slika 5.9: Območje krivulj zrnivosti refula in naravnega sedimenta iz Koprškega zaliva.	82
Slika 5.10: Krivulje zrnivosti mulja sadre iz vrtin v ojezeritvi (Slika 4.3, zgoraj).	83
Slika 5.11: Zastopanost posameznih frakcij v mulju sadre iz vrtin TJ-1 (levo) in TJ-4 (desno), v odvisnosti od globine.	84
Slika 5.12: AC diagram s prikazom lastnosti preiskovanih sedimentov.	85
Slika 5.13: Normirana vrednost $w_{Lmorska\ voda}/w_{Lvoda}$ v odvisnosti od w_{Lvoda} .	87
Slika 5.14: Normirana vrednost $I_{Pmorska\ voda}/I_{Pvoda}$ v odvisnosti od w_{Lvoda} .	87
Slika 5.15: Krivulja krčenja refula in mulja sadre (naravna pora raztopina).	88
Slika 5.16: Krčitvene razpoke na površinah refula, ki so izpostavljene okoljskim vplivom (foto: arhiv KMTAL).	88
Slika 5.17: Osmotska sukcijska porne vode iz preiskovanih muljev in osmotska sukcijska standardnih raztopin pri različnih koncentracijah (vir: glej poglavje 2.6.3).	89
Slika 5.18: Sušenje zemljin v različnih raztopinah. Začetno stanje (levo) in stanje 22 dni zračno sušenih preizkušancev (desno).	90
Slika 5.19: Retencijska krivulja refula.	90
Slika 5.20: Povezava med vlago, sukcijsko količnikom por in saturacijo refula.	91
Slika 5.21: Zveza sukcijska – saturacija določena na slanem in opranem refulu.	91
Slika 5.22: Retencijska krivulja mulja sadre.	93
Slika 5.23: Zveza osmotska sukcijska – koncentracija soli (levo) in primerjava osmotske sukcijske zasičenih preizkušancev in meritev na porni vodi (desno).	93
Slika 5.24: Nedrenirana strižna trdnost refula (levo) in in situ sedimenta na morskem dnu (desno).	94
Slika 5.25: Nedrenirana strižna trdnost mulja sadre v ojezeritvi (modri simboli) in pod suhim nasipom (zeleni simboli).	95
Slika 5.26: Drenirana strižna trdnost refula in in situ sedimenta (levo) in mulja sadre (desno).	95
Slika 5.27: Vpliv hitrosti striga na izmerjene strižne karakteristike refula.	96
Slika 5.28: Krivulje stisljivosti refula (levo) in in situ sedimenta (desno). Legenda: 0-0.2 m globina, $w=43.1\%$ vlaga ob vgradnji.	97
Slika 5.29: Količnik por refula pri t.i. nični efektivni vertikalni napetosti.	97
Slika 5.30: Krivulje stisljivosti mulja sadre, soodvisnost med količnikom por (e) in efektivno vertikalno napetostjo (σ_v').	98
Slika 5.31: Krivulje stisljivosti mulja sadre, soodvisnost vertikalne deformacije (ε) in efektivne vertikalne napetosti (σ_v').	99

Slika 5.32: Časovni potek konsolidacije mulja sadre v edometru, lezenje med dolgo bremensko stopnjo 400 kPa (levo) in konsolidacijsko lezenje energetske sadre v petroleju in vodi (desno) (Petkovšek, 2014).	99
Slika 5.33: Časovni potek konsolidacije mulja sadre v velikem edometru (Rowe celici).	100
Slika 5.34: Vodoprepustnost refula in in situ sedimenta.	101
Slika 5.35: Vodoprepustnost mulja sadre iz ojezeritve in mulja sadre pod suhim nasipom.	101
Slika 5.36: Pogled na različno prepustna vzorca mulja sadre pod suhim nasipom.	102
Slika 5.37: Nedrenirana strižna trdnost refula določena iz terenskih meritev in merjena v laboratoriju.	103
Slika 5.38: Merjeni (surovi) podatki CPTu in DMT v TJ-1 (zgoraj) in TJ-4 (spodaj).	104
Slika 5.39: Primerjava parametra I_{D_DMT} in I_{D_CPTu} .	105
Slika 5.40: Primerjava parametra K_{D_DMT} in K_{D_CPTu} .	106
Slika 5.41: Primerjava parametra E_{D_DMT} in E_{D_CPTu} .	106
Slika 5.42: Klasifikacijski diagram; soodvisnost $Q_{tn}-F_r$ (Robertson, 2009b).	107
Slika 5.43: Klasifikacijski diagram; soodvisnost $Q_{tn}-B_q$ (Robertson, 1990).	107
Slika 5.44: Klasifikacija mulja sadre iz CPTu in DMT.	107
Slika 5.45: Diagram za določitev razmerja γ / γ_w iz DMT (Marchetti, 1999).	108
Slika 5.46: Primerjava prostorninske teže iz vrednotene iz CPTu in DMT in merjene v laboratoriju. Legenda: CPTu – izračun iz enačbe 5.13, CPTu corr. in DMT corr. – korekcija KMTAL, CPTu corr. R – korekcija po Robertson in Cabal (2010), DMT – določeno po Sliki 5.45, laboratorij – vrednosti, merjene v laboratoriju.	109
Slika 5.47: Primerjava efektivne vertikalne napetosti iz vrednotene iz prostorninske teže po CPTu in DMT in merjene v laboratoriju. Legenda – glej Sliki 5.46.	110
Slika 5.48: Moduli stisljivosti iz vrednoteni iz CPTu in DMT in napoved na podlagi laboratorijskih preiskav. Črtica levo in desno od simbola (sivega diamanta) označuje verjetno zgornjo in spodnjo mejo modula stisljivosti, ocenjenega iz laboratorijskih preiskav.	111
Slika 5.49: Primerjava nedrenirane strižne trdnosti, iz vrednotene iz CPTu, DMT, merjene s terensko krilno sondo (FVT) in v laboratoriju s konusom (FC) in z laboratorijsko krilno sondo (LVT).	113
Slika 5.50: Območje delovanja DMT (levo) in CPTu (desno) in merjena vrednost v mulju sadre.	114
Slika 6.1: Časovni prirast strižne deformacije preizkušancev mulja sadre (levo) in osne (vertikalne) deformacije (desno).	118
Slika 6.2: Soodvisnost strižne in osne (vertikalne) deformacije preizkušancev mulja sadre (levo) in hitrost prirasta strižne deformacije (desno).	119
Slika 6.3: Reološko obnašanje Newtonskih tekočin.	120
Slika 6.4: Binghamov model (levo) in pogled na koaksialni cilinder s preizkušancem (desno) (Feys et al., 2013).	121
Slika 6.5: Soodvisnosti $\tau - \gamma$ (levo) in $\eta - \gamma$ (desno) za med.	123
Slika 6.6: Odvisnost c_{ur} v bentonitni suspenziji, od hitrosti vrtenja krilne sonde.	124
Slika 6.7: Tokovne krivulje bentonitne suspenzije, izmerjene z dvema različnima koaksialnima valjastima reometroma.	124

Slika 6.8: Odvisnost c_{ur} od hitrosti vrtenja krilne sonde (levo) in prirast strižne napetosti v odvisnosti od zasuka, za različne hitrosti vrtenja sonde (desno).	125
Slika 6.9: Odvisnost c_{ur} v refulu od vlage (levo) in soodvisnost c_{ur} in τ_{min} različno vlažnega refula (desno).	125
Slika 6.10: Časovni upad τ različno vlažnih pregnetenih preizkušancev refula.	126
Slika 6.11: Binghamovi reološki parametri refula; τ_y (Pa), η_p (mPa·s) v odvisnosti od vlage preizkušanca.	127
Slika 6.12: Tokovne krivulje različno vlažnega refula (S1 do S6), izmerjene z različnimi kombinacijami reometrov, vreten in valjev (Preglednica 6.3).	128
Slika 6.13: Tokovne krivulje različno vlažnega refula (S1 do S6), izmerjene s CTV5 (zgoraj) in DV3T HB reometrom, z uporabo krilne sonde in gladkega vretena (v sredini in spodaj).	129
Slika 6.14: Stabilna luknja, ki se je formirala v preizkušancu S1 med preiskavo z vretenom.	129
Slika 6.15: Soodvisnost $I_L - \tau_y$. Vrednosti, določene na refulu in literaturni podatki.	130
Slika 6.16: Soodvisnost $I_L - \eta_p$. Vrednosti, določene na refulu in literaturni podatki.	131
Slika 6.17: Soodvisnost $\eta_p - \tau_y$. Vrednosti, določene na refulu in literaturni podatki. Črne linije so zveze $\eta_p - \tau_y$ za glinene, meljaste in peščene materiale.	131
Slika 6.18: Odvisnost c_{ur} mulja sadre od hitrosti vrtenja krilne sonde.	132
Slika 6.19: Krivulje poteka strižne napetosti mulja sadre za različne hitrosti vrtenja krilne sonde.	133
Slika 6.20: Odvisnost c_{ur} od vlage (levo) in c_{ur} in τ_{min} v odvisnosti od vlage (desno) za mulj sadre.	133
Slika 6.21: Časovni potek τ različno vlažnih preizkušancev (hitrost 0.25 obr/min).	134
Slika 6.22: Časovni potek τ različno starih (različno dolgo sedimentiranih) preizkušancev (hitrost 0.25 obr/min).	134
Slika 6.23: c_{ur} (levo zgoraj) in τ_{min} (desno zgoraj) različno dolgo konsolidiranih preizkušancev mulja sadre in vlaga na dan meritve (spodaj).	135
Slika 6.24: Tokovne krivulje različno vlažnega mulja sadre (M1 do M3), določene iz meritev z različnimi kombinacijami reometrov, vreten in cilindrov.	136
Slika 6.25: Tokovne krivulje različno vlažnega mulja sadre (M1 do M3), izmerjene s krilnimi sondami (levo) in z gladkimi vreteni (desno).	137
Slika 6.26: Rezultat preiskave tiksotropije refula.	138
Slika 6.27: Tiksotropno obnašanje mulja sadre.	138
Slika 7.1: Izbira veziv na podlagi indeksnih lastnosti zemljine (Texas Department of Transportation, 2005).	141
Slika 7.2: XRD spekter vzorca kalcijskega EF pepela (TET).	142
Slika 7.3: SEM mikro posnetek vzorca kalcijskega EF pepela (TET).	142
Slika 7.4: XRD spekter vzorca papirniškega pepela.	143
Slika 7.5: SEM mikro posnetek vzorca papirniškega pepela.	143
Slika 7.6: SEM mikro posnetek steklastega zrna z rezultati EDS analize – zrno iz kalcija, silicija, aluminija, natrija, kalija, železa in magnezija..	143
Slika 7.7: Časovni prirast tlačne trdnosti, določen na zgoščenih preizkušancih alternativnih materialov, uporabljenih kot vezivo.	144

Slika 7.8: Proctorjeva krivulja refula (levo) in tlačna trdnost različno vlažnih zgoščenih preizkušancev refula (desno).	145
Slika 7.9: Vpliv dodatka apna (A) in cementa (C) na pH refula.	146
Slika 7.10: Vpliv dodatka kombiniranih veziv (EF pepela (EFP) in cementa (C) ali EF pepela in apna (A)), EF pepela in MULEXa na pH refula.	147
Slika 7.11: Totalna in matrična sukcijska krivulja refula.	147
Slika 7.12: Totalna in matrična sukcijska krivulja mešanic.	148
Slika 7.13: Totalna sukcijska krivulja staranih preizkušancev, pripravljenih iz dveh različnih mešanic.	148
Slika 7.14: Primerjava krivulj stisljivosti svežih preizkušancev izboljšane in neizboljšane refula.	149
Slika 7.15: Krivulje stisljivosti različno starih preizkušancev izboljšane refula.	149
Slika 7.16: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz osušenega (1) ali ožetega (2) refula, z dodatkom EF pepela iz treh odvzemov (po Preglednici 7.1).	150
Slika 7.17: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz osušenega (1) ali ožetega (2) refula, z dodatkom EF pepela in apna (A) (po Preglednici 7.1).	150
Slika 7.18: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz ožetega (2) refula, z dodatkom EF pepela in cementa (C) (po Preglednici 7.1).	151
Slika 7.19: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz ožetega (2) refula, z dodatkom papirniškega pepela (MULEX) (po Preglednici 7.1).	151
Slika 7.20: Časovni prirast tlačne trdnosti različnih mešanic, pripravljenih iz primerljivo vlažnega refula ($w=44\%-46\%$).	152
Slika 7.21: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-9 in refula.	153
Slika 7.22: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-9; produkt hidratacije in refula.	154
Slika 7.23: SEM mikroposnetek izboljšane refula, mešanica (2)-9. Puščice označujejo prepletanje različnih struktur (igličaste in ploščaste).	154
Slika 7.24: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-9.	155
Slika 7.25: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-6 in refula.	155
Slika 7.26: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-6; produkt hidratacije in refula.	156
Slika 7.27: SEM mikroposnetek izboljšane refula, mešanica (2)-6.	156
Slika 7.28: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-6.	157
Slika 7.29: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-7 in refula.	158
Slika 7.30: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-7; produkt hidratacije in refula.	158
Slika 7.31: SEM mikroposnetek izboljšane refula, mešanica (2)-7. Puščice označujejo prepletanje različnih struktur (igličaste in ploščaste).	158
Slika 7.32: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-7.	159
Slika 7.33: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-8 in refula.	159

Slika 7.34: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-8; produkt hidratacije in refula.	160
Slika 7.35: SEM mikroposnetek izboljšane refula, mešanica (2)-8. Puščice označujejo prepletanje različnih struktur (igličaste in ploščaste).	160
Slika 7.36: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-8.	161
Slika 7.37: Izsek iz difraktogramov 60 dni starih preizkušancev iz različnih mešanic (2)-9, (2)-6 in (2)-7.	161
Slika 8.1: Konsolidacija refula in mulja sadre pri bremenski stopnji 12.5 kPa (normirane krivulje).	163
Slika 8.2: Standardna določitev parametrov C_c , C_s , C_{ae} in POP iz edometrske preiskave	164
Slika 8.3: Določanje parametrov C_{ae} in τ_c za normalno konsolidirano (zgoraj levo) in prekonsolidirano sadro (zgoraj desno in spodaj).	166
Slika 8.4: Parameter C_{ae} v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za reful.	168
Slika 8.5: Parameter C_{ae} v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za plazino na plazuzi Stogovce in sivico.	168
Slika 8.6: Parameter C_{ae} v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za mulj sadre iz ojezeritve.	169
Slika 8.7: Parameter C_{ae} v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za mulj sadre pod suhim nasipom.	169
Slika 8.8: Ujemanje krivulj stisljivosti refula. Modelni izračun (m) in rezultati edometra (s).	170
Slika 8.9: Ujemanje krivulj stisljivosti mulja sadre iz akumulacije. Modelni izračun (m) in rezultati edometra (s).	171
Slika 8.10: Ujemanje krivulj stisljivosti mulja sadre pod suhim nasipom. Modelni izračun (m) in rezultati edometra (s).	171
Slika 8.11: Geometrija modela v programu Plaxis.	172
Slika 8.12: Določitev parametra vodoprepustnosti refula iz merjenih vrednosti.	173
Slika 8.13: Časovni razvoj deformacij v zaporednih bremenskih stopnjah za reful iz globine 0-0.2 m (zgoraj) in iz globine 0.2-0.4 m (spodaj). Polne linije – meritve v edometru, črtkane linije – izračun v Plaxisu.	174
Slika 8.14: Izračunana (rdeča polna črta), korigirana izračunana (rdeča črtkana črta) in merjena (črna črta) krivulja stisljivosti refula na globini 0.2-0.4 m.	175
Slika 8.15: Določitev parametra vodoprepustnosti mulja sadre, iz merjenih vrednosti.	176
Slika 8.16: Mulj sadre - primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za klasičen potek edometrske preiskave.	177
Slika 8.17: Mulj sadre - primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za lezenje pri bremenski stopnji 400 kPa.	177
Slika 8.18: Mulj sadre - primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za preizkušane večjih dimenzij (Rowe edometer).	178
Slika 8.19: Primerjava merjenih in izračunanih krivulj stisljivosti mulja sadre.	179
Slika 9.1: Začetno stanje preizkušancev, pripravljenih z različnimi pornimi raztopinami.	182
Slika 9.2: Preizkušanci po dveh dneh sušenja na zraku (levo) in zračno suhi preizkušanci (desno).	182
Slika 9.3: Izhlepevanje kot % izgubljene vode v odvisnosti od časa.	183

Slika 9.4: Shema izračuna po metodi Crank-Nicolson za 1 dimenzionalni problem (Maček, 2012).	185
Slika 9.5: Primerjava računskih vrednosti (črtkano) in merjenih v laboratoriju. Levo edometrska preiskava, desno meja krčenja.	186
Slika 9.6: Primerjava računskih vrednosti (črtkano) in merjenih v laboratoriju. Meritve retencijske krivulje s hkratnim merjenjem gostote zemljine. Desno zgoraj je dodana tudi meritev sukcije v napravi HYPROP in meritev vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku (rdeč simbol).	186
Slika 9.7: Rezultat modelnega izračuna sušenja in rezultat meritve v napravi Hyprop. Legenda: sp.t., zg.t., glej Sliko 4.6.	187
Slika 9.8: Izračun sukcije po globini za različne čase sušenja. Globina 0 cm pomeni površino in globina 5 cm dno preizkušanca.	188
Slika 9.9: Meteorološki podatki na lokaciji (ARSO, 2016).	189
Slika 9.10: Vpliv osmotske sukcije na gibanje matrične sukcije v refulu na globini 0.02 m (levo) in 1.5 m (desno).	190
Slika 9.11: Vpliv osmotske sukcije na vlago refula na globini 0.02 m (polne črte) in 1.5 m (črtkane črte).	190
Slika 9.12: Vpliv osmotske sukcije na saturacijo refula na globini 0.02 m.	190
Slika 9.13: Računska vlaga refula po globini, za čas mirovanja 100 dni in 1950 dni, primerjalno z meritvami vlage na vzorcih iz vrtin.	191
Slika 9.14: Mulj sadre - prileganje vrednosti, izračunanih s parametri iz vrednotenimi iz edometrske preiskave (črtkano), k merjenim.	194
Slika 9.15: Mulj sadre - prileganje vrednosti, izračunanih s parametri iz vrednotenimi iz preiskave določanja meje krčenja (črtkano), k merjenim.	195
Slika 9.16: Mulj sadre - prileganje vrednosti, izračunanih s parametri iz vrednotenimi iz retencijske krivulje Hyprop 1 (črtkano), k merjenim.	196
Slika 9.17: Primerjava računskih in merjenih vrednosti, določenih za kameno moko.	197
Slika 9.18: Primerjava računskih in merjenih vrednosti, določenih za sivico.	197
Slika 10.1: Shematski prikaz filtracije skozi kolač, prirejeno po Holdich (2002).	200
Slika 10.2: Shematski prikaz določitve parametrov a in b v enačbi (10.5), prirejeno po Tarleton in Wakeman (2006).	201
Slika 10.3: Grafični prikaz vrednotenja parametrov a in b iz rezultatov poskusne tlačne filtracije suspenzije refula.	203
Slika 10.4: Primerjava rezultatov tlačne filtracije suspenzije refula (levo) in mulja sadre (desno), z izračunanimi vrednostmi s parametri po Preglednicah 10.3 in 10.5.	205
Slika 10.5: Izračun formiranja filtrskega kolača refula (levo) in sadre (desno).	206
Slika 10.6: Izračunan volumen filtrata iztisnjenega iz refula v odvisnosti od upornosti filtra.	207
Slika 10.7: Izračunan volumen filtrata iztisnjenega iz sadre v odvisnosti od upornosti filtra.	207
Slika 10.8: Izračunan volumen filtrata iztisnjenega iz refula v odvisnosti od upornosti kolača.	208
Slika 10.9: Izračunan volumen filtrata iztisnjenega iz sadre v odvisnosti od upornosti kolača.	208
Slika 10.10: Izračunana debelina kolača v odvisnosti od upornosti kolača.	208
Slika 11.1: Količnik por refula pri t.i. nični efektivni napetosti.	211
Slika 11.2: Plaz Kattmarka 2009; tiksotropen material »quick clay« (Helle et al., 2016).	212

Slika 11.3: Določanje parametrov $C\alpha e$ in τ_c za prekonsolidirano sadro.	213
Slika 11.4: Izhlapevanje v različnih raztopinah kot % izgubljene vode v odvisnosti od časa.	214
Slika 11.5: Tikotropija mulja sadre.	215
Slika 11.6: Upad τ v različno vlažnih preizkušancih mulja sadre.	215
Slika 11.7: Časovni prirast tlačne trdnosti mešanic refula in 10 m% MULEXa .	216
Slika 11.8: Primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za klasičen test v edometru.	217
Slika 11.9: Računska vlaga po globini, za čas mirovanja 100 dni in 1950 dni, primerjalno z meritvami vlage na vzorcih iz vrtin.	217
Slika 11.10: Primerjava rezultatov tlačne filtracije suspenzije refula (levo) in mulja sadre (desno), z izračunanimi vrednostmi s parametri po Preglednicah 10.3 in 10.5.	218

LIST OF TABLES

Table 2.1: Possible applications for sediments from water environments, adapted after Bailey et al. (2013).	12
Table 2.2: Relative densities of minerals (Fredlund and Rahardjo, 1993).	14
Table 2.3: Soil classification based on grain sizes according to SIST EN ISO 14688.	14
Table 2.4: Properties of ideal packings of uniformly sized spheres (Mitchel and Soga, 2005).	19
Table 2.5: Basic rheological models.	34
Table 2.6: Some others rheological models (Barnes et al., 1989; Jeong, 2006).	36
Table 2.7: Results of pressure filtration of red gypsum slurry (Petkovšek, 2009).	50
Table 2.8: Results of pressure filtration of dredged marine sediment suspension (Kemijski inštitut).	50
Table 3.1: Physical properties of marine clay inside the Port of Koper (Logar, 2010a).	53
Table 3.2: Results of chemical analysis of the in situ and dredged marine sediment from the Port of Koper.	55
Table 3.3: Results of chemical analysis of eluates from in situ and dredged marine sediment from the Port of Koper.	56
Table 3.4: Typical physical properties of the red gypsum filter cake (Petkovšek, 2014).	58
Table 4.1: Sampling of undisturbed and remolded sediment specimens (Sharma and Singh, 2015).	62
Table 4.2: List of standard laboratory tests.	66
Table 4.3: Spindles and chambers used in the investigations with rheometer DV3T HB.	71
Table 5.1: Mineral composition of dredged marine sediment and red gypsum mud.	78
Table 5.2: Mineral phases in in situ and dredged marine sediment.	79
Table 5.3: Index parameters of dredged marine sediment at natural salt content and red gypsum mud.	85
Table 5.4: The influence of pore water salinity on index properties of marine sediments and bentonite (Smolar, 2015).	86
Table 5.5: Parameters of Brooks and Corey function for salty and washed dredged marine sediment.	92
Table 5.6: Explanation of numbers and values on classification charts (Figures 5.42 to 5.44).	108
Table 6.1: Water content of red gypsum mud specimens before and after the investigation and conditions during the test of shear creep.	118
Table 6.2: Combinations of rheometers, spindles and chambers used in the investigations of rheological properties of bentonite suspension and tests results (Bingham model).	124
Table 6.3: Combinations of rheometers, spindles and chambers, used in the investigation of rheological properties of dredged marine sediment.	126
Table 6.4: Properties of dredged marine sediment specimens for rheological investigations.	126
Table 6.5: Rheological parameters of dredged marine sediment, τ_y (Pa), η_p (mPa·s) (Bingham model).	127
Table 6.6: Rheological parameters of red gypsum mud (Bingham model); τ_y (Pa), η_p (mPa·s).	136
Table 7.1: List of mixtures of dredged marine sediment with binders.	145
Table 7.2: Compressive strength of 7 days aged specimens, prepared from different mixtures.	152

Table 7.3: List of specimens for mineralogical analysis.	153
Table 8.1: Material parameters for the description of consolidation characteristics of dredged marine sediment.	168
Table 8.2: Material parameters for the description of deformational characteristics of red gypsum mud from the accumulation (TJ1 in TJ4) and under the dry embankment (IN-1/15).	169
Table 8.3: Material parameters of dredged marine sediment, used in SSC model (Plaxis).	173
Table 8.4: Material parameters of red gypsum mud used in SSC model (Plaxis).	175
Table 8.5: Parameter $C_{\alpha e}$ for each loading stage (used in calculations).	176
Table 9.1: Material parameters in 1D model calculations.	185
Table 9.2: Material parameters of dredged marine sediment.	185
Table 9.3: Material parameters of red gypsum mud.	192
Table 10.1: Filter cake resistance α (Leu, 1986).	201
Table 10.2: Results of the trial filtration of dredged marine sediment suspension (Kemijski inštitut).	202
Table 10.3: Material and technological parameters, used in the calculations of the pressure filtration of dredged marine sediment suspension.	203
Table 10.4: Technological parameters of trial pressure filtration and water content of red gypsum filter cake (Petkovšek, 2009).	204
Table 10.5: Material and technological parameters, used in the calculations of the pressure filtration of red gypsum mud suspension.	204
Table 10.6: Material parameters of mud used in the calculations of parameter α .	209
Table 10.7: Dredged marine sediment filter cake – calculation from oedometer tests.	209
Table 10.8: Red gypsum filter cake – calculation from oedometer tests.	209

LIST OF FIGURES

Figure 1.1: Reservoir No. 10 and the red flood caused by the breach in the NW corner, Ajka, Hungary (Satellite imaging corporation, 2010).	2
Figure 1.2: Aerial view of the Stava Valley before and after the passage of mudflow triggered by the Prestavel tailings dam breach (Petkovšek and Pulko (2015) after WISE Uranium Project (2009)).	3
Figure 2.1: Phase diagram of partially saturated soil.	17
Figure 2.2: Schematic view on loose (left) and dense (right) soil structure (Mitchel and Soga, 2005).	19
Figure 2.3: Models of regular packing of equal spheres (Mitchel and Soga, 2005; Petkovšek, 2006a).	19
Figure 2.4: Schematic diagram of a honeycomb structure fabric (Mitchel and Soga, 2005).	20
Figure 2.5: Scheme of particles arrangement in dispersed and deflocculated structure (Das, 1993; Mitchel and Soga, 2005).	21
Figure 2.6: Modes of particles associations (Das, 1993; Mitchel and Soga, 2005).	21
Figure 2.7: Flocculated particles association (Das, 1993).	21
Figure 2.8: Salt flocculated structure (Das, 1993).	22
Figure 2.9: Arrangements of domains and clusters with silt particles (left) and arrangements of peds and macropore spaces (right) (Das, 1993; Petkovšek, 2006a).	22
Figure 2.10: Structure of marine clay, adapted after Mitchel and Soga (2005).	23
Figure 2.11: SEM photomicrograph of dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).	23
Figure 2.12: Identification of structural collapse in unsaturated soil (Petkovšek, 2006a).	24
Figure 2.13: Properties of a purely thixotropic material (Mitchel and Soga, 2005).	26
Figure 2.14: Osmotic suction of salt solutions in dependency of concentration.	29
Figure 2.15: Osmotic suction of salt solutions in dependency of electric conductivity.	30
Figure 2.16: The ratio E/E_p as a function of soil water content (left) and soil suction (right) (Maček (2012) after Wilson et al. (1997)).	33
Figure 2.17: Maxwell rheological model.	35
Figure 2.18: Kelvin - Voight rheological model.	35
Figure 2.19: Bingham rheological model.	36
Figure 2.20: Isotache set of lacustrine chalk (Šuklje, 1957).	38
Figure 2.21: System of isochrones (adapted after Bjerrum (1967)) (left) and schematic presentation of the effective creep time determination (right).	38
Figure 2.22: The increase of the parameter τ_c due to creep, schematic view, adapted after Bjerrum (1967).	39
Figure 2.23: Response of clay during the investigation of creep in simple shear apparatus (Meschyan, 1995).	41
Figure 2.24: Rheometers sensor systems: (a) coaxial cylinder, (b) cone – plate and (c) plate – plate (Zupančič-Valant, 2007).	41
Figure 2.25: Schematic view of flow behavior observed in laboratory, adapted after Jeong et al. (2010).	43

Figure 2.26: Principal flow types (Jeong, 2006).	44
Figure 2.27: Geotube, filled with mixture of dredged marine sediment and flocculant (photo: archive KMTAL).	46
Figure 2.28: Selection of binders based on soil index properties (Texas Department of Transportation, 2005).	47
Figure 2.29: Selection of binders based on the grain size distribution of soil (BV Kalk, 2004).	47
Figure 2.30: Model of the cake formation during pressure filtration, adapted after Theliander and Fathi-Najafi (1996). Legend: $\Delta P_{m,i}$ – pressure drop across the filter medium at the time i , $\Delta P_{j,i}$ – pressure drop across the j – layer of the filter cake, at the time i , $\Delta x_{j,i}$ – the thickness of j – layer of the filter cake, formed in the time i .	49
Figure 3.1: Distribution of marine sediments inside the Bay of Koper (Ogorelec et al., 1991).	52
Figure 3.2: Sedimentological cross-section of the Bay of Koper (Ogorelec et al., 1997).	52
Figure 3.3: Piers I and II, built on consolidated dredged marine sediment (Logar, 2010a).	53
Figure 3.4: One of the lagoons with dredged marine sediment (photo: archive KMTAL).	54
Figure 3.5: View on the accumulation of red gypsum mud behind the high embankment Za Travnikom (photo: archive KMTAL).	58
Figure 3.6: Cross-section of the experimental embankment built with red gypsum filter cake with measuring devices (Petkovšek, 2014).	59
Figure 3.7: Cross-section of the lysimeter, built with red gypsum filter cake (Petkovšek, 2014).	60
Figure 3.8: Results of chemical analysis of the water, percolated through lysimeter from red gypsum filter cake, period 2011-2016 (Smolar et al., 2016).	60
Figure 4.1: Schematic cross-section of the accumulation with reful (upper) and accumulation with red gypsum mud (lower) (Smolar, 2015).	63
Figure 4.2: Surface dry crust formed on the few years old lagoon with dredged marine sediment (photo taken in summer 2015) (left) and sampling of intact samples with boreholes (right) (photo: archive KMTAL).	63
Figure 4.3: Situation of accumulation Za Travnikom with locations of field tests and boreholes from which samples for laboratory investigations were obtained. Isolinien shows the bottom of the accumulation before filling started (upper). Red gypsum mud from boreholes stored in PVC hose (length of about 1 m) (lower) (photo: archive KMTAL).	64
Figure 4.4: Piezoball (SLP d.o.o) for the first time used for investigations of deposited dredged sediments in Slovenia (photo: archive KMTAL).	66
Figure 4.5: Large oedometer cell – Rowe cell for consolidation tests and dewatering of sediments (photo: archive KMTAL).	68
Figure 4.6: Hyprop device (Maček, 2012).	69
Figure 4.7: Cross-section of WP4-T dewpoint potentiometer (Maček, 2012).	70
Figure 4.8: DV3T HB rheometer (left), small sample adapter with spindles (middle) and vanes (right) (photo: archive KMTAL).	71

Figure 4.9: ConTec Viscometer 5 (left), outer and inner cylinder (right). The internal surface of the outer cylinder is ribbed. The slippage on the contact of the material and internal surface of the outer cylinder is prevented (photo: archive KMTAL).	72
Figure 4.10: Cyclic simple shear apparatus DTA-136 (upper) and detailed view on the specimen during investigation (lower) (photo: archive KMTAL).	74
Figure 4.11: The predefined shear surface in direct shear apparatus (left) and the specimen, during investigation, in the simple shear apparatus (right).	74
Figure 5.1: SEM photomicrograph of dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).	78
Figure 5.2: XRD pattern of dredged marine sediment.	78
Figure 5.3: SEM photomicrograph of dredged marine sediment with results of EDS analysis – mica.	79
Figure 5.4: SEM photomicrograph of dredged marine sediment with results of EDS analysis – feldspar.	79
Figure 5.5: SEM photomicrograph of dredged marine sediment with results of EDS analysis – framboidal pyrite.	80
Figure 5.6: Natural water content along the depth; dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).	81
Figure 5.7: In-situ dry density along the depth; dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).	81
Figure 5.8: Comparison of water content of red gypsum mud from the accumulation (blue dots) and under the dry embankment (red and green dots).	82
Figure 5.9: Area of grain size distribution of dredged marine sediment and in situ sediment from the Bay of Koper.	82
Figure 5.10: Grain size distribution of red gypsum mud from the accumulation (Figure 4.3, upper).	83
Figure 5.11: The amount of separate fractions in red gypsum mud, along the depth. Borehole TJ-1 (left) and TJ-4 (right).	84
Figure 5.12: Plasticity chart with the investigated sediments properties.	85
Figure 5.13: Normalized values $w_{L, sea\ water}/w_{L, water}$ versus $w_{L, water}$.	87
Figure 5.14: Normalized values $I_{P, sea\ water}/I_{P, water}$ versus $w_{L, water}$.	87
Figure 5.15: Shrinkage curves of dredged marine sediment and red gypsum mud (natural pore fluid).	88
Figure 5.16: Shrinkage cracks in the dry crust of deposited dredged marine sediment, exposed to environmental impacts (photo: archive KMTAL).	88
Figure 5.17: Osmotic suction of pore water from investigated sediments with osmotic suction of standard solutions at different concentrations (source: look chapter 2.6.3).	89
Figure 5.18: Drying of soils in different pore fluids. Initial state (left) and state after 22 days of air drying (right).	90
Figure 5.19: SWRC of deposited dredged marine sediment.	90
Figure 5.20: Relationship between water content, suction, void ratio and degree of saturation, determined on deposited dredged marine sediment.	91

Figure 5.21: Suction versus saturaton for salty and washed dredged marine sediment.	91
Figure 5.22: SWRC of red gypsum mud.	93
Figure 5.23: Osmotic suction versus salt concentration (left) and comparison of osmotic suction of saturated red gypsum mud specimens and pore water from the same mud (right).	93
Figure 5.24: Undrained shear strength of deposited dredged marine sediment (left) and in situ sediment (right).	94
Figure 5.25: Undrained shear strength of the red gypsum mud from the accumulation (blue symbols) and under the dry embankment (green symbols).	95
Figure 5.26: Drained shear strength of dredged and in situ marine sediment (left) and of red gypsum mud (right).	95
Figure 5.27: The influence of shear speed on the shear strength of dredged marine sediment.	96
Figure 5.28: Compression curves of dredged marine sediment (left) and in situ marine sediment (right). Legend: 0-0.2 m depth, $w=43.1\%$ initial water content.	97
Figure 5.29: Zero effective vertical stress void ratio of dredged marine sediment.	97
Figure 5.30: Compression curves of red gypsum mud, void ratio (e) versus effective vertical stress (σ_v').	98
Figure 5.31: Compression curves of red gypsum mud, vertical strain (ε) versus effective vertical stress (σ_v').	99
Figure 5.32: Consolidation of red gypsum mud in oedometer, creep observed during long loading stage 400 kPa (left) and consolidation creep of gypsum in petroleum and water (right) (Petkovšek, 2014).	99
Figure 5.33: Consolidation of red gypsum mud in Rowe oedometer.	100
Figure 5.34: Hydraulic conductivity of dredged and in situ marine sediment.	101
Figure 5.35: Hydraulic conductivity of red gypsum mud from accumulation and under the dry embankment.	101
Figure 5.36: View on red gypsum mud specimens with different hydraulic conductivity.	102
Figure 5.37: In situ undrained shear strength of dredged marine sediment in comparison with results of laboratory tests.	103
Figure 5.38: Raw data of CPTu and DMT in TJ-1 (upper) and TJ-4 (lower).	104
Figure 5.39: Comparison of parameters I_{D_DMT} and I_{D_CPTu} .	105
Figure 5.40: Comparison of parameters K_{D_DMT} and K_{D_CPTu} .	106
Figure 5.41: Comparison of parameters E_{D_DMT} and E_{D_CPTu} .	106
Figure 5.42: Classification chart; link between $Q_{tn}-F_r$ (Robertson, 2009b).	107
Figure 5.43: Classification chart; link between $Q_{tn}-B_q$ (Robertson, 1990).	107
Figure 5.44: Classification of red gypsum mud based on CPTu and DMT.	108
Figure 5.45: Diagram for determination of the rato γ / γ_w from DMT (Marchetti, 1999).	109
Figure 5.46: Comparison of unit weight, determined from CPTu and DMT and measured in the laboratory. Legend: CPTu – calculated from equation 5.13, CPTu corr. in DMT corr. – correction KMTAL, CPTu corr. R – correction after Robertson and Cabal (2010), DMT – determined from Figure 5.45, laboratorij – measured in the laboratory.	109

Figure 5.47: Comparison of effective vertical stress, determined from unit weight from CPTu and DMT and measured in the laboratory. Legend – see Figure 5.46.	110
Figure 5.48: Constrained modulus, calculated from CPTu and DMT and prediction based on laboratory tests. Short lines from the diamond (left and right) shows probable upper and lower limit of the constrained modulus estimated from the laboratory tests.	111
Figure 5.49: Comparison of undrained shear strength, calculated from CPTu, DMT, measured with field vane (FVT) and determined in the laboratory with the fall cone (FC) and laboratory vane (LVT).	113
Figure 5.50: Precision of DMT (left) and CPTu (right) with values measured in red gypsum mud.	114
Figure 6.1: Time dependent increase of shear strain (left) and vertical strain (right) of red gypsum mud specimens.	118
Figure 6.2: Red gypsum mud specimens; shear strain versus vertical strain during shearing (left) and time increase of shear strain rate (right).	119
Figure 6.3: Rheological behavior of Newtonian fluid.	120
Figure 6.4: Bingham rheological model (left) and top view on the coaxial cylinder with specimen (right) (Feys et al., 2013).	121
Figure 6.5: $\tau - \gamma$ diagram (left) and $\eta - \dot{\gamma}$ diagram (right) for honey.	123
Figure 6.6: c_{ur} versus vane rotational speed for bentonite suspension.	124
Figure 6.7: Flow curves of bentonite suspension, determined with two different coaxial cylinder rheometers.	124
Figure 6.8: c_{ur} versus vane rotational speed (left) and increase of shear stress in relation with the revolution of spindle and its rotational speed (right).	125
Figure 6.9: c_{ur} versus water content (left) and c_{ur} and τ_{min} , determined on dredged marine sediment at different water content (right).	125
Figure 6.10: Decrease of τ of remolded dredged marine sediments at different water contents.	126
Figure 6.11: Bingham rheological parameters of dredged marine sediment; τ_y (Pa), η_p (mPa·s), versus water content.	128
Figure 6.12: Flow curves of dredged marine sediment at different water content (S1 to S6), measured with different combinations of rheometers, spindles and chambers (Table 6.3).	128
Figure 6.13: Flow curves of dredged marine sediment at different water content (S1 to S6), measured with CTV5 (upper) and DV3T HB rheometer, by using vane and smooth spindles (middle and bottom).	129
Figure 6.14: Stable hollow formed in specimen S1, during the investigation with smooth spindle.	129
Figure 6.15: $I_L - \tau_y$ relationship, determined on dredged marine sediment and literature data.	130
Figure 6.16: $I_L - \eta_p$ relationship, determined on dredged marine sediment and literature data.	131
Figure 6.17: $\eta_p - \tau_y$ relationship. Values determined on dredged marine sediment and literature data. Black lines show $\eta_p - \tau_y$ relationships for clay rich, silt rich and sand rich materials.	131

Figure 6.18: c_{ur} of red gypsum mud as a function of the vane rotational speed.	132
Figure 6.19: Shear stress curves of red gypsum mud as the function of revolutions and rotational speed.	133
Figure 6.20: c_{ur} versus water content (left) and c_{ur} and τ_{min} versus water content (right) for red gypsum mud.	133
Figure 6.21: Time development of shear stress in red gypsum mud at different water content (constant rotational speed 0.25 RPM).	134
Figure 6.22: Time development of shear stress in specimens of red gypsum mud, consolidated for different period of time (constant rotational speed 0.25 RPM).	135
Figure 6.23: c_{ur} (left upper) and τ_{min} (right upper) of red gypsum mud specimens, consolidated for different period of time and water content at the same time (lower).	135
Figure 6.24: Flow curves of red gypsum mud at different water content (M1 to M3), determined with different combinations of rheometers, spindles and chambers.	137
Figure 6.25: Flow curves of red gypsum mud at different water content (M1 to M3), measured with vanes (left) and smooth spindles (right).	137
Figure 6.26: Results of the investigation of thixotropy of dredged marine sediment.	138
Figure 6.27: Thixotropy of red gypsum mud.	138
Figure 7.1: Selection of binders based on the index properties of soil (Texas Department of Transportation, 2005).	141
Figure 7.2: XRD pattern of class C fly ash (TET).	142
Figure 7.3: SEM photomicrograph of class C fly ash (TET).	142
Figure 7.4: XRD pattern of paper sludge ash.	143
Figure 7.5: SEM photomicrograph of paper sludge ash.	143
Figure 7.6: SEM photomicrograph of amorphous grain, with results of EDS analysis – grain composed of calcium, silicon, aluminium, sodium, potassium, iron and magnesium.	143
Figure 7.7: The increase of compressive strength with time, determined on compacted specimens from alternative materials, used as binder.	144
Figure 7.8: Proctor curve of dredged marine sediment (left) and compressive strength of specimens compacted from the same material, at different water content (right).	145
Figure 7.9: Influence of lime (A) and cement (C) on pH of marine dredged sediment.	146
Figure 7.10: Influence of combined binders (fly ash (EFP) and cement (C) or fly ash and lime (A)), of fly ash and MULEX on pH of marine dredged sediment.	147
Figure 7.11: Total and matric suction of dredged marine sediment.	147
Figure 7.12: Total and matric suction of mixtures.	148
Figure 7.13: Total suction of aged specimens, prepared from two different mixtures.	148
Figure 7.14: Comparison of compression curves determined on dredged marine sediment with and without binders (fresh specimens).	149
Figure 7.15: Compression curves of improved dredged marine sediment (fresh and aged specimens).	149
Figure 7.16: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from desiccated (1) or	

filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of fly ash (EFP) (see Table 7.1).	150
Figure 7.17: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from desiccated (1) or filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of fly ash (EFP) and lime (A) (see Table 7.1).	150
Figure 7.18: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of fly ash (EFP) and cement (C) (see Table 7.1).	151
Figure 7.19: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of MULEX (see Table 7.1).	151
Figure 7.20: Time dependent increase of compressive strength of different mixtures, prepared from dredged marine sediment at comparable water content ($w=44\%-46\%$).	152
Figure 7.21: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-9 and of dredged marine sediment.	153
Figure 7.22: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-9; hydration phase and of dredged marine sediment.	154
Figure 7.23: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-9. Arrows point on interleaving of different structures (needles and plates)	154
Figure 7.24: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-9.	155
Figure 7.25: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-6 and of dredged marine sediment.	155
Figure 7.26: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-6; hydration phase and of dredged marine sediment.	156
Figure 7.27: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-6.	156
Figure 7.28: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-6.	157
Figure 7.29: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-7 and of dredged marine sediment.	158
Figure 7.30: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-7; hydration phase and of dredged marine sediment.	158
Figure 7.31: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-7. Arrows point on interleaving of different structures (needles and plates).	158
Figure 7.32: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-7.	159
Figure 7.33: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-8 and of dredged marine sediment.	160
Figure 7.34: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-8; hydration phase and of dredged marine sediment.	160
Figure 7.35: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-8. Arrows point on interleaving of different structures (needles and plates).	160
Figure 7.36: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-8.	161

Figure 7.37: Section from the XRD patterns of 60 days aged specimens from mixtures (2)-9, (2)-6 in (2)-7.	161
Figure 8.1: Consolidation of dredged marine sediment and red gypsum mud at loading stage 12.5 kPa (normalized lines).	163
Figure 8.2: Standard determination of parameters C_c , C_s , C_{ae} in <i>POP</i> from oedometer test.	164
Figure 8.3: Determination of parameters C_{ae} and τ_c for normally consolidated (upper left) and overconsolidated red gypsum (upper right and lower).	167
Figure 8.4: Parameter C_{ae} versus effective vertical stress for dredged marine sediment.	168
Figure 8.5: Parameter C_{ae} versus effective vertical stress for the material from landslide Stogovce and for sivica.	168
Figure 8.6: Parameter C_{ae} versus effective vertical stress for red gypsum mud from accumulation.	169
Figure 8.7: Parameter C_{ae} , versus effective vertical stress for red gypsum mud under the dry embankment.	170
Figure 8.8: Comparison of compression curves of dredged marine sediment. Calculated values (m) and measured in oedometer (s).	170
Figure 8.9: Comparison of compression curves of red gypsum mud from accumulation. Calculated values (m) and measured in oedometer (s).	171
Figure 8.10: Comparison of compression curves of red gypsum mud under dry embankment. Calculated values (m) and measured in oedometer (s).	171
Figure 8.11: Model geometry in Plaxis.	172
Figure 8.12: Determination of parameter of hydraulic conductivity for dredged marine sediment from measured values.	173
Figure 8.13: Vertical strain versus time at sequential loading stages for dredged marine sediment; upper depth 0-0.2 m, lower 0.2-0.4 m. Solid lines – measured values in oedometer, dashed lines – calculated in Plaxis.	174
Figure 8.14: Calculated (red solid line), corrected calculated (red dot line) and measured (black line) compression curves of dredged marine sediment at the depth of about 0.2-0.4 m.	175
Figure 8.15: Determination of parameter of hydraulic conductivity for red gypsum mud from measured values.	176
Figure 8.16: Red gypsum mud - comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for standard oedometer test.	177
Figure 8.17: Red gypsum mud - comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for creep during long loading stage 400 kPa.	178
Figure 8.18: Red gypsum mud - comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for larger specimens (Rowe oedometer).	178
Figure 8.19: Comparison of measured (solid lines) and calculated (dashed lines) compression curves of red gypsum mud.	179
Figure 9.1: Initial state of specimens, prepared by using different pore fluids.	182
Figure 9.2: Specimens dried for 2 days at room temperature (left) and air dry specimens (right).	182
Figure 9.3: Time dependent transpiration as the % of evaporated water.	183

Figure 9.4: Scheme for calculations by using Crank-Nicolson method for 1 dimensional problem (Maček, 2012).	185
Figure 9.5: Comparison of calculated (dashed line) and measured values. Left consolidation curve, right shrinkage limit.	186
Figure 9.6: Comparison of calculated (dashed line) and measured values. Suction measurements with the simultaneous determination of the density. Right upper – SWRC measured by using Hyprop, red dot in the same figure – Enslin - Neff water adsorption.	187
Figure 9.7: Numerical simulation of the transpiration test in the Hyprop device – comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values. Legend: sp.t., zg.t., see Figure 4.6.	187
Figure 9.8: Calculated soil suction along the depth in Hyprop for different drying times. Depth 0 cm – surface of the specimen and depth 5 cm – bottom of the specimen.	188
Figure 9.9: Meteorological data at the location (ARSO, 2016).	189
Figure 9.10: The influence of osmotic suction on the matric suction in the deposited dredged marine sediment; depth 0.02 m (left) and depth 1.5 m (right).	190
Figure 9.11: Influence of osmotic suction on the water content in deposited dredged marine sediment, at the depth of about 0.02 m (solid lines) and 1.5 m (dashed lines).	190
Figure 9.12: Influence of osmotic suction on the degree of saturation in deposited dredged marine sediment at the depth of about 0.02 m.	190
Figure 9.13: Calculated water content of deposited dredged marine sediment, along the depth for the resting time of 100 days and 1950 days in comparison with measured data.	191
Figure 9.14: Red gypsum mud - comparison of values, calculated from parameters, determined from oedometer test (dashed line) and measured values.	194
Figure 9.15: Red gypsum mud - comparison of values, calculated from parameters, determined from shrinkage limit test (dashed line) and measured values.	195
Figure 9.16: Red gypsum mud - comparison of values, calculated from parameters, determined from SWRC (dashed line) and measured values.	196
Figure 9.17: Comparison of calculated and measured values, determined for stone flour.	197
Figure 9.18: Comparison of calculated and measured values, determined for sivica.	197
Figure 10.1: Schematic presentation of cake filtration, adapted after Holdich (2002).	200
Figure 10.2: Determination of parameters a and b in the equation (10.5), adapted after Tarleton and Wakeman (2006).	201
Figure 10.3: Graphical presentation of values, measured during trial pressure filtration of dredged marine sediment suspension. Determination of parameters a and b .	203
Figure 10.4: Pressure filtration – values calculated by using parameters given in Tables 10.3 and 10.5 (dashed lines) and measured values (dots). Figure left – dredged marine sediment suspension and right – red gypsum mud suspension.	205
Figure 10.5: Calculation of time growth of the filter cake; dredged marine sediment (left) and red gypsum (right).	206
Figure 10.6: Calculated filtrate volume, from dredged marine sediment suspension, versus time and filter resistance.	207

Figure 10.7: Calculated filtrate volume, from red gypsum suspension, versus time and filter resistance.	207
Figure 10.8: Calculated volume of filtrate, from dredged mud suspension, versus time and filter cake resistance.	208
Figure 10.9: Calculated volume of filtrate, from red gypsum mud suspension, versus time and filter cake resistance.	208
Figure 10.10: Calculated height of the filter cake versus filter cake resistance.	208
Figure 11.1: Zero effective vertical stress void ratio of dredged marine sediment.	211
Figure 11.2: Kattmarka landslide 2009, »quick clay« with thixotropic behavior (Helle et al., 2016).	212
Figure 11.3: Determination of parameters $C_{\alpha e}$ and τ_c for overconsolidated red gypsum mud.	213
Figure 11.4: Time dependent transpiration as the % of evaporated water.	214
Figure 11.5: Thixotropy of red gypsum mud.	215
Figure 11.6: Decrease of τ in red gypsum mud at different water content.	215
Figure 11.7: Time dependent increase of compressive strength of mixtures from dredged marine sediment and 10 m% of MULEX.	216
Figure 11.8: Comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for oedometer test.	217
Figure 11.9: Calculated water content along the depth for the resting time 100 days and 1950 days in comparison with measured data.	217
Figure 11.10: Pressure filtration – values calculated by using parameters given in Tables 10.3 and 10.5 (dashed lines) and measured values (dots). Figure left – dredged marine sediment suspension and right – red gypsum mud suspension.	218

SIMBOLI

A	površina filtra
A_p	projekcijska površina
a, b	parametra za opis funkcije vodoprepustnosti nasičene zemljine
C	volumska koncentracija trdnine v kolaču
C_c	indeks stisljivosti; koeficient stiskanja
C_s	koeficient nabrekanja
$C_{\alpha e}$	koeficient sekundarnega stiskanja
c, c'	kohezija
c (filtracija)	koncentracija suspenzije
c_{ms} (filtracija)	masna koncentracija suspenzije
c_u	nedrenirana strižna trdnost
c_{ur}	nedrenirana strižna trdnost pregnetenega vzorca
$E_{D DMT}$	dilatometrski modul
ET	dejanska evapotranspiracija
ET_0	referenčna evapotranspiracija
e	količnik por
e_0, e_{init}	začetni količnik por
G	elastični strižni modul
G_s	relativna gostota zrn
G_0	razbremenilni strižni modul pri p_0
g	težnostni pospešek (9.81 m/s^2)
H_c	debelina filtrskega kolača
h	efektivna dolžina vretena oz. krilne sonde
I_C	indeks konsistence
$I_{D DMT}$	materialni indeks
I_L	indeks tečenja
I_P	indeks plastičnosti
$K_{D DMT}$	indeks horizontalnega tlaka
k	koeficient vodoprepustnosti
M	modul stisljivosti
M_a	nadomestna molska masa
MB, MB_f	metilen modro vrednost
M_w	molska masa vode
m	masa
m_a	masa zraka
m_s	masa suhe zemljine (sedimenta)
m_w	masa vode
N	število obratov na minuto, RPM
N_{ball}	empirični faktor CPT (krogla)
N_{kt}	empirični faktor CPT (konus)
$N_{\Delta u}$	empirični faktor CPT (presežni porni tlaki)

n	poroznost ali delež por
OCR	koeficient predkonsolidacije
POP	prekonsolidacijski tlak
ΔP (ožemanje)	razlika tlaka
p	tlak
p_a	absolutni zračni tlak
p_i	parcialni (delni) tlak plinske komponente v zraku
p_v	parcialni tlak vodne pare v zraku
$p_v(\psi)$	parcialni tlak vodne pare v zraku tik nad zemljino s sukcijsko ψ
p_{vsr}	zasičen parcialni tlak vodne pare v zraku
$p_{v0}, p_{v0}(T)$	zasičen parni tlak pri temperaturi T
p_0	referenčni tlak
Q_{tl}, Q_m	brezdimenzijski normirani odpor konice
q_{bnet}	korrigirana odpornost piezo krogle
q_{cnet}	neto odpor pod konico
R	plinska konstanta (8,31 J/mol/K)
R_c, q_u	enoosna tlačna trdnost
RH	relativna vlaga
R_i	notranji radij
R_m	upor filtrirnega sredstva
R_o	radij zunanjega cilindra
R_p	prehodni radij
r	radij
Se	efektivna stopnja zasičenosti
S_G (tikotropija)	trdnost v pregnetenem stanju
S_M (tikotropija)	trdnost v stanju mirovanja
Sr	stopnja zasičenosti
Sr_r	stopnja zasičenosti pri rezidualni vlagi
Sr_s	stopnja zasičenosti zasičene zemljine
s	sukcija
T	temperatura
T (reologija)	navor
t	čas
u	porni tlak
u_0	hidrostatski tlak na globini z
u_2	merjeni tlak tik nad konico
V	volumen zemljine
V (ožemanje)	volumen filtrata
V_a	volumen zraka
V_s	volumen zrn zemljine
V_v	volumen por
V_w	volumen vode
W	teža

w	gravimetrična vlaga
w_A	vodovpojnost
w_L	meja židkosti
w_{opt}	optimalna vlaga
w_P	meja plastičnosti
w_s	meja krčenja
w_0	naravna vlaga (gravimetrična)
Z	absolutna kota v m.n.m.
z	globina (v metrih)
α	upornost filtrskega kolača
α_{BC}	oblikovni parameter Brooks in Coreyeve funkcije
γ	prostorninska teža
$\dot{\gamma}$	strižna hitrost
Γ	specifični volumen zemljine na črti kritičnega stanja pri $p'=1$ kPa
ε	deformacija
η	viskoznost
θ	volumetrična vlaga
κ	naklon logaritemske premice razbremenitve in ponovne obremenitve
κ_λ	oblikovni parameter Bishopovega popravka učinkovitih napetosti
λ	naklon logaritemske premice deviške kompresijske krivulje
λ_{BC}	oblikovni parameter Brooksove in Coreyeve funkcije
π	osmotska sukcijska
ρ	gostota
ρ_d	suha gostota
ρ_{dmax}	maksimalna suha gostota
ρ_s	gostota zrn
ρ_w	gostota vode 1.00 t/m^3
σ	totalna napetost
σ'	efektivna napetost
σ_n	normalna napetost
τ	strižna napetost
τ_y	napetost na meji tečenja (Binghamova ali izmerjena s krilno sondo)
φ, φ'	strižni kot
ψ	totalna (celotna) sukcijska oz. totalni potencial
ψ_m	matrična sukcijska oz. matrični potencial
ω_0	kotna hitrost
$\omega(r)$	razporeditev kotne hitrosti po striženem radiju

OKRAJŠAVE

ARRS	Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS
ARSO	Agencija RS za okolje
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEC	kationska izmenjalna kapaciteta
CPT, CPTu	konusni penetrometer
CTV 5	ConTec Viscometer 5
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMT	ploskovni dilatometer
DV3T HB	oznaka reometra (proizvajalec Brookfield)
EDS	elektronska disperzna spektroskopija
EF pepel	elektrofiltrski pepel
TET	Termoelektrarna Trbovlje
FVT	terenska krilna sonda (field vane test)
gap	razdalja med notranjim in zunanjim valjem
HE	hidroelektrarna
HI	horizontalni inklinometer
ISO	International Organization for Standardization
m.n.m.	metrov nad morjem
PEHD	polyethylene high-density
RPM	obrati na minuto
RS	Republika Slovenija
PVC	polivinil klorid
SEM	vrstična elektronska mikroskopija
SIST	slovenski inštitut za standardizacijo
SSA	specifična površina zrn
SSC	Soft soil creep (model za opis lezenja)
STS	Slovensko tehnično soglasje
TDR	merilnik vlage
TJ 1, TJ 4, IN-1/15	oznaka vrtine
TSS	totalni suspendirani sediment
UL FGG	Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
USCS	Unified Soil Classification System, sistem klasifikacije
VI	vertikalni inklinometer
XRD	praškovna rentgenska difrakcija
ZAG	Zavod za gradbeništvo
ZZV	Zavod za zdravstveno varstvo

1 UVOD

1.1 Ozadje naloge in opredelitev znanstvenega problema

S terminom sedimenti iz vodnih okolij označujemo sedimente, ki se kopičijo v vodnih zadrževalnikih in plovnih poteh na kopnem in v morju. Za vzdrževanje funkcionalnosti in obratovalne varnosti teh objektov je potrebno nakopičene sedimente redno odstranjevati. Premoščanje izkopanih mas lahko poteka znotraj vodnega okolja, na primer z ustvarjanjem umetnih otokov, še pogosteje pa se izkopani sedimenti transportirajo na kopno, kjer se začasno skladiščijo, ožemajo, stabilizirajo, oblikujejo v opeko, predelujejo v bloke za erozijsko zaščito obal in/ali druge gradbene proizvode, kot je na primer kameni agregat.

Pri načrtovanju podvodnih izkopov v vodnem okolju nakopičenih sedimentov je potrebno odgovoriti na vrsto vprašanj, ki se navezujejo na kemično sestavo sedimentov in njihove škodljive vplive na okolje, tehnologijo podvodnega izkopa in transporta, zagotavljanje zadostnih začasnih in trajnih odlagalnih volumnov, dimenzioniranje zadrževalnih pregrad in na končne postopke ravnanja z njimi. Temeljno vprašanje pa je vselej in na različnih lokacijah podobno: »kam in kako« z njimi?

Angleški izraz za sedimente, izkopane pod vodo je *dredged sediments* in izvira iz besede *dredger*, ki pomeni *plovni bager*. V slovenščini nimamo splošno uveljavljenega ekvivalentnega izraza. V Luki Koper za pod vodo izkopane in na kopnem skladiščene sedimente uporabljajo termin *reful*, v drugih vodnih okoljih je za drobnozrnate sedimente v rabi termin *mulj*, za grobozrnate pa prod in pesek.

Postopki izvajanja in obseg kemijskih analiz, potrebnih za ocenjevanje potencialnih škodljivih vplivov sedimentov na okolje so postopkovno in zakonodajno dobro definirani in se tudi redno izvajajo, saj brez njih ni moč pridobiti ustreznih okoljskih dovoljenj za izkop in odlaganje. Nasprotno pa so postopki za določanje fizikalno mehanskih in reoloških lastnosti, ki so ključnega pomena za načrtovanje tehnologij izkopa, transporta in skladiščenja, zelo slabo definirani in se pogosto omejujejo zgolj na določitev zrnastostne sestave. Zato ni naključje, da se pri številnih podvodnih izkopih, tudi na najbolj zahtevnih objektih, kot sta npr. akumulacija za HE Moste na zgornji Savi ali akumulacija Za Travnikom, zalomi, saj izbrana tehnologija izkopavanja ne deluje, odlagalni volumni so poddimenzionirani, trdnost skladiščene mulja je nižja od projektno predvidene ipd.

Po zrnastostni sestavi so naravnim muljem primerljivi industrijski mulji in mulji, ki nastajajo pri rudarskih dejavnostih. Ti so po izvoru kemične oborine in usedline (npr. kemične sadre, ki nastajajo pri nevtralizaciji odpadne žveplene kisline, netopni ostanki kislinskih razklopov rud in druge), z vodo odprani mineralni delci zemljin, (npr. mulji iz predelave kamenega agregata v gramoznih separacijah, mulji, nastali pri rezanju kamna v kamnoseških obratih) ali kombinacije le teh (npr. vrtalne izplake).

Splošno ime za objekte, v katerih se industrijski mulji in mulji iz rudarske dejavnosti odlagajo je v angleščini *milltailings*. Tako je tudi terminološko poudarjena razlika glede na objekte / *jalovišča* (angl. *mine waste pile*), v katere se odlaga izkopna jalovina. Ekvivalentnih izrazov v slovenščini nimamo. V rudarstvu se za objekte, v katerih se odlagajo mulji iz predelave rud, najpogosteje uporablja izraz

jalovišče, z dodatkom hidrometalurško, s čimer se le to ločuje od jalovišč rudarske jalovine, na katerih se odlagajo trdni izkopni materiali, ki zaradi nizke vsebnosti rude niso bili podvrženi industrijskim procesom predelave. Objekti za odlaganje vrtnih izplak so v slovenskem izrazoslovju *izplačne jame*, akumulacije za odlaganje muljev pa kar *akumulacije oz. zadrževalniki* mulja oz. industrijske gošče.

Po podatkih Tailsafe je statistična verjetnost porušitve zadrževalnikov industrijskih muljev 10 krat večja od verjetnosti porušitve vodnih zadrževalnikov (Engels et al., 2004; Petkovšek in Pulko, 2015). Okoljske posledice takih porušitev so neizmerljive. Po statističnih kazalnikih, se letno zgodi na svetu dve do pet porušitev zadrževalnikov muljev (Davies, 2002; Petkovšek in Pulko, 2015), ki imajo značaj katastrofalnih razsežnosti (Slika 1.1 in 1.2).



Slika 1.1: Rezervoar št. 10 in tok rdeče sadre zaradi porušitve SZ dela, Ajka, Madžarska (Satelite imaging corporation, 2010).

Figure 1.1: Reservoir No. 10 and the red flood caused by the breach in the NW corner, Ajka, Hungary (Satellite imaging corporation, 2010).

Osnovne fizikalne lastnosti muljev običajno opisujemo s kazalniki, ki jih uporabljamo za identifikacijo zemljin (npr. vlažnost, zrnastostna sestava, meja židkosti, indeks plastičnosti, gostota, specifična površina zrn). Ti kazalniki, z vidika absolutnih vrednosti in njihovih vplivov na mehanske lastnosti, pri muljih nimajo nujno enakovrednega pomena, kot pri zemljinah. Pri raziskovanju trdnostnih in deformacijskih lastnosti in napovedovanju dolgoročnega obnašanja muljev, klasične geomehanske preiskave, razvite za preiskovanje zemljin, pogosto odpovedo.

Pri preiskovanju zemljin in večine ostalih geoloških materialov običajno privzamemo, da so se že uravnotežili z okoljem in jih obravnavamo kot kemično in mineraloško inertne. Nasprotno od zemljin so sedimenti iz vodnih okolij "mladi" materiali. Njihove lastnosti so zelo odvisne od velikosti in oblike zrn, sestave porne vode, naboja na površini zrn, prisotnih koloidov in ostankov flokulantov.



Slika 1.2: Pogled na dolino Stava pred in po blatnem toku zaradi porušitve jalovinskih pregrad Prestavel (Petkovšek in Pulko (2015) po WISE Uranium Project (2009)).

Figure 1.2: Aerial view of the Stava Valley before and after the passage of mudflow triggered by the Prestavel tailings dam breach (Petkovšek and Pulko (2015) after WISE Uranium Project (2009)).

V industrijskih muljih so pogosto prisotni nestabilni ali topni minerali, ki v stiku z geološkim okoljem prehajajo v druge mineralne faze, se raztapljajo v vodi in/ali ponovno kristalizirajo iz zasičenih pornih raztopin. Vse to vpliva na spreminjanje strukture usedline, v kateri so sile, ki izvirajo iz elektro-

kemičnih reakcij, lahko močnejše od sil, ki izvirajo iz gravitacije, zaradi česar lahko klasični modeli, razviti za napovedovanje trdnostnega in deformacijskega obnašanja zemljin, v akumulacijah sedimentov iz vodnih okolij odpovejo.

S problemom ravnanja z mulji se v Sloveniji srečujemo v vseh regijah, na morju in na kopnem, v umetnih ojezeritvah, ustvarjenih za potrebe energetike, zagotavljanje poplavne varnosti in za zadrževanje naravnih in industrijskih voda. Kljub pereči okoljski problematiki, prostorskim omejitvam in težnji k trajnostnemu upravljanju z mulji, se je v temeljne in sistematske raziskave fizikalno mehanskih lastnosti muljev, v Sloveniji razmeroma malo vlagalo. Med novejših raziskovalnih projektov v Sloveniji sodi projekt ARRS, Sedimenti v vodnih okoljih: geokemična in mineraloška karakterizacija, remediacija ter njihova uporabnost kot sekundarna surovina (L1-4311 (B)) in predvsem vlaganja industrije, kot so npr. Cinkarna Celje d.d., Belinka, Luka Koper d.d., v projektne vodene raziskave, ki so osnova za preživetje dejavnosti.

V tej disertaciji bomo podrobno raziskali in analizirali fizikalne, mehanske in reološke lastnosti dveh zelo značilnih sedimentov iz vodnih okolij (v nadaljevanju mulji) in sicer naravni sediment - reful iz Luke Koper (v nadaljevanju reful) in industrijski mulj kemične sadre iz Cinkarne Celje (v nadaljevanju mulj sadre). Oba sedimenta sta skladiščena na kopnem, v umetnih akumulacijah, ustvarjenih za različno visokimi zemljinскими nasipi in hkrati pomenita pomembne omejitve pri načrtovanju bodočega razvoja dejavnosti. Tveganje, ki bi ga porušitev umetnih zadrževalnikov pomenila za okolje, je v primeru mulja sadre neprimerljivo večje kot pri refulu, predvsem zaradi velikih volumnov in hidravlične višine in s tem povezane velikosti depresijskega lijaka, ustvarjenega v akumulaciji.

Za določanje lastnosti refula in mulja sadre bomo uporabili znane in široko uporabljene standardne metode preiskovanja in manj znane ali redko uporabljene metode. Na osnovi analize rezultatov bomo opredelili zanesljivost, natančnost, primerljivost in ponovljivost rezultatov teh metod, pomembnih za prepoznavanje lastnosti muljev. Preverili bomo, ali je pri vrednotenju rezultatov standardnih preiskav razvitih za zemljine, potrebno za mulje vpeljati dodatne korekcijske faktorje. Za oba sedimenta bomo preverili veljavnost znanih materialnih modelov in poudarili pomen ustreznega vrednotenja materialnih parametrov.

1.2 Cilji in hipoteze

Cilji doktorske naloge so:

1. Identificirati postopke za merjenje in opis relevantnih fizikalnih lastnosti muljev.
2. Izmeriti relevantne lastnosti obeh muljev in njihovo homogenost in sledljivost.
3. Izdelati novelo podatkov starih terenskih raziskav in le-te nadgraditi s pridobljenimi podatki s posebnim poudarkom na lastnostih višje ležečih plasti v obstoječih akumulacijah.

4. Na laboratorijskem nivoju izmeriti in izdelati modelno napoved lastnosti sedimenta ob drugačnem ravnanju, kot je v veljavi danes in sicer za primer ožemanja refula v tehnološkem obratu in za primer sušenja sedaj ojezerene površine mulja sadre.
5. Izmeriti reološke lastnosti muljev in jih primerjati s tistimi v projektnih izračunih poplavnega vala. Preveriti veljavnost modelov. Preveriti zveznost odvisnosti najnižjih izmerjenih vrednosti nedrenirane trdnosti z najvišjimi izmerjenimi vrednostmi mejne strižne napetosti in viskoznosti v odvisnosti od vlage.
6. Analizirati najpomembnejše indikatorje obnašanja mulja (vlaga, sukcijska, konsistenčno stanje, viskoznost, koeficienti modelov...) in določiti utež posameznega odločitvenega kriterija (kaj pretehta na določeni lokaciji oz. za določen namen rabe).
7. Raziskati vplive veziv na trdnost stabilizacijskih mešanice z refulom in oceniti polja uporabnosti.
8. Podati rezultate v vsebinsko zaokroženih celotah.
9. Identificirati področja nadaljnega raziskovanja, kot se pokažejo za smiselna.

Hipoteze:

Hipoteza 1: Z ožemanjem je možno reful iz Luke Koper osušiti do takšne vlage, da za odlaganje ne bo potrebna gradnja bazenov, začasno odlaganje pa bo možno tudi v večje višine. Ožemanje ima prednost pred sušenjem, saj pri ožemanju ne narašča količina soli v mulju.

Hipoteza 2: Cement in apno, ki se uporabljata kot klasični vezivi lahko ekvivalentno nadomestimo z alternativnimi vezivi kot sta papirniški in elektrofiltrski pepel. S količinami dodanega veziva lahko narekujemo trdnostne in deformacijske lastnosti mešanice refula in veziva.

Hipoteza 3: Površinske plasti mulja sadre, odloženega v akumulaciji, bi se hitreje zgoščale in konsolidirale, če ne bi bile ojezerene.

Hipoteza 4: Mulji sadre so tiksotropni. Tiksotropno obnašanje je močno odvisno od vlage. Z merjenjem in modeliranjem reoloških parametrov lahko identificiramo kritične meje suhe gostote, pod katero se navidezno strukturirane sadre lahko utekočinijo. Laboratorijsko izmerjene podatke bomo primerjali s podatki o lastnostih odloženih plasti v akumulaciji in identificirali globine, do katerih lahko pride do utekočinjenja.

1.3 Metodologija dela

Zastavljene cilje in postavljene hipoteze bomo poskušali doseči in preveriti z geomehanskimi terenskimi in laboratorijskimi preiskavami, z mineraloškim analizami, s preiskavami stabiliziranih vzorcev refula in z reološkimi preiskavami. Za ključne parametre bomo preverili veljavnost klasičnih modelov in jih po potrebi dopolnili z ugotovitvami lastnih raziskav.

1.4 Struktura naloge

Nalogo smo razdelili na 14 samostojnih, a vsebinsko povezanih poglavij.

- V poglavju 2 je podana osnovna terminološka opredelitev obravnavanega področja, opisano je formiranje strukture sedimenta in pojavi, vezani na strukturo. Zgoščeno so povzeti kazalniki in vplivi, ki smo jih tekom raziskav prepoznali kot merodajne, za vrednotenje lastnosti obravnavanih sedimentov. Predstavljeno je teoretično ozadje reologije sedimentov, s poudarkom na konsolidacijskem lezenju, strižnem lezenju, viskoznosti in napetosti na meji tečenja. Napetost na meji tečenja je podrobneje opredeljena z vidika geotehničnega parametra nedrenirana strižna trdnost in preko empiričnih zvez korelirana z odpornostjo sedimenta na erozijo in resuspendiranjem (angl. *bed shear stress*). Predstavljena sta dva vidika možnosti izboljšanja geomehanskih lastnosti sedimentov: izboljšanje z dodajanjem anorganskih veziv in izboljšanje zaradi znižanja vsebnosti vlage.
- V poglavju 3 je podan izvor muljev v raziskavi in pregled že izvedenih raziskav na teh muljih.
- V poglavju 4 je predstavljen način odvzema vzorcev, opisani so postopki terenskih in nestandardnih laboratorijskih preiskav.
- V poglavju 5 so predstavljeni rezultati eksperimentov. Ločeno so obravnavani indeksni kazalniki lastnosti in fizikalno mehanske lastnosti preiskanih muljev. Poseben poudarek je na prepoznavanju vplivov soli v porni vodi refula na velikost indeksnih kazalnikov. Rezultati preiskav so interpretirani v luči posebnosti preiskovanih muljev, ki so jasno izpostavljene. Za vrednotenje terenskih preiskav mulja sadre, so na podlagi rezultatov laboratorijskih raziskav, podane korekcije veljavnih semiempiričnih korelacij.
- V poglavju 6 so primerjalno, za različna razmerja strižne napetosti in efektivne vertikalne napetosti, izvrednoteni rezultati preiskav strižnega lezenja v enostavnem cikličnem strižnem aparatu. Podano je teoretično ozadje vrednotenja rezultatov meritev s koaksialnimi valjastimi reometri, z uporabo Binghamovega modela. Poudarjen je pomen t.i. mrtvega toka, ki smo ga prepoznali pri preiskovanju refula. Za reful je analizirana primerljivost rezultatov meritev (tokovnih krivulj) z dvema koaksialnima valjastima reometroma, v katerih je volumen preiskovanega vzorca različen, uporabljeni merilni senzorji pa so različnih geometrij. Posebej smo izpostavili izrazit upad nedrenirane strižne trdnosti mulja sadre, ki se zgodi tako v pregnetenem stanju, kot tudi po daljšem mirovanju. Prepoznali smo tiksotropno obnašanje mulja sadre.
- V poglavju 7 so analizirane tehnološke možnosti izboljšanja refula z anorganskimi vezivi. Že v začetni fazi raziskav smo ugotovili, da bi bili dodatki veziv k naravno vlažnemu refulu previsoki, kar je neugodno z vidika volumnov, tehnologij vmešavanja in cene. Mešanice smo zato pripravili iz delno osušenega in ožetega refula. Preiskovali smo časovni vpliv dodatkov veziv na sukcijsko, deformabilnost in tlačno trdnost. Rezultate smo dopolnili z mineraloškim analizami, ki so pokazale rast mineralnih faz, kot posledico hidratacije veziv.
- V poglavju 8 je podan modelni opis konsolidacijskega lezenja. Izrazito konsolidacijsko lezenje mulja sadre smo prepoznali z laboratorijskimi preiskavami stisljivosti. Ugotovili smo, da je pri vrednotenju materialnih parametrov, ključno upoštevanje »akumulacije«

lezenja oz. zgodovine vzorca. Iz laboratorijskih preiskav smo ovrednotili vse potrebne materialne parametre Soft soil creep modela. Njihovo ustreznost smo preverili s povratnimi izračuni s klasičnimi geomehanskimi zvezami in z 1D modelnimi izračuni konsolidacije v programu Plaxis. Ujemanje računskih in merjenih vrednosti je zadovoljivo, zato bodo materialni parametri, določeni v tej nalogi, lahko uporabljeni v izračunih deformacij deponije sadre Za Travnikom.

- V poglavju 9 smo z 1D modelom, ki ga je v doktorski nalogi, za račun sušenja plazine iz plazu Slano blato, razvil Maček (2012), poskušali izračunati sušenje refula v akumulacijah in mulja sadre, če ta ne bi bil ojezerjen. Ugotovili smo, da za mulj sadre, iz laboratorijskih raziskav, ne moremo določiti enovitih materialnih parametrov, zato izračuna nismo izvajali. Za reful smo pokazali, da so v nekem času sušenja, računske vrednosti, primerljive merjenim v laboratoriju, dolgoročno pa modelni izračun preceni vplive sušenja. V 1D modelu ne moremo upoštevati stranskih vtokov vode, ki napajajo razpoke in vlaženja refula preko sten razpok. Ugotovili pa smo, da bi se reful hitreje in bolj enakomerno sušil, če površina ne bi imela konkavne oblike, zaradi katere je del površine stalno pod vodnim pokrovom. S tem bi preprečili tudi stranske vtoke oz. močenje po razpokah.
- V poglavju 10 smo z osnovno filtracijsko enačbo opisali poskusno ožemanje suspenzije refula v laboratoriju in mulja sadre na dejanskih filtrskih stiskalnicah. Ugotovili smo, da je ujemanje računskih in merjenih vrednosti dobro, kar pomeni, da smo ustrezno določili tako tehnološke pogoje ožemanja, kot tudi materialne parametre suspenzije in kolača. Ugotovili smo, da je tlačna filtracija suspenzije refula manj učinkovita kot za mulj sadre. Pokazali smo tudi, da lahko ožemanje zadovoljivo opišemo z edometriko preiskavo.
- V poglavju 11 smo v razpravi izpostavili najpomembnejše ugotovitve, do katerih smo prišli v sklopu naloge.
- V poglavju 12 smo strnili zaključke, napravili smo evalvacijo hipotez in ovrednotili rezultate v luči prispevka naloge k znanosti. Podali smo tudi smernice za nadaljnje delo.
- V poglavju 13 je zgoščeno povzeta vsebina naloge v slovenskem, v poglavju 14 pa v angleškem jeziku.

2 SEDIMENTACIJA, MEHANIZMI IN OPIS OBNAŠANJA SEDIMENTOV

Sedimenti iz vodnih okolij predstavljajo mejno področje obravnave zemljin, ki kar kliče po celostni obravnavi fizikalnih, geotehničnih, okoljskih in mikrobioloških lastnosti (Mehta, 1986; Winterwerp in van Kesteren, 2004; Sharma in Singh, 2015). To področje je hkrati antipod drugemu mejnemu področju, to so visoko prekonsolidirane zemljine.

Zaradi obsežnosti področja, bomo v tem poglavju zgoščeno povzeli le teme, ki se tesno dotikajo raziskovalnega dela v sklopu naloge in so nujne za razumevanje prepoznanih fenomenov. Izpeljave in zveze, ki smo jih uporabili za vrednotenje rezultatov in modelne opise in razlage, pomembne za razumevanje interpretacije rezultatov, bomo podali ločeno, v ustreznih poglavjih naloge.

2.1 Osnovna terminološka opredelitev

Opredelitev področja sedimentov z enotno strokovno terminologijo je pomembna za natančnost in sledljivost izražanja. V tem poglavju bomo podali osnovne termine, ki pokrivajo področje sedimentov iz vodnih okolij (*muljev*) in načine ravnanja z njimi. Terminom smo dodali pojasnila, za katera menimo, da so nujna za njihovo pravilno opredelitev. Specifične izraze, ki se navezujejo na določen sklop preiskav in preiskane lastnosti, bomo pojasnili v besedilu ustreznih poglavij naloge.

Sedimenti (angl. *sediment*) so usedli nevezani drobcji mineralov in/ali kamnin, trdnih organskih snovi in precipitatu, ki so nastali med sedimentacijskimi procesi (Pleničar et al., 2006).

Transport (angl. *sediment transport*) je gibanje trdnih delcev v mediju (zrak, voda) (Bailey et al., 2013).

Sedimentacija (angl. *sedimentation*) je proces usedanja oz. odlaganja zrn mineralov in kamnin ali trdne organske snovi in precipitatu na kopnem ali v vodi (Pleničar et al., 2006). Odvisna je od lastnosti medija (voda, zrak), v katerem poteka in od lastnosti zrn, ki se sedimentirajo. Zrna, ki potujejo, so lahko velikosti od večjih skal do najmanjših koloidnih delcev. Velikost in oblika zrn sta odvisni od izvora sedimenta (geološkega zaledja, procesa v katerem nastaja), od vrste in dolžine transportne poti in novega sedimentacijskega okolja.

Izvor (angl. *origin*) opisuje prvotno pripadnost ali nastanek oz. okolje nastanka sedimenta. Po izvoru so mulji lahko iz naravnega geološkega zaledja v bližini ali na veliki oddaljenosti (npr. reful v Luki Koper) ali pa nastajajo kot stranski produkt (odpadek) v industrijskih procesih in pri rudarjenju (npr. mulj sadre v Cinkarni Celje).

Lastnosti (angl. *properties, behavior*) sedimentov opisujemo s kazalniki trenutnega stanja sedimenta (npr. naravna vlaga, gostota, okoljski parametri...), z indeksnimi kazalniki, ki opisujejo od trenutnega stanja neodvisne lastnosti (npr. meja židkosti, meja plastičnosti, gostota zrn, zrnava sestava, mineralna sestava...), s fizikalno mehanskimi parametri (npr. trdnost, deformabilnost,...) in s hidravličnimi lastnostmi (npr. koeficient vodoprepustnosti).

Sedimente lahko po zrnovostni sestavi in po indeksnih lastnostih finih zrn (<0.063 mm) razdelimo v dve skupini: *nekoherentne* oz. *nevezljive* (angl. *cohesionless*) in *koherentne* oz. *vezljive* (angl. *cohesive*). V prvo skupino uvrščamo peske in gramoze, v drugo pa glin in melje ter peske in gramoze z zadostnim deležem glinene frakcije (Partheniades, 2009).

Kopičenje ali *akumulacija* (angl. *accumulation*) je posledica odlaganja sedimentov, ki potujejo z medijem (voda, zrak). V celinskih vodah, ponikalnikih in obalnem morju kopičenje sedimentov zmanjšuje pomembne funkcije, ki jih imajo ti objekti in spremljajoča infrastruktura na in ob vodnih telesih. V industriji se mulji običajno kopičijo v namensko ustvarjenih akumulacijah.

Odstranjevanje (angl. *removal*) pravimo postopku čiščenja in premeščanja sedimentov, ki se kopičijo v okoljih, kjer zmanjšujejo zadrževalne volumne, uporabnost in funkcionalno varnost objektov in/ali njihovih delov, in negativno vplivajo na bioto. V praksi obstaja več načinov odstranjevanja sedimentov, med katerimi sta najpogosteje uporabljena izkopavanje (angl. *dredging*) s podvodnim bagrom ali črpanje z uporabo črpalk različnih tipov.

Odlaganje oz. *deponiranje* (angl. *deposition*) je način ravnanja z odstranjenimi sedimenti, ki običajno vsebujejo prebitno količino vode. Izvaja se na način vračanja v vodno telo ali odlaganja na kopnem v zato pripravljene *akumulacije*, *zajezitve*, *zadrževalnike in/ali kasete* oz. *lagune* (v nadaljevanju akumulacije). Odloženi sedimenti so lahko ojezerjeni (t.j. pod vodnim pokrovom), ali brez ojezeritve (suho odlaganje).

Suspenzija (angl. *suspension*) je zmes majhnih trdnih netopnih delcev snovi v tekočini (Pleničar et al., 2006). Delci oz. zrna so običajno bolj ali manj enakomerno razporejena v tekočini, npr. blatni tok. Večji delež v suspenziji predstavlja tekočina. Sedimenti, ki se odstranjujejo s črpanjem, se lahko v obliki suspenzije po ceveh transportirajo v akumulacije. Prav tako so v stanju suspenzije lahko mulji, ki so stranski produkt proizvodnje.

Odstranjevanje vode iz sedimentov (angl. *de-watering of sediments*) je lahko naravno, z gravitacijsko filtracijo, s sušenjem ali umetno, npr. z iztiskanjem porne vode s tlakom (Bailey et al., 2013).

Filtracija (angl. *filtration*) je postopek s katerim ločimo trdnino od tekočine. Eden od postopkov je *ožemanje*, ki se vrši na način iztiskanja presežne porne tekočine. Rezultat je kompakten filtrski kolač (angl. *filter cake*), ki ima bistveno nižjo vlago in višjo gostoto od suspenzije. Za odlaganje so potrebni manjši volumni. Z vidika vgrajevanja in varnosti v odloženem stanju je filtrski kolač bolj obvladljiv kot mulj odložen v obliki suspenzije (Petkovšek, 2009).

Porna tekočina (angl. *pore fluid*) je tekočina, ki se zadržuje v porah materiala. Lahko je čista podzemna voda, ali pa vsebuje raztopljene snovi (najpogosteje soli). V porni vodi mulja sadre so raztopljeni sulfati in druge soli, porna voda refula je slana. Porna tekočina je lahko medij, preko katerega se iz materiala širijo snovi (onesnaževala), ki imajo negativen vpliv na okolje.

Onesnaženost (angl. *contamination*) sedimentov je prisotnost nezaželenih snovi ali delcev v drugi snovi. Gre za nečistost oz. vsebnost okolju in zdravju škodljivih snovi (npr. težkih kovin,...), ki so lahko posledica urbanizacije, vplivov rudarjenja, industrije in/ali drugih vplivov (npr. izbruh vulkana). Sedimenti lahko v prvotnem okolju predstavljajo *ponor* (angl. *sink*), v novem pa *izvor* (angl. *source*) onesnaževal (Sharma in Singh, 2015).

Vplivi na okolje (angl. *environmental impact*) oz. *onesnaževanje* (angl. *pollution*) je skupen izraz za vrednotenje parametrov onesnaževal (toksičnost). Vrednotenje se v Sloveniji izvaja na podlagi rezultatov kemijskih analiz trdne snovi in vodnih izlužkov, pri razmerju tekoče (L) / trdno (S) 10 (Uradni list RS, št. 10/14 in 54/15, 2014).

Karakterizacija (angl. *characterization*) je določitev lastnosti sedimentov, ki zajema identifikacijo fizikalnih, geomehanskih, kemijskih, mineraloških, okoljskih in mikrobioloških parametrov (Sharma in Singh, 2015). Nekatero lastnosti sedimentov lahko določimo tako s terenskimi, kot tudi z laboratorijskimi raziskavami, identifikacija nekaterih lastnosti pa je možna samo v laboratoriju.

Odvzem vzorcev (angl. *sampling*) sedimentov iz vodnih okolij se običajno izvaja na način kot za zemljine (z grabežem, z vrtanjem, z ročnim zajemom, z bagersko žlico...). Vzorcevalno opremo je potrebno prilagoditi specifičnemu stanju sedimentov, hkrati pa zagotoviti, da so odvzeti reprezentativni vzorci, s katerimi lahko opišemo stanje celotnega področja raziskovanega sedimenta. Od kakovosti in reprezentativnosti odvzetih vzorcev je odvisna tudi kakovost rezultatov laboratorijskih raziskav

Vrednotenje rezultatov preiskav (angl. *evaluation of results*) je obdelava rezultatov preiskav na način upoštevanja specifičnih lastnosti in okolja sedimenta.

Koristna uporaba (angl. *beneficial re-use*) je uporaba sedimentov za namene, ki predstavljajo družbeno, in ekonomsko korist in nimajo negativnega vpliva na okolje (Bailey et al., 2013). V Sloveniji je potrebno za koristno rabo materialov pridobiti Slovensko tehnično soglasje (STS). STS se izda na podlagi Tehnične mape, ki vključuje celotno karakterizacijo materiala, ali s postopkom certificiranja (npr. prod).

V nadaljevanju naloge se bomo omejili na sedimente iz vodnih okolij (mulje).

2.2 Sedimenti iz vodnih okolij

Delcem oz. zrnom ali skupkom zrn (flokul), ki potujejo z vodnim tokom in se kopičijo v vodnih telesih, akumulacijah in zadrževalnikih in muljem, ki se v namenske akumulacije kontrolirano odlagajo, s skupnim imenom pravimo *sedimenti iz vodnih okolij* (angl. *sediments from water environments*).

Vsa zrna in skupki se zaradi razlik v mineraloški sestavi, geometriji in velikosti zrn, hitrosti toka in drugih dejavnikov ne usedejo na isto mesto na dnu vodnega telesa, temveč potujejo različno dolgo in

se usedajo različno hitro. Usedanje delcev poteka v vseh vodnih okoljih; v oceanih, rekah, naravnih in umetnih lagunah, ojezeritvah itd.. Sedimenti se med seboj razlikujejo, njihove lastnosti so odvisne od okolja nastanka, geološkega zaledja, značilnosti transportne poti, vnosa onesnaževal, favne in flore in od antropogenih dejavnikov (Kronimus et al., 2004).

Sedimenti iz vodnih okolij so glede na okolje nastanka lahko naravni ali pa nastajajo kot stranski produkt v proizvodnih procesih. Naravne sedimente tvorijo delci, ki nastanejo s preperevanjem in erozijo kamnin ali zemljin, transportirajo se v obliki vodne suspenzije in odlagajo v vodnih zadrževalnikih in plovnih poteh. Predstavljajo pomemben del vodnega okolja in delujejo kot skladišče hranilnih, organskih in anorganskih snovi. Na zrna sedimenta se lahko vežejo onesnaževala, zato porna voda ni nujno čista, zrna pa niso inertna (Fukue et al., 1999; Casado-Martínez et al., 2006).

Zaradi zagotavljanja plovnosti in obratovalne varnosti objektov, v katerih se kopičijo sedimenti, je potrebno njihove presežne količine premeščati znotraj vodnega telesa ali jih odstranjevati in trajno odlagati na kopnem (Sheehan in Harrington, 2012; Bates et al., 2015).

Posebno vrsto sedimentov, ki kot stranski produkt nastajajo v industrijskih procesih (npr. pri predelavi rude, v kemičnih tovarnah pri nevtralizaciji odpadne žveplove (VI) kisline, itd.), predstavljajo t.i. industrijski mulji. V naravnem stanju so suspendirani in se ali odlagajo v vodnem okolju, v za to pripravljene zadrževalnike, ali pa se ožeti v obliki filtrskega kolača kontrolirano vgrajujejo v deponije. Za razumevanje lastnosti in obnašanja je potrebno poznati procese, v katerih so nastali (Petkovšek, 2012, 2014, Petkovšek et al., 2008b, 2012).

V primerjavi z naravnimi sedimenti so industrijski mulji v geotehničnem smislu slabo raziskani, javno dostopnih podatkov pa je malo.

2.2.1 Odločitveni dejavniki ravnanja s sedimenti iz vodnih okolij

Izkopane oz. odstranjene ali kot stranski produkt proizvedene mulje je potrebno odložiti ali ponovno uporabiti kot surovino. Kratkoročno ekonomsko najbolj ugodno ravnanje z mulji iz vodnih zadrževalnikov je vračanje v vodno telo (npr. odlaganje v odprtem morju), ki pa vselej ni možno (Manap in Voulvoulis, 2015). Ko imamo opravka s kontaminiranimi (onesnaženimi) sedimenti, s suspenzijami iz industrije, ali pa odlaganje nazaj v vodno telo zaradi prostorskih omejitev ni možno, je potrebno priskrbeti ustrezne odlagalne volumne na kopnem.

Izbira postopkov ravnanja s sedimenti po odstranjevanju iz prvotnega okolja, se v večini držav izvaja na podlagi kvalitativne ocene (t.i. odločitveno orodje), ki vključuje analize vplivov na okolje, prebivalstvo, zakonodajni in ekonomski vidik (angl. *Multi Criteria Decision Analysis*) (Bailey et al., 2013; Manap in Voulvoulis, 2015) in na podlagi analize življenjskega cikla (angl. *Life Cycle Assessment*).

Ravnanje z odstranjenimi morskimi sedimenti je celostno obravnavano v Smernicah OSPAR konvencije za zaščito morskega okolja (OSPAR, 1998). Podan je pregled celotnega cikla, od odločitve

za črpanje oz. odstranjevanje, karakterizacije izčrpanega sedimenta, analize onesnaženosti, postopkov odvzema vzorcev, ocene možnosti odlaganja in izbire odlagalnih površin do ovrednotenja vplivov odlaganja na okolje in monitoringa.

Sedimenti iz vodnih okolij so lahko tudi alternativni vir. Splošen pregled možnosti rabe, povzet po Bailey et al. (2013), je podan v Preglednici 2.1. V Sloveniji pa so bile v okviru projekta Sedimenti v vodnih okoljih: geokemična in mineraloška karakterizacija, remediacija ter njihova uporabnost kot sekundarna surovina (L1-4311 (B)) analizirane možnosti rabe sedimentov iz vodnih okolij v gradbeništvu. Delni rezultati so objavljeni v Smolar et al. (2009) in Mladenovič et al. (2013, 2014).

Preglednica 2.1: Možnosti rabe sedimentov iz vodnih okolij, povzeto po Bailey et al. (2013).

Table 2.1: Possible applications for sediments from water environments, adapted after Bailey et al. (2013).

Namen rabe	Opis
Ustvarjanje novih uporabnih površin (angl. <i>land reclamation</i>)	Gramoz, pesek in mešanica gramoza in peska. Za oblikovanje parkovnih in rekreacijskih površin so potencialno uporabne glinice in melje.
Zapolnjevanje rudniških udorin, jam in drugih opuščenih rudniških območij (angl. <i>mine rehabilitation</i>)	Vse vrste sedimentov. Upoštevati je potrebno dolgotrajno sušenje meljev in glin.
Zaščita obale / zaščita pred erozijo (angl. <i>shore protection / erosion control</i>)	Sedimenti, ki so ustrezni za inženirske nasipe in oblikovanje brežin. Za sedimente, ki se uporabljajo za nasipavanje in oblikovanje obal so zahteve nižje.
Gradbeni material (angl. <i>construction material</i>)	Sedimenti primerni za uporabo kot material v inženirskih objektih, za proizvodnjo opeke in drugo. Uporabnost se vrednoti glede na namen in okolje rabe. V splošnem so lahko uporabne vse vrste sedimentov. Upoštevati moramo, da se bodo glineni in meljasti sedimenti do vlage 40-60%, pri kateri je že možno kontrolirano mehansko vgrajevanje, naravno sušili več let.
Kmetijstvo in gozdarstvo (angl. <i>agriculture and forestry</i>)	Za nadomestitev erodiranih zgornjih plasti tal, za izravnavo površine ali izboljšanje sestave tal. Melje in glinice – običajno jim je potrebno pred uporabo odstraniti sol.
Obnova habitatov (angl. <i>habitat restoration</i>)	Obnova ali izgradnja zatočišč za ptice, zastiralnih nasipov za opazovanje ptic, otokov za gnezdenje in mokrišč.

Vsi nameni koristne rabe sedimentov iz vodnih okolij zahtevajo poznavanje njihovih lastnosti. Raziskave pa morajo biti usmerjene tako, da odgovorijo na vprašanja vezana na ciljno rabo materiala. Poleg identifikacije fizikalno mehanskih lastnosti je izjemno pomembna tudi okoljska karakterizacija (OSPAR, 1998; Bailey et al., 2013; Manap in Voulvoulis, 2015; Sharma in Singh, 2015).

Kadar za izčrpane sedimente, ki jih ni možno vrniti v vodno okolje in industrijske mulje, v času črpanja oz. proizvodnje ne najdemo uporabne vrednosti in niso prepoznani za uporabo kot alternativni material, se jih odloži na kopnem v zato pripravljene akumulacije (Bailey et al., 2013). Kot smo uvodoma že zapisali, bomo v nalogi obravnavali dva sedimenta, ki sta trajno odložena v akumulacijah na kopnem. V Luki Koper je poznavanje stanja refula v akumulacijah vitalnega pomena za razvoj luške infrastrukture. V Cinkarni Celje pa so vedenja o stanju mulja sadre v akumulaciji bistvena za obstoj tovarne s 1000 zaposlenimi na eni strani ter za obvladovanje tveganj in s tem povezanim vzdrževanjem visoke pregrade na drugi strani.

2.3 Sedimentacija, vplivi na sediment in procesi po sedimentaciji

Procese, ki potekajo med in po sedimentaciji, in vplive, ki jim je izpostavljen sediment, bomo v tem razdelku fenomenološko pojasnili. Za razumevanje dogajanja v sedimentih in trenutnega stanja sedimenta je bistvenega pomena čas, ali kot je zapisal Schmertmann (1991): »*Everything on this earth has at least one thing in common - everything changes with time. All soils age and change.*«

Odlagalno okolje določa fizikalne, kemijske in biološke pogoje, v katerih poteka sedimentacija in konsolidacija. Trdni delci se v vodnem okolju usedajo zaradi gravitacije, hitrost usedanja je odvisna od velikosti in lastnosti delcev. Po končani sedimentaciji se v usedlini oz. sedimentu lahko dogajajo fizikalne, kemične in biološke spremembe (angl. *postdepositional changes*). Zgodijo se, ker mladi sedimenti niso nujno stabilni v novem sedimentacijskem okolju, kjer so izpostavljeni drugačnim temperaturam, tlaku in drugim vplivom (Winterwerp in van Kesteren, 2004; Mitchel in Soga, 2005).

Sedimenti so lahko izpostavljeni sušenju, ki je pri drobnozrnatih sedimentih povezano s krčenjem in nastankom krčitvenih razpok. Sušenje ima v drobnozrnatih vezljivih sedimentih običajno vpliv samo na pripovršinske plasti (Mitchel in Soga, 2005).

Po končani sedimentaciji v usedlini poteka proces konsolidacije zaradi lastne teže, zaradi nadgrajenih plasti, kot posledica sušenja ali znižanja nivoja podzemne vode. Zaradi konsolidacije se sedimentu zviša trdnost in zmanjšata stisljivost in prepustnost. Del deformacij se na dolgi rok izvrši tudi po končani primarni konsolidaciji, v pogojih konstantnih efektivnih vertikalnih napetosti. Sekundarna konsolidacija se vrši na račun viskoznih lastnosti materiala in tako kot primarna konsolidacija, v ustrezno manjšem deležu, doprinese k trdnosti sedimenta (Schmertmann, 1991; Mitchel in Soga, 2005).

Spremembe v sedimentu se lahko vršijo tudi zaradi sprememb v mineralni sestavi. Formirajo se lahko novi minerali (angl. *authigenesis*), zaradi katerih postanejo zrna bolj oglata, zmanjšata se lahko količnik por in prepustnost. Manjši kristali in delci kamnin lahko zrastejo v večja zrna. Zaradi diagenoze (angl. *diagenesis*) se lahko zrnem spremeni tekstura, dogaja se prehajanje mineralnih faz, zaradi temperature, tlaka in časa se lahko formirajo medzrnske vezi. V določenih sedimentih lahko pride tudi do cementacije (angl. *cementation*) (Mitchel in Soga, 2005).

2.4 Sediment – v vodnem okolju dvo fazni sistem

V tem poglavju bomo podali načela za ovrednotenje posameznih faz v sedimentu. Teoretična izhodišča in zveze so v splošnem enake kot za zemljine, zato bomo zaradi sledljivosti uporabili izrazoslovje, simbole in kratice, ki se uporabljajo v geotehniki. Posebej bomo opredelili posebnosti, ki se lahko izrazijo pri sedimentih iz vodnih okolij.

V geotehniki sediment, podobno kot zemljino, na makro nivoju obravnavamo kot homogen zasičen ali nezasičen material. Dejansko (mikro nivo) pa sediment ni homogen, temveč je sestavljen iz treh faz: trdnine (zrn), tekočine in zraka. Tekočina in zrak zapolnjujeta praznine (pore) med zrn.

2.4.1 Trdnina

Trdna faza je t.i. stalna faza v zemljini in tvori ogrodje oz. matrico. Sestavljena je iz mineralnih in organskih delcev, ki so lahko iz ostankov odmrlih rastlin in živali ali iz še živih organizmov, na primer bakterij. Mineralni delci so različnih dimenzij (frakcij), njihova relativna gostota pa je odvisna od mineralne sestave (izvora). Relativne gostote zrn mineralov (G_s), ki so najbolj značilno zastopani v zemljinah in naravnih sedimentih, so skupaj z relativno gostoto sadre, ki prevladuje v mulju sadre, podane v Preglednici 2.2.

Za prepoznavanje lastnosti materiala je pomembna tudi zastopanost posameznih frakcij. Poimenovanje in velikostne razrede zrn smo povzeli po standardu SIST EN ISO 14688 (SIST, 2004) in so podani v Preglednici 2.3. V materialih, kjer med drobnimi zrn prevladujejo minerali glin, je obnašanje ob stiku z vodo odvisno od specifične površine glinenih zrn.

Preglednica 2.2: Relativna gostota zrn mineralov (Fredlund in Rahardjo, 1993).

Table 2.2: Relative densities of minerals (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Mineral	G_s
kremen	2.65
kalcit	2.72
dolomit	2.85
klorit	2.60-2.90
illit	2.60-2.86
kaolinit	2.62-2.66
montmorillonit	2.75-2.78
muskovit	2.76-3.00
sadra	2.31-2.33

Preglednica 2.3: Klasifikacija glede na velikost zrn po SIST EN ISO 14688.

Table 2.3: Soil classification based on grain sizes according to SIST EN ISO 14688.

Zemljina	Velikost zrn (mm)
Kamenje	>63
Debel gramoz	20-63
Srednji gramoz	6.3-20
Droben gramoz	2.0-6.3
Debel pesek	0.2 – 2.0
Droben pesek	0.06 – 0.2
Debel melj	0.02 – 0.06
Droben melj	0.002 – 0.02
Glina	< 0.002

Za zemljine običajno privzemamo, da je trdna faza stabilna in inertna, zato je njen volumen konstanten.

Količina trdnih delcev na enoto volumna zemljine je ob zgornji predpostavki definirana s suho gostoto (ρ_d) (2.1), volumen pa z gostoto zrn (ρ_s) (2.2).

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (2.1)$$

kjer je m_s masa suhe zemljine (sedimenta) in V volumen zemljine.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.2)$$

kjer je V_s volumen zrn zemljine (sedimenta).

Gostoto zrn lahko izrazimo tudi kot relativno gostoto zrn, G_s (Preglednica 2.2), ki je brezdimenzijska količina in jo izračunamo po zvezi (2.3).

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2.3)$$

kjer je ρ_w gostota vode 1.00 t/m^3 .

Kot smo v tem poglavju že zapisali, so sedimenti mladi materiali, v katerih se lahko vršijo spremembe v mineralni sestavi in vsebujejo aktivne minerale in mikrobiološko aktivne organizme. To pomeni, da predpostavka o inertnosti mineralnih faz zanje ni nujno veljavna. Kristalizacijo novih mineralov in prehajanja manj stabilnih mineralnih faz v bolj stabilne, je v slovenskih zemljinah in kamninah, v doktorski disertaciji identificirala Petkovškova (Petkovšek, 2006a).

2.4.2 Tekočina

V inertnih materialih je tekočina v porah običajno čista (inertna) podzemna voda. V sedimentih iz vodnih okolij so lahko v porni tekočini raztopljene različne soli in druge snovi. Porna tekočina v refulu iz Luke Koper je slana, v porni tekočini mulja sadre pa so poleg sadre, raztopljene še druge soli. Velikost električnega naboja na površini mineralov glin se spreminja v odvisnosti od sestave porne tekočine, s katero je zrno glin v kontaktu. Zato je adsorpcijska sposobnost, plastičnost in prepustnost glin za različne porne tekočine različna.

Porna tekočina v materialu vpliva na:

- osmotsko sukcijsko, ki je odvisna od vrste in količine raztopljenih soli,
- efektivno napetostno stanje (sukcija ali presežni porni tlak),
- spremembe v matriksu (mehčanje, utrjevanje, cementacija).

Vpliv temperature in tlaka na gostoto porne tekočine je v geotehničnih izračunih običajno manjši od ostalih vplivov, zato porno tekočino obravnavamo kot nestisljivo. Če se gostota porne tekočine bistveno ne razlikuje od gostote vode, v analizah privzamemo kar gostoto vode 1.0 t/m^3 , sicer pa dejansko izmerjeno vrednost.

Porna tekočina lahko vpliva na indeksne in fizikalno mehanske lastnosti materiala (Torrance, 1984; Barbour in Yang, 1993; Ohtsubo et al., 1996; Sivapullaiah in Savitha, 1999; Sridharan et al., 2002; Di Maio et al., 2004; Geertsema in Torrance, 2005; Yukselen-Aksoy et al., 2008; Ajalloeian et al., 2013; Yan in Chang, 2015, in drugi). Pri izvedbi laboratorijskih preiskav moramo biti zato posebej pazljivi, da ali uporabljamo dejansko porno tekočino, ali posebej opozorimo, da smo jo nadomestili / razredčili z vodo.

2.4.3 Zrak

Porni prostor, ki ni zapolnjen s porno tekočino, zavzema zrak. Zrak je mešanica plinov; ca. 78% dušika, 21% kisika, 1-4% vode in 1% drugih plinov. Po Daltonovem zakonu je absolutni zračni tlak (p_a) enak vsoti parcialnih (delnih) tlakov plinskih komponent v zraku (p_i) (2.4).

$$p_a = \sum_i p_i \quad (2.4)$$

Mešanico idealnih plinov lahko nadomestimo z enofaznim plinom, katerega nadomestna molska masa (M_a) je 29 g/mol. Zrak lahko kot idealni plin opišemo s splošno plinsko enačbo (2.5), iz katere lahko izrazimo gostoto zraka (2.6).

$$p_a \cdot V_a = \frac{m_a}{M_a} \cdot RT \quad (2.5)$$

$$\rho_a = \frac{p_a \cdot M_a}{RT} \quad (2.6)$$

kjer je V_a volumen zraka, m_a masa zraka, R plinska konstanta (8.31 J/mol/K), T absolutna temperatura zraka (K).

Absolutno vlažnost v zraku lahko predstavimo z delnim tlakom vodne pare. Če je višji od zasičenega, pride do pojava kondenzacije, če pa je nižji, voda hlapi. Vsebnost vlage v zraku izrazimo kot relativno vlago RH in jo definiramo z razmerjem delnih tlakov plinskih komponent v zraku (2.7).

$$RH = \frac{p_v}{p_{v0}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

kjer je p_v dejanski delni tlak vodne pare v zraku in p_{v0} zasičen parni tlak pri temperaturi T .

Običajno v geotehničnih izračunih, maso in gostoto zraka zanemarimo. V zasičenih materialih so vse pore zapolnjene s tekočino, zato zraka v porah ni.

2.4.4 Fazna razmerja v sedimentu

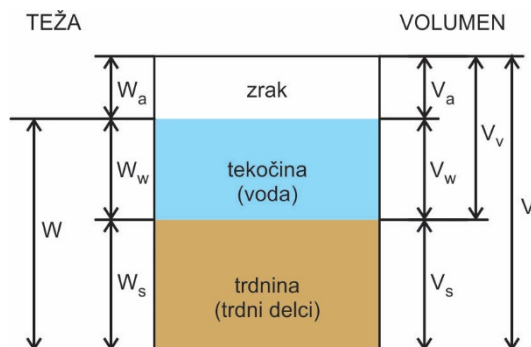
Razmerja med posameznimi fazami (trdnina, voda, zrak), v geotehniko opisujemo z različnimi količinami, katerih raba, terminološka opredelitev in označevanje s simboli in okrajšavami, se razlikuje tako na različnih geografskih, kot tudi strokovnih področjih.

V nadaljevanju bomo v nalogi razmerje med fazami opredelili v luči geotehnike, s termini, simboli in okrajšavami, ki so v splošni rabi v Sloveniji. Shematsko so posamezne faze in simboli, s katerimi jih označujemo in jih bomo uporabili v zvezah, prikazane v faznem diagramu na Sliki 2.1.

Iz teže (W) lahko maso (m) izračunamo po (2.8).

$$m = \frac{W}{g} \quad (2.8)$$

kjer je g težnostni pospešek (9.81 m/s^2).



Slika 2.1: Fazni diagram delno zasičene zemljine.

Figure 2.1: Phase diagram of partially saturated soil.

Gravimetrična vlaga, w (2.9) je razmerje med maso vode (m_w) in maso suhe snovi (m_s).

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.9)$$

Volumetrična vlaga, θ je razmerje med volumnom vode (V_w) in volumnom zemljine (V) in se uporablja predvsem v agronomiji (2.10).

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.10)$$

Količnik por, e

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.11)$$

Zvezi za izračun ρ_s in ρ_d sta podani v poglavju 2.4.1.

Poroznost ali delež por, n

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e} \quad (2.12)$$

Stopnja zasičenosti, S_r (2.13) je parameter, ki pove, kolikšen delež por je zapolnjen z vodo. Sedimenti iz vodnih okolij so običajno 100% zasičeni, kar pomeni, da nimajo por, zapolnjenih z zrakom. Nasprotno so v povsem suhem sedimentu vse pore zapolnjene z zrakom, stopnja saturacije je nič.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.13)$$

Gostota, ρ je definirana kot razmerje med maso in volumnom. Prostorninska teža (γ) je definirana kot razmerje med težo in volumnom. V nadaljevanju naloge bomo uporabljali gostoto (2.14) in suho gostoto (2.15).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.14)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (2.15)$$

2.5 Struktura sedimentov

V geotehniki z enotnim izrazom struktura zemljine opišemo tako usmerjenost in geometrijsko ureditev zrn, kot tudi sile, ki nastopajo med njimi. V tuji literaturi sicer obstaja tudi izraz *soil fabric*, za katerega v slovenskem jeziku nismo našli ustreznega prevoda in se nanaša samo na geometrijsko ureditev zrn, ne pa tudi na sile med zrn. V materialih z večjimi zrn in v nekoherentnih materialih (gramozi in peski), kjer so medzrnske sile zanemarljive, sta oba termina (*soil fabric* in struktura) enakovredna in opisujeta geometrijsko ureditev zrn (Ranjan in Rao, 2007; West, 2010).

V nadaljevanju poglavja bomo uporabljali enoten izraz struktura za nekoherentne in koherentne sedimente in zemljina za vse vrste materialov v geotehniki.

2.5.1 Struktura v nekoherentnih zemljinah

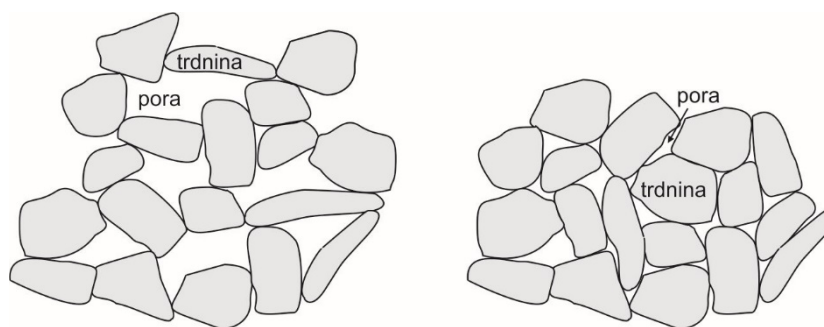
V zemljinah brez kohezije, med katere uvrščamo peske in gramoze, prevladujejo gosta zrna primarnih mineralov, ki so dovolj velika, da jih lahko obravnavamo kot samostojne enote. Zrna vode ne privlačijo, zato so medzrnske sile zanemarljive (Mitchel in Soga, 2005; Petkovšek, 2006a).

Geometrijska ureditev zrn v strukturo je v nekoherentnih materialih posledica sile težnosti. Struktura in delež por v strukturi sta odvisna od zrnastostne sestave, oblike in ureditve zrn (Ranjan in Rao, 2007). V strukturi večzrnatih materialov z zrn različnih velikosti, manjša zrna zapolnjujejo praznine (pore) med večjimi, kar rezultira v višjo gostoto in manjši količnik por kot v enozrnatih materialih (Mitchel in Soga, 2005). Zrna so geometrijsko urejena tako, da so v medsebojnem kontaktu. Od trenja med zrn (na stičnih ploskvah zrn) je odvisna na eni strani razporeditev napetosti v tleh, na drugi pa odpor zemljine na obremenitve (Šuklje, 1967). V zrnati zemljini prevladujeta gravitacijska in kapilarna voda.

V nekoherentnih materialih ločimo tri načine ureditve (pakiranja) zrn: (1) zrnata rahla struktura, (2) zrnata gosta struktura in (3) satasta struktura. Satasta struktura se formira v zemljinah z drobnimi zrn, ki se povezujejo v verige, te pa v satovja (Petkovšek, 2006a).

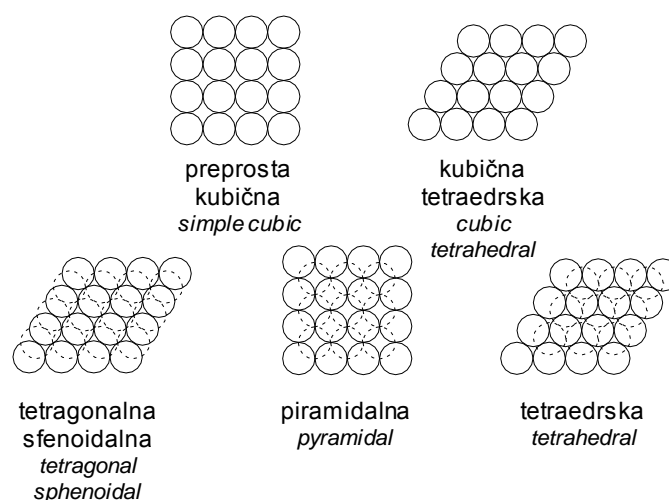
V zemljinah z zrnato strukturo so zrna v medsebojnem stiku in zavzemajo stabilen položaj. Glede na geometrijsko ureditev zrn in delež pornega prostora, lahko strukturo označimo kot rahlo (Slika 2.2, levo) ali gosto (Slika 2.2, desno).

Pakiranje zrn v strukturo je najlažje ponazoriti na idealni enozrnati granulirani zemljini s kroglasto obliko zrn. Zrna se lahko uredijo tako, da zavzamejo več različnih idealnih struktur (geometrijskih ureditev), ki so prikazane na Sliki 2.3 (Deresiewicz, 1958; Mitchel in Soga, 2005). Lastnosti pakiranja idealnih zrn, shematsko prikazanih na Sliki 2.3, so podane v Preglednici 2.4. Vidimo, da se tudi v pakiranjih idealnih zrn količnik por giblje med 0.34 in 0.91.



Slika 2.2: Shematski prikaz rahle (levo) in goste (desno) strukture zemljin (Mitchel in Soga, 2005).

Figure 2.2: Schematic view on loose (left) and dense (right) soil structure (Mitchel and Soga, 2005).



Slika 2.3: Modeli pravilnega pakiranja sferičnih (kroglastih) zrn enakega premera (Mitchel in Soga, 2005; Petkovšek, 2006a).

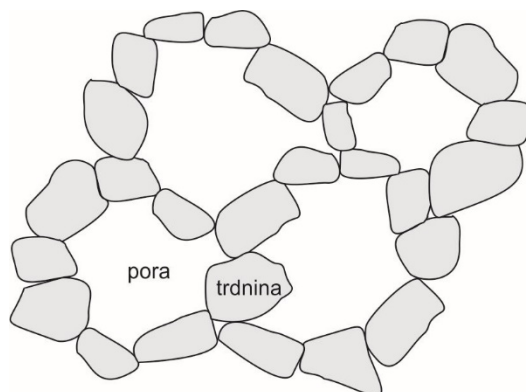
Figure 2.3: Models of regular packing of equal spheres (Mitchel and Soga, 2005; Petkovšek, 2006a).

Preglednica 2.4: Lastnosti idealne strukture sferičnih (kroglastih) zrn enake velikosti (Mitchel in Soga, 2005).

Table 2.4: Properties of ideal packings of uniformly sized spheres (Mitchel and Soga, 2005).

Način pakiranja / struktura	Razdalja med plastmi (r – radij)	Volumen enote	Poroznost (%)	Količnik por
preprosta kubična	$2r$	$8r^3$	47.64	0.91
kubična tetraedrska	$2r$	$4\sqrt{3}r^3$	39.54	0.65
tetragonalna sfenoidalna	$r\sqrt{3}$	$6r^3$	30.19	0.43
piramidalna	$r\sqrt{2}$	$4\sqrt{2}r^3$	25.95	0.34
tetraedrska	$2r\sqrt{2/3}$	$4\sqrt{2}r^3$	25.95	0.34

V drobnih peskih in meljih se zrna povezujejo v verige, te pa naprej v loke in satovja (Slika 2.4). To je meta stabilna struktura, v kateri je količnik por velik. Velike pore težijo k zapiranju in preoblikovanju. Zaradi hipne obremenitve se struktura poruši, kar ima za posledico strukturni kolaps, velike posedke in utekočinjenje (Das, 1993; Mitchel in Soga, 2005).



Slika 2.4: Shema sataste strukture (Mitchel in Soga, 2005).

Figure 2.4: Schematic diagram of a honeycomb structure fabric (Mitchel and Soga, 2005).

2.5.2 *Struktura v koherentnih zemljinah*

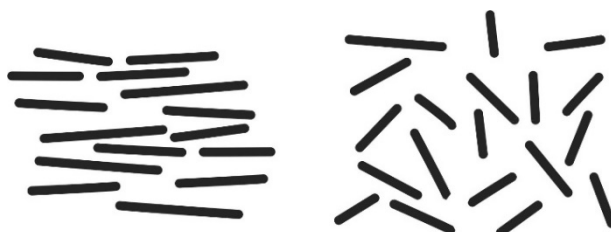
Kohezija je privlak med enakimi molekulami zaradi vodikove vezi. Struktura zemljin s kohezijo je bolj zapletena od strukture zemljin brez kohezije. Glinena frakcija večine zemljin vsebuje minerale glin, ki so zaradi svoje paketne zgradbe sposobni zadrževati velike količine vode. V koherentnih zemljinah tako govorimo o medzrnski in medpaketni porni vodi oz. o makro in mikro strukturi (Petkovšek, 2006a).

Med koherentne ali vezljive zemljine v geotehniki uvrščamo gline. Termin »glin« uporabljamo za: glino – zemljino (več kot 50% utežni delež zrn manjših od 0.063 mm), drobno zrnato mineralno fazo – zrna so manjša od 0.002 mm in pravo glino, ki po svoji mineralni sestavi pripada mineralom glin iz družine filosilikatov ali vodnih silikatov (Petkovšek, 2006a). Velde (1995) je o nastanku glin zapisal: *»The contact of rocks and water produces clays, either at or near the surface of the earth.«*

Za razumevanje osnovne strukture v koherentnih zemljinah, moramo poznati vezi, ki nastopajo med glinenimi zrn v vodni suspenziji. Površina zrn glin je negativno nabita. Električno ravnotežje na površini minerala glin se ustvari z reakcijami med ioni v raztopini in ioni na mejni površini zrna. Za nevtralizacijo tega ravnotežja se blizu površine minerala akumulirajo nasprotni ioni, ki ustvarjajo električno (difuzijsko) dvojno plast. Interakcija med glinenimi zrn poteka preko obroča adsorbirane vode, skozi difuzijski dvojni obroč in včasih z neposrednim stikom med zrn. Zaradi difuzijske dvojne plasti pride, ob primiku dveh zrn glin v suspenziji, do njunega odboja. Hkrati pa na zrna glin deluje privlačna sila, ki je posledica Van der Waals-ovih vezi in je neodvisna od lastnosti porne tekočine. V posebnih primerih so prisotne tudi ionske vezi, ki lahko nastopajo v kaolinitnih glinah z nizkim pH, ko se na površini razvije pozitivni električni naboj (Das, 1993; Petkovšek, 2006a).

Tako odbojne kot tudi privlačne sile se večajo z manjšanjem razdalje med zrn glin, vendar njihov prirast ni enakega velikostnega reda. Ko je prostor med zrn glin dovolj majhen, so privlačne sile močnejše od odbojnih, kar pomeni, da se zrna združujejo (Das, 1993).

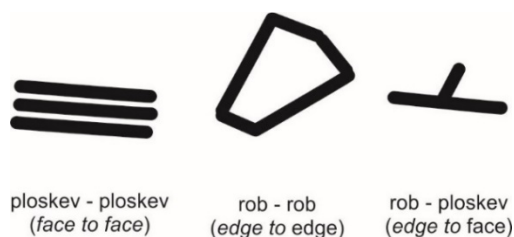
Zrna glinice lahko zavzamejo različne geometrijske ureditve. V suspenzijah, kjer je medzrnska razdalja velika, prevladajo odbojne sile nad privlačnimi, vpliv gravitacije pa je zanemarljiv. Usedanje individualnih zrn lahko opišemo z Brownovim gibanjem molekul. Usedlina je sestavljena iz individualnih usedlih zrn, ki so lahko vzporedno ali povsem naključno usmerjena (Slika 2.5). Takšni strukturi pravimo dispergirana in neflokulentna (angl. *dispersed* and *deflocculated*).



Slika 2.5: Shema ureditve zrn v dispergirani in neflokulentni strukturi (Das, 1993; Mitchel in Soga, 2005).

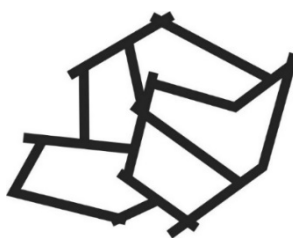
Figure 2.5: Scheme of particles arrangement in dispersed and deflocculated structure (Das, 1993; Mitchel and Soga, 2005).

Če se delci med gibanjem v suspenziji približajo in privlačne sile prevladajo nad odbojnimi, se staknejo. Sosednji delci se lahko drugače držijo zaradi elektrostatičnih privlačnih sil med pozitivno in negativno nabitimi robovi. Stikajo se lahko na načine, ki so shematsko prikazani na Sliki 2.6 in tako tvorijo flokule. Shema flokulentne strukture je prikazana na Sliki 2.7.



Slika 2.6: Načini stikovanja zrn (Das, 1993; Mitchel in Soga, 2005).

Figure 2.6: Modes of particles associations (Das, 1993; Mitchel and Soga, 2005).



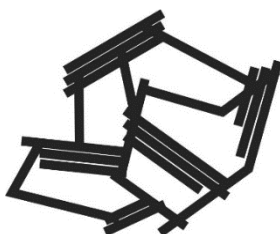
Slika 2.7: Flokulentna struktura (Das, 1993).

Figure 2.7: Flocculated particles association (Das, 1993).

Če v suspenzijo dodamo soli, poskušajo solni ioni razbiti difuzijsko dvojno plast okrog zrn. Zaradi tega se zmanjša odbojna sila med zrn. Zrna se privlačijo, združujejo v skupke (flokule), skupki pa se usedajo. Takšni strukturi pravimo solna flokulentna struktura (Slika 2.8) (Das, 1993).

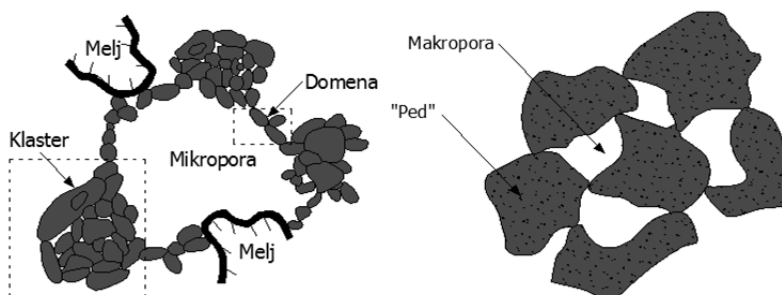
V naravi so čiste gline redke. Vsem zemljinam z deležem zrn manjših od 0.002 mm, večjim od 50%, v geotehniki pravimo gline. Raziskave z elektronskim mikroskopom kažejo, da posamezna zrna težijo k združevanju v t.i. domene, te pa nadalje v grozde. Grozdi se združujejo v še večje grude, ki so vidne s prostim očesom. Shematsko je združevanje zrn na vseh opisanih nivojih, prikazano na Sliki 2.9 (Petkovšek (2006a), prirejeno po Das (1993)). Visoko flokulentne gline, katerih značilnost je visok količnik por, so morske gline. Shematsko je struktura morskih glin prikazana na Sliki 2.10. Sedimenti v sladkovodnih okoljih imajo običajno ureditev zrn med disperzno in flokulentno.

Preiskovan morski sediment – reful z vidika nestabilnosti strukture ni problematičen (Slika 2.11, levo). Nasprotno se v mulju sadre dolga igličasta zrna geometrijsko uredijo v strukturo podobno hiški iz kart (Slika 2.11, desno). V takšni strukturi je porni prostor izjemno velik, vplivi pa zlahka povzročijo medzrnske premike in porušitev strukture (Petkovšek et al., 2012).



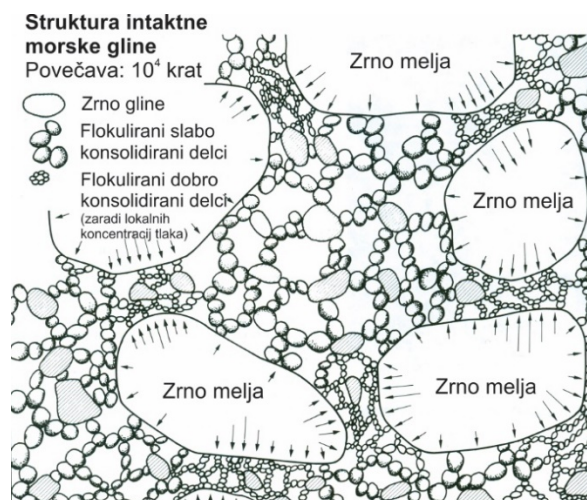
Slika 2.8: Solna flokulentna struktura (Das, 1993).

Figure 2.8: Salt flocculated structure (Das, 1993).



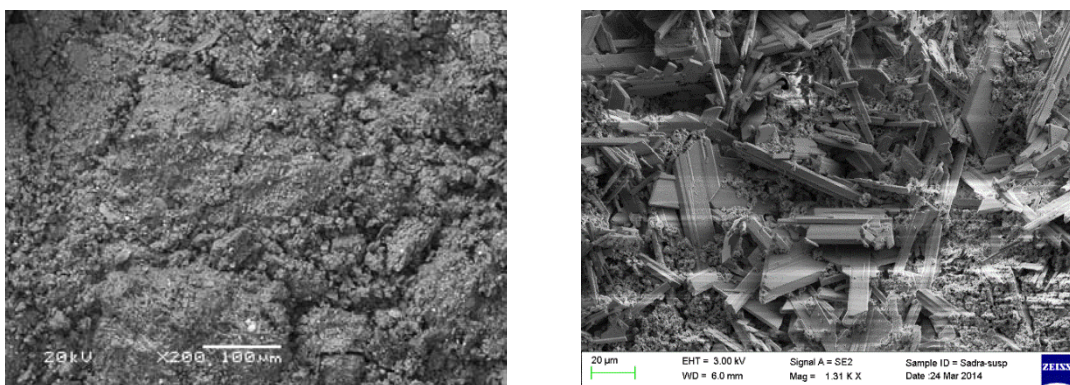
Slika 2.9: Ureditev zrn in skupkov na mikro nivoju (levo) in na makro nivoju (desno) (Das, 1993; Petkovšek, 2006a).

Figure 2.9: Arrangements of domains and clusters with silt particles (left) and arrangements of peds and macropore spaces (right) (Das, 1993; Petkovšek, 2006a).



Slika 2.10: Struktura intaktne morske gline, prirejeno po Mitchel in Soga (2005).

Figure 2.10: Structure of marine clay, adapted after Mitchel and Soga (2005).



Slika 2.11: SEM mikroposnetek refula (levo) in mulja sadre (desno).

Figure 2.11: SEM photomicrograph of dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).

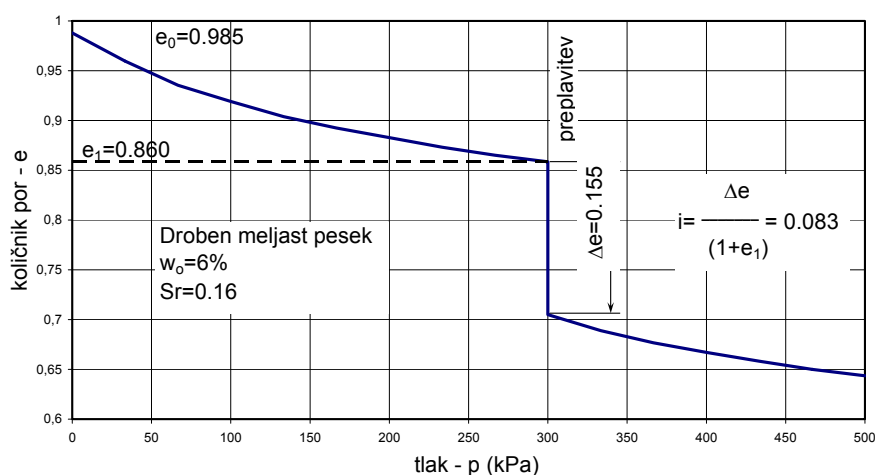
2.5.3 Strukturni kolaps

Strukturni kolaps se odraža kot nenadno nepovratno zmanjšanje volumna zemljine. Nastopi lahko zaradi vlaženja pri konstantnih totalnih napetostih, zaradi povečanja totalnih napetosti v nedreniranih pogojih ali zaradi kombinacije obojega (Slika 2.12).

Do strukturnega kolapsa pride (Mitchel in Soga, 2005):

- v delno zasičenih zemljinah z odprto, delno nestabilno strukturo,
- pri dovolj velikih totalnih napetostih, da je struktura metastabilna,
- v zemljinah, ki vsebujejo glineno ali drugo vezivo, ki stabilizira strukturo v suhem (npr. puhlica).

K strukturnemu kolapsu lahko doprinese tudi predrabljanje zrn zemljine (Feda, 1995).



Slika 2.12: Identifikacija strukturnega kolapsa v nezasičeni zemljini (Petkovšek, 2006a).

Figure 2.12: Identification of structural collapse in unsaturated soil (Petkovšek, 2006a).

Dovzetnost za kolaps lahko v zemljinah ocenimo na podlagi kriterija gostote. Če je gostota dovolj nizka in je porni prostor večji, kot je potreben za stanje pri meji židkosti, je pojav kolapsa zelo verjeten (Gibbs in Bara, 1967). Bistvena zunanja dejavnika, ki vplivata na strukturni kolaps, sta obremenitev in pogoji okolja, ki narekujejo spremembo vlage v zemljini. Odziv strukture na zunanje vplive pa je odvisen od gostote, mineralne sestave, jakosti medzrnskih sil in vrste vezi med zrni (Petkovšek, 2006a).

V sedimentih, preiskovanih v sklopu te naloge, doslej strukturnega kolapsa nismo identificirali, zato smo pojav opisali na fenomenološki ravni. Podrobnejše razlage teoretičnega ozadja in identifikacije strukturnega kolapsa so podane v Gibbs in Bara (1967), Barden et al. (1973), Basma in Tuncer (1992), Feda (1995), Mitchel in Soga (2005), Petkovšek (2006a), Li et al. (2016) in drugi.

2.5.4 Likvifikacija

Termin likvifikacija (angl. *liquefaction*), po slovensko utekočinjenje, sta v literaturo vpeljala Mogami in Kubo (1953), povzeto po Kramer (1996). Gre za fenomen izgube strižne trdnosti oz. strižne nosilnosti nekoherentnih zasičenih zemljin zaradi nenadnega porasta pornega tlaka, ki ga lahko enostavno pojasnimo z uporabo Terzaghijevega koncepta efektivnih tlakov.

Zaradi porasta pornih tlakov (u) se v zemljini zmanjšajo efektivne napetosti (σ') (2.16).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.16)$$

Izgubo strižne trdnosti (τ_f) zaradi likvifikacije lahko pojasnimo z enačbo (2.17). Ko se zaradi povišanja pornega tlaka izničijo efektivne napetosti, se v strukturi zemljine izniči tudi medzrnsko trenje. To pa vodi v upad in izničenje strižne trdnosti.

$$\tau_f = \sigma' \cdot \tan\varphi \quad (2.17)$$

Do likvifikacije lahko pride zaradi monotonih, impulzivnih ali ponavljajočih se motenj (npr. potres, eksplozija, prehodi težke mehanizacije,...), ki v rahli, zasičeni zemljini povzročijo porast tlaka porne tekočine, ki se ne uspe dovolj hitro drenirati. Načeloma se lahko utekočinijo vse zasičene zrnate zemljine, najbolj občutljive pa so rahle, srednje do drobno zrnate nekoherentne zemljine, ki obremenjene v nedreniranih pogojih težijo k zgoščanju (Kramer, 1996).

Ločimo dve vrsti utekočinjenja: (1) likvifikacija s tečenjem, ki nastopi kot posledica splazitve mase in (2) ciklična mobilnost. Pri prvi je strižna trdnost zemljine v času likvifikacije nižja od strižnih napetosti v statičnem ravnovesju, zato zemljina steče. Druga nastopi, ko je statična strižna napetost nižja od strižne trdnosti zemljine med ciklično obremenitvijo. Takoj po prenehanju delovanja ciklične obremenitve ima zemljina ponovno zadostno strižno trdnost (Kramer, 1996).

Splošno velja, da so za likvifikacijo najbolj dovzetni peščeni in meljasti materiali. Kitajski kriteriji (Wang (1979), povzeto po Kramer (1996)) opredeljujejo kot likvifabilne materiale, ki izpolnjujejo pogoje:

- delež zrn manjših od 0.005 mm \leq 15%,
- meja židkosti \leq 35%,
- naravna vlaga \geq 90% meje židkosti, w_L .

Rezultati novejših raziskav so pokazali, da so Kitajski kriteriji sicer okvirno uporabni, da pa obstajajo še drugi kazalniki lastnosti, po katerih lahko zemljine označimo kot dovzetne za likvifikacijo (Singh, 1996; Boulanger in Idriss, 2006; Prakash in Puri, 2010; Monkul in Yamamuro, 2011; Armstrong in Malvick, 2015; Sağlam, 2015; Pathak in Purandare, 2016, in drugi).

Reful iz Luke Koper je klasificiran kot mastna glina (CH) in zaradi svojih lastnosti po sedaj znanih kriterijih ni dovzeten za likvifikacijo. V zasičenih preizkušancih mulja sadre smo med laboratorijskimi preiskavami prepoznali likvifabilnost.

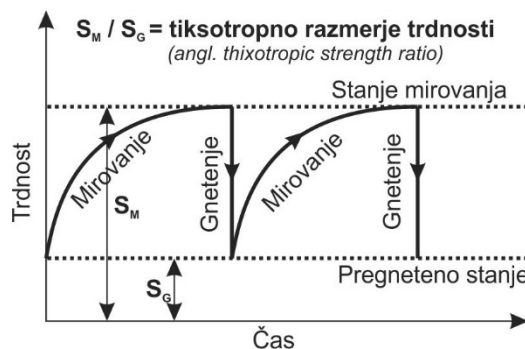
2.5.5 Tiksotropija

Tiksotropijo izkazujejo t.i. časovno odvisne tekočine in suspenzije in jo opisujemo kot pojav zniževanja strižne trdnosti ali viskoznosti pri konstantni strižni hitrosti. Upadanje strižne trdnosti si lahko razlagamo kot proces urejanja notranje strukture materiala v strižni tok. Če spremenimo strižne pogoje, npr. zmanjšamo strižno hitrost, je proces ponovne izgradnje strukture tekočine izrazitejši od podiranja. Po prenehanju delovanja strižnih sil, strižna trdnost tekočine po določenem času zopet naraste na prvotno vrednost. Takšnemu časovno odvisnemu obnašanju pravimo reverzibilno tiksotropno (Zupančič-Valant, 2007).

Tiksotropijo zemljin Das (1993) povezuje z občutljivostjo. Občutljivost definira kot razmerje trdnosti enako vlažne neporušene (intaktne) in pregnetene zemljine in je za gline reda velikosti med 1 in 8, za visoko flokulentne morske glin pa lahko tudi od 10 pa vse do 80. Upad trdnosti glin pripisuje porušitvi strukture, ki se ustvari med sedimentacijo v naravnem okolju.

Pregnetene zemljine, ki pri nespremenjeni vlagi s časom pridobivajo trdnost, so tiksotropne. Gre za časovno odvisen reverzibilen proces mehčanja (upada trdnosti) zaradi porušitve strukture (pregnetenosti) in ponovnega pridobivanja trdnosti v času mirovanja (Das, 1993).

Mitchell in Soga (2005) definirata tiksotropijo kot izotermen, reverzibilen, časovno odvisen proces, pri nespremenjeni sestavi in volumnu, ki se kaže kot pridobivanje trdnosti v času mirovanja in mehčanje ali utekočinjenje v fazi preoblikovanja (Slika 2.13).



Slika 2.13: Lastnosti tiksotropnega materiala (Mitchel in Soga, 2005).

Figure 2.13: Properties of a purely thixotropic material (Mitchel and Soga, 2005).

Mehanizem tiksotropnega utrjevanja lahko razložimo s strukturo zemljine. S sedimentacijo, kompaktiranjem ali gnetenjem se v zemljini ustvari struktura, ki je v ravnotežju s procesom. Ko prenehamo dovajati energijo, s katero gnetemo zemljino, struktura ni več v ravnotežju z okolico. Kljub temu se, če so privlačne sile med delci večje od odbojnih, delci združujejo in reorganizirajo v novo strukturo (Mitchel in Soga, 2005).

V refulu tiksotropnega obnašanja nismo prepoznali. Mulj sadre pa, kot je ugotovila že Petkovškova (Petkovšek, 2006a, 2014; Petkovšek et al., 2012), izkazuje tiksotropno obnašanje.

2.5.6 Reopeksija

Reopeksija ali antitiksotropija je pojav, ko viskoznost s časom delovanja striga pri določenih strižnih pogojih narašča. Materialov, ki bi izkazovali antitiksotropno obnašanje, je malo (Zupančič-Valant, 2007). Primeri suspenzij, ki izkazujejo antitiksotropno obnašanje, so razni polimeri, barve za tiskalnike in lateks.

2.6 Osmotska sukcija

2.6.1 Sukcija in vodni potenciali

Energija, s katero zemljina zadržuje vodo pri katerikoli vlažnosti, se imenuje potencial vode v zemljini. Voda se v zemljinskem matriksu zadržuje zaradi adsorpcije in kapilarnosti. Izraz vodni potencial, izražen v metrih vodnega stolpca, je v splošni rabi v hidrogeologiji. Zemljinska sukcija, ki je absolutna vrednost vodnega potenciala, je v splošni rabi v geotehnik in jo običajno izražamo z

enoto kPa. Sukcijo lahko izrazimo tudi kot kemični potencial, ki predstavlja delo, potrebno za izvlek majhnega dela vode iz zemljine (J/kg).

Aitchison et al. (1965) so definirali tri različne sukucije, ki so ekvivalentne vodnim potencialom: (1) matrična sukucija, (2) osmotska sukucija in (3) totalna sukucija.

Matrična sukucija (ψ_m) oz. matrični potencial je sukucija, ki jo določimo kot spremembo delnega tlaka vodne pare, uravnoteženo z vodo v zemljini, relativno glede na delni tlak vodne pare v ekvibraciji z raztopino identične sestave kot je pora voda v zemljini. Matrična sukucija je posledica interakcije vode in delcev v strukturi zemljine zaradi medmolekularnih vezi; sil, ki so posledica površinske napetosti (kapilarne sile) in sil zaradi adsorpcije vode na površino delcev.

Osmotska sukucija (π) oz. osmotski potencial je sukucija, ki jo določimo iz meritev delnega tlaka vodne pare v ekvibraciji z raztopino identične sestave kot jo ima pora voda v zemljini, relativno na delni tlak vodne pare, uravnotežen s prosto čisto vodo. Nastopi zaradi raztopljenih snovi v porni vodi in je lahko prisotna tako v saturiranih kot tudi nesaturiranih zemljinah.

Totalna (celotna) sukucija (ψ) oz. totalni potencial je sukucija, ki jo določimo iz meritev delnega tlaka vodne pare v ekvibraciji z vodo v zemljini, relativno na delni tlak vodne pare, uravnotežen s prosto čisto vodo. Totalna sukucija je seštevek matrične in osmotske.

Sedimenti iz vodnih okolij so v naravnem stanju običajno zasičeni, zato nas pri interpretaciji rezultatov preiskav matrična sukucija ne bo prav posebej zanimala, osredotočili pa se bomo na osmotsko sukucijo, ki nastopa v obeh muljih zaradi snovi raztopljenih v vodi in vpliva predvsem na procese sušenja.

2.6.2 Meritve osmotske sukucije (π)

V nesaturiranih zemljinah običajno merimo:

- totalno sukucijo, katero ob predpostavki nične osmotske sukucije, enačimo z matrično (npr. s potenciometrom WP4-T),
- matrično sukucijo (npr. z napravo Hyprop, s tenziometri, z osno translacijskimi tehnikami...).

Za pora vodo v zemljinah, s katerimi se običajno srečujemo v geotehniki, predpostavimo, da je inertna oz. da je količina raztopljenih snovi tako nizka, da je osmotska sukucija zanemarljiva (Sreedeeep in Singh, 2006).

Osmotsko sukucijo, ki je odvisna od vrste in količine snovi raztopljenih v vodi, lahko merimo s t.i. osmotskim tenziometrom. Osmotski tenziometer prepušča vodo, ne pa tudi v vodi raztopljenih snovi. Razlika potencialov med polprepustno membrano in tenziometrom je osmotski potencial in je vedno negativen.

Običajno se meritve osmotske sukcije izvajajo s posrednima metodama merjenja električne prevodnosti porne vode in relativne vlage zraka (s psihrometrom). Osmotsko sukcijo lahko določimo na zasičenih preizkušancih, za katere vemo, da je matrična sukcija nična ali na porni vodi, iztisnjeni iz preizkušanca. Pomembno je, da osmotsko sukcijo izmerimo neodvisno od matrične in totalne sukcije zemljin. Velikostni red osmotske sukcije je odvisen od vlage v saturiranem stanju (Krahn in Fredlund, 1972; Rhoades et al., 1999; Peroni in Tarantino, 2005; Sreedeeep in Singh, 2006).

Porno vodo, ki ji želimo izmeriti elektroprevodnost, moramo pred izvedbo meritev filtrirati, da odstranimo flokulirane delce glin, ki bi lahko vplivali na rezultat meritve. Konduktometer, s katerim izvajamo meritve in je umerjen s standardnimi raztopinami, samodejno korigira merjene vrednosti za vplive temperature. Osmotsko sukcijo lahko iz merjenih elektroprevodnosti izvednotimo po (2.18) in (2.19) (Allison et al., 1954; Morales Romero, 1999).

$$\pi = 0.0191 \cdot EC^{1.074} \quad (2.18)$$

$$\pi = 0.0240 \cdot EC^{1.065} \quad (2.19)$$

kjer je π osmotska sukcija v kPa in EC elektroprevodnost v $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Osmotsko sukcijo lahko, z vann Hoffovo enačbo, izvednotimo tudi iz molarnosti solne raztopine (2.20) (Fredlund et al., 2012; Soga et al., 2015).

$$\pi = \nu \cdot C \cdot R \cdot T_K \quad (2.20)$$

kjer je ν število osmotsko aktivnih delcev na molekulo (npr. 2 za NaCl in 3 za CaCl₂), C molarnost solne raztopine, R splošna plinska konstanta (8.31432 J/(mol K)) in T_K absolutna temperatura (K).

Obstajajo tudi druge zveze za izračun osmotske sukcije, ki povezujejo npr. vlago zemljine in elektroprevodnost zasičene porne vode in so izpeljane v odvisnosti od lastnosti materiala (Suits et al., 2008).

V sklopu te naloge smo meritve osmotske sukcije izvajali s psihrometrom WP4-T, na zasičenih preizkušancih, na iztisnjeni porni vodi, na morski vodi in na vodi iz akumulacije Za Travnikom. Morski vodi in vodi iz akumulacije Za Travnikom smo izmerili tudi elektroprevodnost.

2.6.3 Osmotska sukcija različnih raztopin, različnih koncentracij

Elektroprevodnost in osmotska sukcija zasičenih preizkušancev in pornih raztopin sta odvisni od koncentracije raztopljenih snovi. Z izhlapevanjem vode (sušenjem) se koncentracija raztopljenih snovi večja, zato tako EC kot tudi π naraščata, dokler ne pridemo do stanja zasičene raztopine.

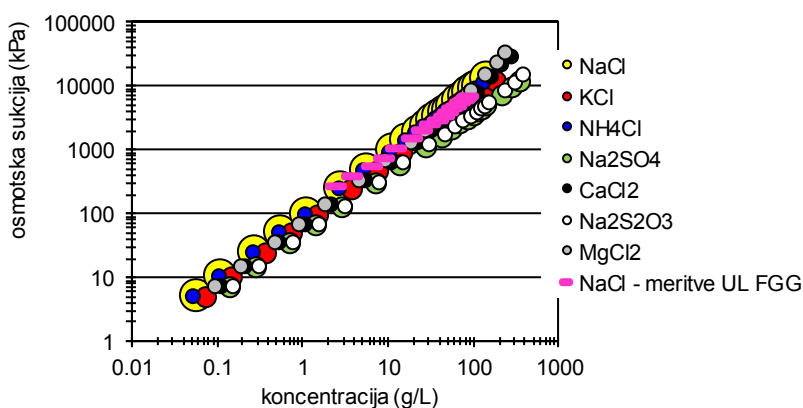
Osmotska sukcija različnih standardnih solnih raztopin je v odvisnosti od koncentracije (g/L) prikazana na Sliki 2.14. Rezultati meritev so povzeti po Hamer in Wu (1972), Goldberg in Nuttall

(1978), Goldberg (1981), Fredlund in Rahardjo (1993) in Bulut et al. (2001). Izračunane vrednosti elektroprevodnosti, so skupaj z vrednostmi, določenimi z uporabo empiričnih zvez (2.18) in (2.19), prikazane na Sliki 2.15.

Za raztopino NaCl, znane koncentracije, smo kontrolne meritve osmotske sukcije, s psihrometrom WP4-T, in elektroprevodnosti izvedli tudi sami in so na Sliki 2.14 in 2.15 prikazane s črticami magenta barve.

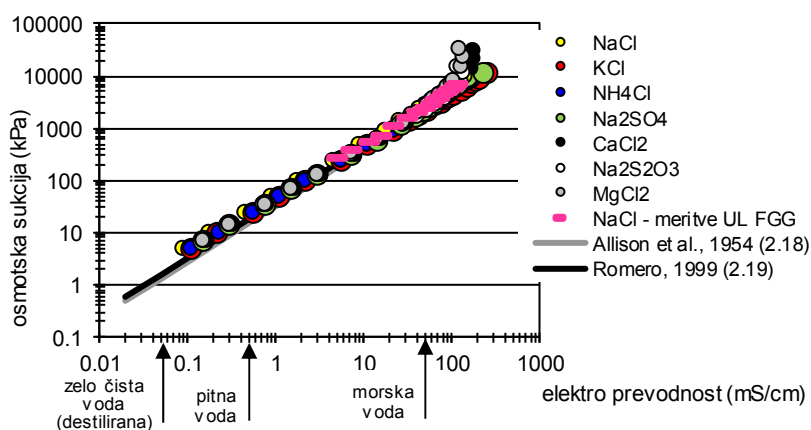
Na Sliki 2.15 smo označili značilne vrednosti elektroprevodnosti vode, s katero se običajno srečujemo v vsakdanu. Lastnosti morske vode, ki je v refulu, lahko opišemo z lastnostmi raztopine NaCl, saj sta Na in Cl prevladujoči komponenti v njeni sestavi. Elektroprevodnost morske vode je ca. 50 mS/cm, kar ustreza osmotski sukciji približno 2400 kPa. V poglavju 5.6.1 bomo pokazali, da so merjene vrednosti osmotske sukcije saturiranega refula in morske vode v velikostnem redu, prikazanem na Sliki 2.15.

Osmotske sukcije porne vode iz mulja sadre ne moremo enostavno določiti iz rezultatov meritev na standardnih raztopinah, saj, kot bomo kasneje pokazali (poglavje 5.6.2), je za ca. faktor 2 višja od osmotske sukcije zasičene sadrovice. To pomeni, da so v porni vodi mulja sadre, poleg sadre, raztopljene tudi druge soli.



Slika 2.14: Osmotska sukcija slanih raztopin v odvisnosti od koncentracije.

Figure 2.14: Osmotic suction of salt solutions in dependency of concentration.



Slika 2.15: Osmotska sukucija slanih raztopin v odvisnosti od elektroprevodnosti.

Figure 2.15: Osmotic suction of salt solutions in dependency of electric conductivity.

2.7 Vpliv soli na indeksne, fizikalne in mehanske lastnosti zemljin

Vpliv kemijske sestave porne vode na indeksne, fizikalne in mehanske lastnosti zemljin, je odvisen predvsem od njihove mineralne sestave. Bjerrum in Rosenqvist (1956), Bowders in Daniel (1987), Sridharan (1991, 2002), Di Maio (1996), Kaya in Fang (2000), Ören in Kaya (2003), Mitchel in Soga (2005), Yukselen-Aksoy et al. (2008), Elmashad in Ata (2015) in drugi, poročajo o spremembah indeksnih in fizikalno mehanskih lastnosti glin, če se porna tekočina v kemijski sestavi razlikuje od navadne oz. destilirane vode.

V geomehanskih laboratorijih se za uravnavanje vlažnosti zemljin, za izvedbo preiskav, običajno uporablja čista pitna ali destilirana voda. To lahko vodi do napačnih rezultatov raziskav in njihove interpretacije, v primerih, ko so v naravnem okolju iz katerega izvira zemljina, ali v okolju bodoče rabe, v vodi prisotne raztopljene snovi (Mansouri et al., 2013).

Splošno veljavnih smernic za primerjalno vrednotenje lastnosti zemljin, v katerih porna voda ni čista podzemna voda, in tistih s čisto podzemno vodo, ni. Prav tako ni možno enoznačno ovrednotiti vpliva porne tekočine na izbrani parameter. Za ovrednotenje vpliva kemijske sestave porne vode na lastnosti zemljine je potrebno izvesti primerjalno študijo identifikacije lastnosti v t.i. naravnem stanju z uporabo naravno prisotne porne vode in z uporabo čiste pitne ali destilirane vode. Z dodajanjem čiste vode porno vodo, naravno prisotno v zemljini, razredčimo. Če razredčitev ni možna do te mere, da se izniči vpliv raztopljenih snovi (npr. sol v morski vodi), se slednje lahko predhodno odstranijo z izpiranjem.

2.7.1 Sol in indeksne lastnosti zemljin

Metilen modro

Podatkov o vplivih soli na aktivnost glin, ki jo izražamo preko sposobnosti za kationsko izmenjavo z organskim kationom metilen modro, v literaturi nismo zasledili. Iz adsorpcije za organski kation metilen modro (MB , MB_f) lahko določimo tudi specifično površino zrn (SSA) in kationsko izmenjalno kapaciteto (CEC). Na MB oz. MB_f vrednostih temeljijo diagrami za napovedovanje nabrekalnega

potenciala zemljin (Cokca, 2002; Chiappone et al., 2004; Yukselen in Kaya, 2008; Petkovšek et al., 2009, 2010; Maček et al., 2013a; Farid and Mosaid, 2014).

Organski kation metilen modro ($C_{16}H_{18}N_3SCl$) je sorazmerno velik kation in se adsorbira na negativno nabite površine delcev, vrednost MB oz. MB_f pa se izmeri kot količina raztopine metilen modro, potrebna za prekritje vseh površin (zunanjih in notranjih) trdnih delcev (Petkovšek et al., 2010).

Raziskave aktivnosti zrn refula, opravljene v sklopu te naloge kažejo, da je vpliv soli na MB vrednost velik. Aktivnost zrn se v slanem okolju močno zmanjša, vrednost MB upade za ca. 40% (poglavje 5.5.1).

Atterbergove meje plastičnosti

Vpliv soli na mejo židkosti in mejo plastičnosti glin so raziskovali Torrance (1984), Sridharan (1991), Barbour in Yang (1993), Rao et al. (1993), Ohtsubo et al. (1996), Anson in Hawkins (1998), Sivapullaiah in Savitha (1999), Sridharan et al. (2002), Ören in Kaya (2003), Di Maio et al. (2004), Geertsema in Torrance (2005), Yukselen-Aksoy et al. (2008), Zentar et al. (2009), Ajalloeian et al. (2013), Yan in Chang (2015) in drugi. Sridharan (1991), Sridharan et al. (2002) in Ören and Kaya (2003) poročajo o majhnem zvišanju meje židkosti v nenabreklih kaolinitnih glinah in glinah mešane mineralne sestave, v primeru zelo slane porne vode. V splošnem pa slana porna voda nima bistvenega vpliva na Atterbergove meje plastičnosti kaolinitnih glin in glin mešane mineralne sestave.

Nasprotno, je vpliv soli v porni vodi na indeksne lastnosti montmorillonitnih glin velik (Rao et al., 1993; Di Maio, 1996; Anson in Hawkins, 1998; Di Maio et al., 2004). Meja židkosti močno upade, npr. iz 330% v čisti vodi, na 90% v morski vodi (Yukselen-Aksoy et al., 2008).

Yukselen-Aksoy et al. (2008) so na podlagi rezultatov raziskav različnih glin in iz primerjalnih analiz rezultatov, objavljenih v literaturi, zaključili, da se vpliv soli v porni vodi izrazi na glinah, ki imajo mejo židkosti višjo od 110%, indeks plastičnosti višji od 70% in indeks krčenja ($w_L - w_S$) višji od 104%. Grafično bomo vpliv soli na Atterbergove meje plastičnosti, primerjalno za podatke iz literature in vrednosti, merjene v sklopu te raziskave, podali v poglavju z rezultati raziskav (5.5.1).

2.7.2 Evaporacija

Evaporacija je prehajanje vode v obliki vodne pare z vodne površine ali zemeljskega površja v atmosfero. Ko je delni tlak vodne pare enak zasičenemu delnemu tlaku vodne pare, je izmenjava molekul med zrakom nad tekočino in tekočino v ravnovesju.

Hitrost evaporacije je odvisna od: delnega tlaka vodne pare v zraku in drugih delnih tlakov plinov, hitrosti zraka, medmolekulskih sil, ki se izražajo skozi izparilno toploto, lastnosti površine izhlapevanja in temperature. Pomemben vpliv na hitrost evaporacije ima energija, dovedena s sončnim obsevanjem, ki se pretvori v povišanje temperature vode in v izparevanje vode (latentna toplota). Ponoči npr. ko ni dovedene sončne energije, se zemljina ohlaja, voda izhlapeva bistveno manj kot v času sončnega obsevanja, pride pa lahko tudi do vlaženja zemljine.

V zasičenih zemljinah je evaporacija odvisna od: toplotnega toka v in iz zemljine, toka vode do površine zemljine in gibanja vodne pare iz površine zemljine v atmosfero (Hillel, 1980). Izhlapevanje je odvisno tudi od hidravličnih lastnosti zemljine (prepustnosti). Pomemben vpliv na evaporacijo ima tudi osmotska sukucija, ki močno upočasnjuje izhlapevanje.

Površina tal je pogosto pokrita z rastlinami, zato moramo upoštevati tudi izhlapevanje vode iz rastlin, ki vodo zajemajo s koreninami iz nižje ležečih slojev zemljin. Temu procesu pravimo transpiracija. S terminom dejanska evapotranspiracija označujemo celotno izgubo vlage zemljine in jo lahko merimo.

Bolj podrobno je fenomen evapotranspiracije v doktorski nalogi opisal Maček (2012).

2.7.3 Sušenje sedimentov s prisotno osmotsko sukucijo

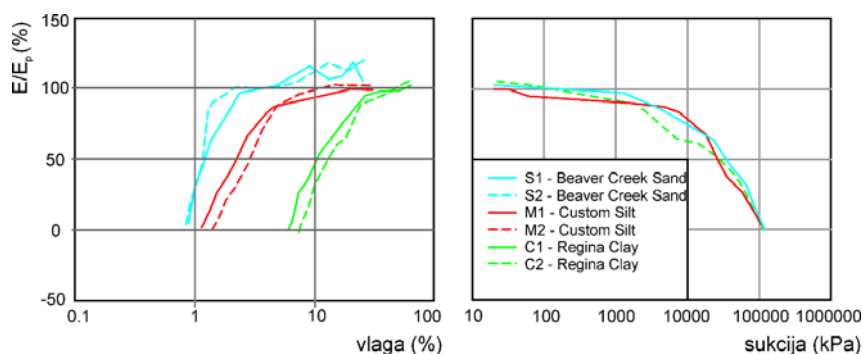
Evaporacija oz. izhlapevanje iz površine zemljine in/ali znižanje nivoja podzemne vode povzroči sušenje zemljine. V obeh slučajih se na površini ustvari t.i. suha skorja, sčasoma pa se lahko razvijejo tudi krčitvene razpoke (Znidarčič, 2007). V nadaljevanju poglavja se bomo omejili na fenomen sušenja visoko vlažnih sedimentov, odloženih v akumulacijah, ki so predmet te naloge. Podrobno bomo opredelili vpliv osmotske sukucije na hitrost sušenja.

Opis fenomena sušenja sedimentov v akumulacijah, podan v naslednjem odstavku, smo povzeli po Abu-Hejleh in Znidarčič (1995), ki sta v svoji objavi združila poglede različnih avtorjev.

Posledica sušenja površine sedimentov v akumulacijah je posedanje in zgoščanje. S časom nastanejo krčitvene razpoke, ki prodirajo v globino. Zaradi površinskega sušenja se zmanjša količnik por sedimenta, sprosti se del odlagalnega volumna (Blight, 1988). East et al. (1987) so trdili, da se zaradi površinskega sušenja lahko neojezerjeni odloženi sedimenti popolnoma skonsolidirajo. S tem se zmanjšajo dolgoročni posedki. Mitchell (1988) je ugotovil, da je debelina suhe skorje na površini odvisna od klimatskih pogojev na lokaciji, nivoja podzemne vode in vegetacije.

V vodi raztopljene soli povzročajo osmotsko sukucijo. Sukucija zmanjšuje evaporacijo, z znižanjem maksimalnega možnega delnega tlaka vodne pare tik nad zemljino (Harbeck, 1955). Med sušenjem se totalna sukucija viša na račun višanja matrične sukucije zaradi nižanja vlage in višanja osmotske sukucije na račun višanja koncentracije soli. Na razvoj totalne sukucije in obnašanje zemljine močno vpliva hitrost sušenja.

Poleg različnih modelov, ki povezujejo zemljino in atmosferske vplive so Wilson et al. (1997) izvedli laboratorijske teste sušenja na tankem sloju zemljine. Hkrati so spremljali sukucijo in hitrost evaporacije. Rezultati so prikazani na Sliki 2.16. Vidimo, da lahko obnašanje različnih zemljin opišemo z različnimi krivuljami soodvisnosti razmerja dejanske (E) in potencialne evaporacije (E_p) in vsebnosti vode. Nasprotno so krivulje soodvisnosti razmerja E/E_p in totalne sukucije enake (Slika 2.16, desno). Zaključimo lahko, da predstavlja sukucija in njen doprinos k zmanjšanju delnega tlaka vodne pare glavni vpliv na hitrost evaporacije (Maček (2012) po Campbell (1985) in Wilson et al. (1997)).



Slika 2.16: Razmerje E/E_p v odvisnosti od vlage (levo) in sukcije zemljine (desno) (Maček (2012) po Wilson et al. (1997)).

Figure 2.16: The ratio E/E_p as a function of soil water content (left) and soil suction (right) (Maček (2012) after Wilson et al. (1997)).

S podobnim poskusom smo v sklopu te naloge identificirali razlike v hitrosti izhlapevanja porne tekočine iz treh referenčnih zemljin: bentonita, kaolina in kremenovega peska. Sukcije med preiskavo nismo merili. Kot porno tekočino smo uporabili destilirano vodo, vodo iz vodovoda, porno tekočino iz mulja sadre in zasičeno raztopino NaCl. Ugotovili smo, da se zaradi prisotnosti soli (NaCl) sušenje zemljine močno zmanjša, po določenem času pa se povsem ustavi zaradi skorje solnih kristalov na površini. Podrobneje so rezultati raziskave in ugotovitve podani v poglavju 9.2.

Za izračune sušenja sedimentov v akumulacijah smo v tej nalogi uporabili model, ki ga je v svoji doktorski nalogi za izračun sušenja zemljin s sukucijo za plaz Slano blato razvil Maček (2012). Avtor je v svoji nalogi pojasnil vse mehanizme v zemljini in celotno teoretično ozadje modela, zato ga na tem mestu ne bomo povzemali. Model smo prilagodili tako, da smo robni pogoj spremenili za vpliv osmotske sukucije. To pomeni, da smo ustrezno zmanjšali evaporacijo.

2.8 Reologija

2.8.1 Zgodovina

Zanimanje za tok tekočin in drugih materialov so ljudje izkazovali od nekdaj. Kitajski filozof Konfucij (551-479 pred našim štetjem) je zapisal: *The Master stood by a river and said: »Everything flows like this, without ceasing, day and night«*. O tečenju snovi je razmišljal tudi grški filozof Heraklit (540-475 pred našim štetjem). Eden njegovih pomembnejših izrekov je: *»πάντα ῥεῖ (phanta rei)«* ali angl. *everything flows* (Tanner in Walters, 1998) oz. vse teče.

Temelje današnje reologije je v 17. stoletju postavil Isaac Newton (1643-1727). Tekočine, ki izkazujejo linearno zvezo med uporom in hitrostjo toka, se po njem imenujejo Newtonske tekočine. Eno izmed pomembnih imen na področju reologije je Eugen Cook Bingham (1878-1945). Vpeljal je Binghamov model obnašanja viskoplastičnih tekočin, s katerim lahko pogosto opišemo reološke lastnosti suspenzij zemljin.

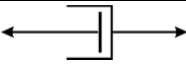

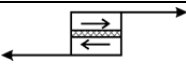
V sodobnem pojmovanju je reologija interdisciplinarna veda, ki omogoča vrednotenje mehanskih lastnosti predvsem tekočin in poltrdnih snovi in viskoelastičnih trdnih snovi. Najpomembnejši pojavi, ki jih obravnava reologija, so: (1) strižna odvisnost viskoznosti realnih tekočin, (2) časovna odvisnost oz. povrnjivost deformacije, kar je značilno za tekočine, poltrdne in trdne snovi, (3) pojav razlik v normalnih napetostih, značilen za viskoelastične snovi in (4) naraščanje viskoznosti pri raztezku, značilno za viskoelastične snovi (Zupančič-Valant, 2007).

2.8.2 Modeli za opis reoloških lastnosti

Temelje današnje reologije je postavil Isaac Newton s formuliranjem modela za opis t.i. Newtonske viskozne tekočine. Newtonov model je postal osnovni reološki model in je poleg Hookove vzmeti in Saint Venantovega plastičnega telesa, osnovni gradnik ostalih reoloških modelov (Preglednica 2.5). Obstajata tudi togo evklidsko telo (nična deformacija) in neviskozna Pascalova tekočina (nična viskoznost), ki ju v knjigi *Rheological aspects of soil mechanics* navaja Šuklje (1969).

Preglednica 2.5: Osnovni reološki modeli.

Table 2.5: Basic rheological models.

Telo	Grafični prikaz	Enačba
Newtonska tekočina - Newtonov viskozni element		$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \eta \cdot \dot{\gamma}$
Hookovo telo		$\tau = G \cdot \gamma$
Saint Venantovo telo (plastično)		$\gamma = 0, \text{ če } \tau < \tau_y$ $\gamma = \infty, \text{ sicer } (\tau \geq \tau_y)$

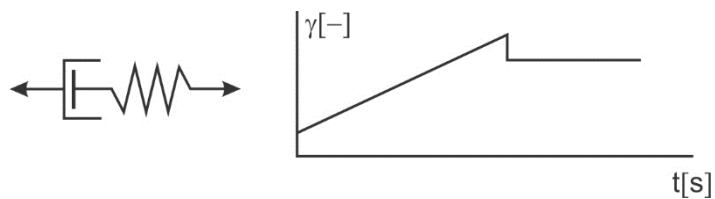
kjer je t čas, τ strižna napetost, τ_y strižna napetost na meji tečenja (mejna napetost), η viskoznost, γ strižna deformacija, $\dot{\gamma}$ strižna hitrost in G elastični strižni modul.

Bolj kompleksni modeli, kot npr. Maxwellov, Kelvin-Voightov, Binghamov in drugi, ki jih bomo obravnavali v nadaljevanju, so sestavljeni iz različno vezanih osnovnih gradnikov, prikazanih v Preglednici 2.5.

Maxwellov reološki model

Maxwellov reološki model je sestavljen iz zaporedno vezanega Newtonovega in Hookovega telesa (Slika 2.17, levo). Na obeh telesih so napetosti enake, deformacija pa je vsota deformacij na posameznem telesu (2.21). Časovni potek strižne deformacije pri testu lezenja in obnove je prikazan na Sliki 2.17, desno.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \quad (2.21)$$



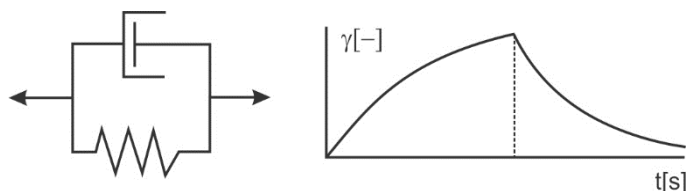
Slika 2.17: Maxwellov reološki model.

Figure 2.17: Maxwell rheological model.

Kelvin - Voightov reološki model

Model je sestavljen iz vzporedno vezanega Newtonovega viskoznega elementa in Hookovega telesa (2.18, levo). Deformacije so na obeh gradnikih enake, napetost pa je seštevek napetosti na gradnikih (2.22). Časovni potek strizne deformacije pri testu lezenja in obnove je prikazan na Sliki 2.18, desno.

$$\tau = G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.22)$$



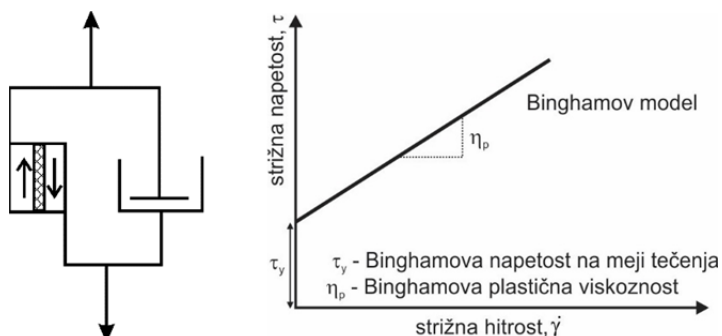
Slika 2.18: Kelvin - Voightov model.

Figure 2.18: Kelvin - Voight rheological model.

Binghamov reološki model

Binghamov reološki model sestavljata vzporedno vezano Saint Venantovo telo in Newtonov viskozni element (Slika 2.19, levo). Deformacije so nične, dokler ni prekoračena napetost na Saint Venantovem togem telesu. Po prekoračitvi napetosti pričnejo deformacije naraščati zvezno s časom. Obnašanje materialov, ki sledijo Binghamovemu modelu, lahko opišemo z zvezo (2.23). Strizno napetost (τ) v zvezi (2.23) sestavljata dve komponenti: Binghamova strizna napetost na meji tečenja (τ_y) (angl. *Bingham yield stress*) in prirast strizne napetosti zaradi strizne hitrosti ($\dot{\gamma}$) in plastične viskoznosti (η_p).

$$\tau = \tau_y + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (2.23)$$



Slika 2.19: Binghamov reološki model.

Figure 2.19: Bingham rheological model.

Podali smo tri najbolj osnovne reološke modele. Za opis reoloških lastnosti različnih materialov obstaja še več modelov in izpeljank oz. modifikacij osnovnih modelov (Šuklje, 1969; Barnes et al., 1989; Jeong, 2006 in drugi). V Preglednici 2.6 smo povzeli zveze, ki opisujejo nekaj bolj znanih ostalih reoloških modelov.

Preglednica 2.6: Nekateri ostali reološki modeli (Barnes et al., 1989; Jeong, 2006).

Table 2.6: Some others rheological models (Barnes et al., 1989; Jeong, 2006).

Model	Zveza
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_y + K_2 \cdot \dot{\gamma}^n$
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta_\infty \cdot \dot{\gamma}}$
Modificirani Bingham-ov model	$\tau = \tau_{ya} + \eta_\infty \cdot \dot{\gamma}^n + \left(\frac{\tau_{ya} \cdot \dot{\gamma}_o}{\dot{\gamma}} + \dot{\gamma}_o\right); \dot{\gamma}_o = \frac{\tau_{ya}}{\eta_o - \eta_\infty}$
Carreau	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_o - \eta_\infty} = \frac{1}{(1 + (K_1 \cdot \dot{\gamma})^2)^{m/2}}$

kjer je τ strižna napetost, τ_y strižna napetost na meji tečenja (odvisna od modela), τ_{ya} navidezna napetost na meji tečenja, η_∞ viskoznost pri zelo visokih strižnih hitrostih, η_o viskoznost pri zelo nizkih strižnih hitrostih, $\dot{\gamma}$ strižna hitrost, $\dot{\gamma}_o$ strižna hitrost na prehodu iz visoke na nizko viskoznost v modificiranem Binghamovem modelu, K_1 parameter, ki ima enoto časa, K_2 parameter konsistence tekočine, n indeks tokovnega obnašanja (brezdimenzijski), m brezdimenzijska konstanta.

2.8.3 Konsolidacija

Reološki modeli, opisani v poglavju 2.8.2, so t.i. fizikalno mehanski. Konsolidacija, eden najpomembnejših procesov v geotehniki pa sodi med t.i. fenomenološke modele, s katerim opisujemo dogajanje v zemljini (Maslov, 1968). Dogajanja na fenomenološki ravni nimajo fizikalne podlage, za njihov opis pa se uporabljajo potenčne, eksponentne, logaritemske in hiperbolične funkcije (Meschyan, 1995).

Konsolidacija zemljin je zmanjšanje volumna zaradi iztiskanja vode iz por in sestoji iz primarne in sekundarne faze. Meschyan (1995) je predlagal, da se za opis primarne faze konsolidacije oz. lezenja uporabi model Newtonske tekočine, za sekundarno fazo pa Binghamov model.

Primarno fazo konsolidacije zasičene zemljine tako opišemo s fenomenološkim modelom, ki sta ga postavila Terzaghi in Fröhlich (1936) (povzeto po Šuklje (1969).

$$u_w(z, t) = \frac{4\Delta\sigma}{\pi} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin\left(\frac{\pi}{2}(2m+1)\frac{z}{h}\right) \exp\left(- (2m+1)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v\right) \quad (2.24)$$

$$U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp\left(- (2m+1)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v\right) \quad (2.25)$$

$$T_v = \frac{k_s E_{oed}}{\rho_w g h^2} \quad (2.26)$$

kjer je U_v stopnja vertikalne konsolidacije, T_v brezdimenzijski časovni faktor vertikalne konsolidacije, k_s koeficient vodoprepustnosti, E_{oed} edometriški modul stisljivosti, h drenažna dolžina, $\Delta\sigma$ sprememba napetosti v tleh, m števec, z višina od 0 do h .

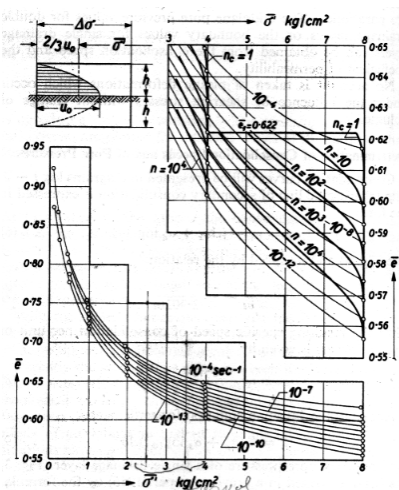
Šuklje (1957, 1969) je za opis sekundarne konsolidacije (t.i. primarne faze lezenja) vpeljal krivulje, ki jih je poimenoval izotahe (Slika 2.20). Izotahe so bile prvi model, ki je opisoval deformacije glin v obliki enovite zveze med hitrostjo deformacije, efektivno napetostjo in količnikom por. Predpostavka modela je bila, da se lezenje vrši tako v primarni, kot tudi v sekundarni fazi konsolidacije; proces lezenja ni bil obravnavan ločeno. V modelu izotah je bilo upoštevano, da na časovno odvisne deformacije vplivajo debelina sloja, vodoprepustnost in pogoji dreniranja. Pomembno je poudariti, da je Šuklje že prepoznal vpliv količnika por na hitrost deformacij.

Pojem izohron je leta 1967 vpeljal Bjerrum (1967). Izohrone so linije, ki povezujejo efektivno napetost s količnikom por v enakem času po pričetku konsolidacije (Slika 2.21, levo). Ideja je bila, da bi z lezenjem opisal nastanek prekonsolidiranih glin. Model je podoben Šukljetovemu (Šuklje, 1957, 1969) in ne obravnava ločeno primarne konsolidacije in faze lezenja. S konceptom izohron lahko pojasnimo prekonsolidacijo kot posledico vpliva sekundarne konsolidacije (lezenja). Bjerrum (1967) je volumske spremembe razdelil na dve komponenti: zaradi takojšnjega in zapoznelega stiskanja. Takojšnje stiskanje se zgodi hkrati s povečanjem efektivne napetosti in ima za posledico zmanjšanje količnika por. Zapoznelo stiskanje lahko opišemo s spremembo volumna pri nespremenjenih efektivnih napetostih. (povzeto po Ollson (2010)).

Na podlagi dela Bjerruma, na področju lezenja zemljin, je Garlanger (1972) za izračun spremembe količnika por, podal zvezo oblike (2.27).

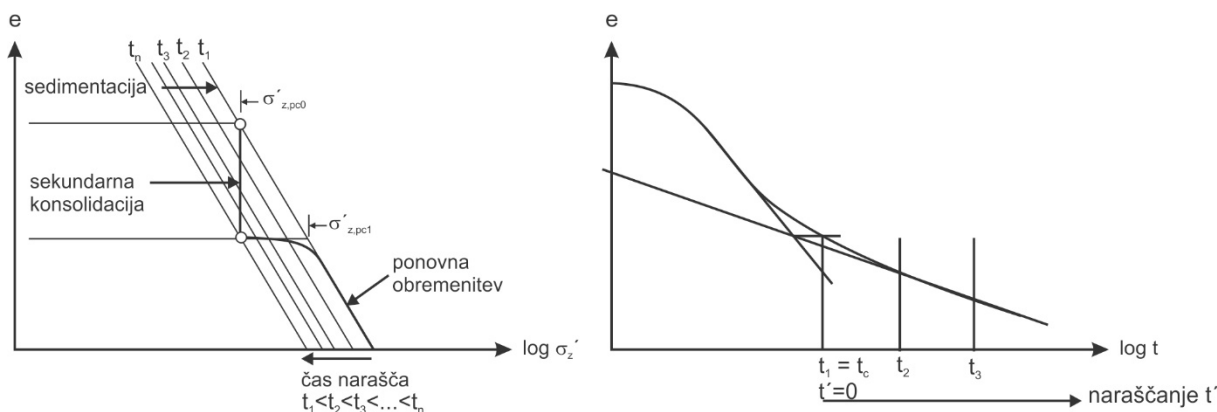
$$\Delta e = C_{\alpha e} \cdot \log\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (2.27)$$

kjer je τ_c parameter, za normalno konsolidirane gline kar čas konca primarne konsolidacije (t_c), za prekonsolidirane gline pa je večji in je odvisen od količnika por po koncu primarne konsolidacije in od efektivne vertikalne napetosti in t' t.i. efektivni čas lezenja (angl. *effective creep time*), ki ga lahko izračunamo kot razliko časa celotnega trajanja bremenske stopnje (t.j. časa od pričetka bremenske stopnje do trenutnega časa) in časa konca primarne konsolidacije (Slika 2.21, desno).



Slika 2.20: Izotahe za opis obnašanja krede (Šuklje, 1957).

Figure 2.20: Isotache set of lacustrine chalk (Šuklje, 1957).



Slika 2.21: Sistem izohron (prirejeno po Bjerrum (1967)) (levo) in shematski prikaz izračuna efektivnega časa lezenja (desno).

Figure 2.21: System of isochrones (adapted after Bjerrum (1967)) (left) and schematic presentation of the effective creep time determination (right).

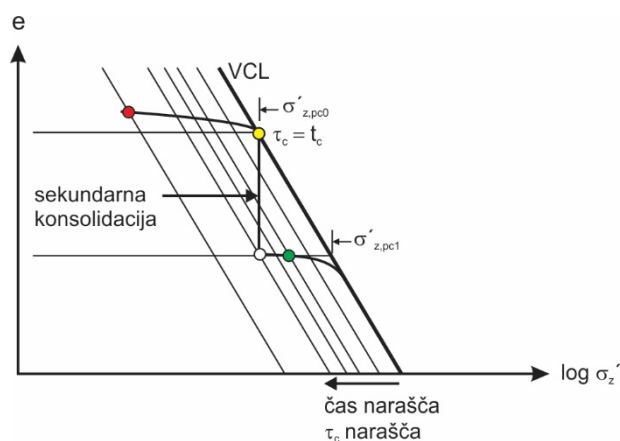
Iz shematskega prikaza na Sliki 2.22 vidimo, da je za normalno konsolidirane gline parameter τ_c kar enak času konca primarne faze konsolidacije (t_c) (rumen simbol). V materialih z izrazitim lezenjem, kjer ima predhodna bremenska stopnja vpliv na obnašanje materiala v naslednji, je τ_c večji od t_c (zelen simbol). Parameter τ_c se ustrezno poveča tudi zaradi razbremenitve (in lezenja) (rdeč simbol).

Fenomen vpliva zgodovine vzorca/preiskave na lezenje v trenutnem času je na plazini plazju Slano blato prepoznal že Maček (2012). Ugotovil je, da je potrebno trenutni čas lezenja ustrezno povečati glede na čas lezenja predhodnih stopenj, kar je v izračunih tudi upošteval. Parametra τ_c ni določal, kot smo ga v tej nalogi, ampak je predpostavil, da ima vrednost časa lezenja predhodnih bremenskih stopenj (princip seštevanja časa lezenja).

Za mulj sadre smo ugotovili, da ima lezenje v prejšnji stopnji bistven vpliv na konsolidacijo v naslednji bremenski stopnji. Vpliv lezenja se tekom preiskave na nek način »akumulira«. Na hitrost deformacije v trenutni stopnji vpliva zgodovina poteka preiskave in stanja sedimenta v naravi. Linijo

sekundarne konsolidacije lahko za vsako bremensko stopnjo opišemo z modelom (2.27), pri čemer moramo zaradi prej opisanih vplivov zgodovine lezenja posebno pozornost nameniti določitvi parametra τ_c (Slika 2.22). Natančna definicija in fizikalno ozadje parametra τ_c sta še vedno odprta tema (Plaxis, 2015).

V tej nalogi smo pri vrednotenju rezultatov preiskav in modeliranju konsolidacijskega lezenja mulja sadre, vrednosti τ_c in $C_{\alpha e}$ določili za vsako bremensko stopnjo konsolidacije iz funkcije najboljšega prilaganja meritvam na območju od ocenjenega konca primarne konsolidacije do konca bremenske stopnje. Ko smo določili τ_c , smo lahko za vsako bremensko stopnjo izračunali količnik por, ki bi ga imel normalno konsolidiran mulj sadre, 24 ur po obremenitvi. Iz izračunane linije konsolidacije smo določili ustrezne materialne parametre za izračune v Plaxisu s Soft soil creep modelom. Podrobno je določitev parametra τ_c in $C_{\alpha e}$ prikazana v poglavju 8.2.



Slika 2.22: Shema naraščanja parametra τ_c zaradi vplivov lezenja, prirejeno po Bjerrum (1967).

Figure 2.22: The increase of the parameter τ_c due to creep, schematic view, adapted after Bjerrum (1967).

Soft soil creep model

Za modelni opis stiskanja mehkih zemljin lahko med drugimi uporabimo tudi Hardening soil model in Soft Soil model. Nobeden od navedenih modelov pa ni primeren za izračune, če zemljina izkazuje izrazito lezenje oz. sekundarno konsolidacijo. Za tovrstne materiale je bil, na podlagi študij 1D konsolidacije in lezenja, s katerimi so pričeli že Šuklje (1957, 1969), Bjerrum (1967) in drugi, razvit Soft soil creep model (SSC model).

V izračunih s SSC modelom je upoštevana: (1) togost v odvisnosti od napetosti (logaritemski »zakon« stiskanja), (2) razlika med prvotno obremenitvijo, razbremenitvijo in ponovno obremenitvijo, (3) sekundarna konsolidacija po teoriji B (Ladd et al., 1977), (4) večanje prekonsolidacijske napetosti zaradi dolgotrajnega lezenja (OCR) in (5) Mohr-Coulombov kriterij porušitve (Plaxis, 2015). Teoretično ozadje modela je podrobno opisano v literaturi (Vermeer et al., 1997; Stolle et al., 1999; Ollson, 2010; Plaxis, 2015 in drugi), zato ga v nalogi ne bomo opisovali. V nadaljevanju razdelka bomo opisali samo način izračuna parametra τ_c v Plaxisu.

Kot smo že zapisali, izkazuje mulj sadre izrazito lezenje, ki vpliva na nadaljnje obnašanje materiala (npr. v naslednjih bremenskih stopnjah edometra) in se v vzorcu akumulira. Fenomen v izračunih

upoštevamo s parametrom τ_c (zveza 2.27), ki ni jasno definiran (Plaxis, 2015). V priročniku o materialnih modelih v Plaxisu (Plaxis, 2015) je podana izpeljava zveze, iz katere program izvede parameter τ_c in temelji na osnovni ideji o časovni odvisnosti plastičnih deformacij. V izpeljavah je privzeta Bjerrumova ideja (Bjerrum, 1967), da je prekonsolidacijska napetost v celoti odvisna od časovno akumuliranih deformacij zaradi lezenja. τ_c je tako izražen v soodvisnosti časa τ (2.28), OCR ter razmerja plastičnih deformacij, kot posledica efektivnih napetosti in plastičnih deformacij zaradi lezenja. OCR se izračuna iz trenutnega količnika por in količnika por normalno konsolidiranega materiala po času obremenjevanja 24 ur.

$$\tau = t_c + t' = 24 \text{ ur} \quad (2.28)$$

kjer je t_c čas konca primarne konsolidacije in t' t.i. efektivni čas lezenja.

Za referenčni čas je v Plaxisu upoštevana vrednost 24 ur, kar ustreza času trajanja bremenske stopnje v običajni edometriški preiskavi. Vsi materialni parametri morajo biti zato podani za stanje preizkušanca 24 ur po obremenitvi.

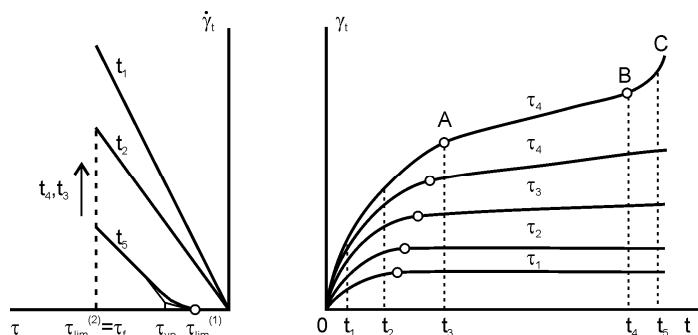
2.8.4 Strižno lezenje

Strižno lezenje oz. lezenje v pogojih strižne obremenitve in konsolidacijsko lezenje lahko nastopata hkrati. Havel (2004) v disertaciji ugotavlja, da so za strižno lezenje v nedreniranih pogojih najbolj občutljive zasičene rahle gline, v dreniranih pogojih pa prekonsolidirane gline.

Za opis strižnega lezenja obstajajo fizikalno mehanski in fenomenološki reološki modeli, katerih slabost je, da so razviti za točno določen problem (Maček, 2012). Podobno kot za konsolidacijo, tudi za opis strižnega lezenja Meschyan (1995) predlaga uporabo modela Newtonske tekočine za opis primarnega lezenja in Binghamov model za opis sekundarne faze lezenja. Shematsko je obnašanje gline med preiskavo strižnega lezenja v enostavnem strigu, prikazano na Sliki 2.23.

Fifer Bizjak in Zupančič (2009) sta za opis viskoznega toka s konstantno hitrostjo in lezenje finih delcev plazine na plazu Slano blato pri konstantni strižni obremenitvi, uporabili Burgerjev model. Maček (2012) je gibanje plazu Slano blato, na podlagi rezultatov meritev, opisal z Binghamovim modelom. Ugotovil je, da se plaz Slano blato ne giblje zaradi lezenja zemljine, temveč kot viskozni tok zaradi izgube stabilnosti, povzročene zaradi povišanih pornih tlakov.

Zaradi izrazitega konsolidacijskega lezenja smo na mulju sadre informativno izmerili tudi strižno lezenje. Rezultate smo ovrednotili kvantitativno in interpretirali primerjalno, glede na parametre v raziskavi. Merjenih vrednosti, zaradi majhnega nabora rezultatov, nismo opisovali z reološkimi modeli.



Slika 2.23: Obnašanje gline med preiskavo lezenja v enostavnem strigu (Meschyan, 1995).

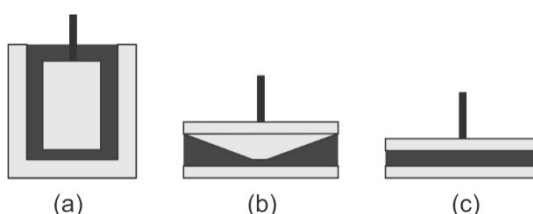
Figure 2.23: Response of clay during the investigation of creep in simple shear apparatus (Meschyan, 1995).

2.8.5 Reometrija – merjenje z reometri in viskometri

Za konsolidacijo in strižno lezenje, opisano v poglavjih 2.8.3 in 2.8.4, bi lahko rekli, da opisujeta reološko obnašanje materiala do porušitve. V reoloških modelih, npr. Binghamovem, pa nastopa napetost na meji tečenja in Binghamova plastična viskoznost (Slika 2.19). Opisujemo torej obnašanje materiala na meji porušitve in po porušitvi (v toku).

Parametre Binghamovega modela ali drugih reoloških modelov lahko določimo iz meritev z reometri in viskometri. Za merjenje reoloških lastnosti tekočin se lahko uporabljajo kapilarni in rotacijski reometri. Za merjenje reoloških lastnosti zemljin in sedimentov kapilarni reometri niso primerni, zato jih v nadaljevanju ne bomo obravnavali. Z reometri lahko preiskujemo tudi tiksotropno obnašanje materialov, opisano v poglavju 2.5.5.

V rotacijskih reometrih so preiskave lahko vodene napetostno ali deformacijsko. Pri napetostno vodenih preiskavah vsiljujemo strižno napetost, pri deformacijsko vodenih pa strižno hitrost (Zupančič-Valant, 2007). Meritve z rotacijskimi reometri potekajo tako, da material, ujet med dvema površinama, neprekinjeno strižemo. Osnovni tipi rotacijskih reometrov so: koaksialni valjasti reometri (angl. *coaxial cylinder rheometer*), senzorski sistem stožca in plošče (angl. *cone and plate sensor system*) in reometri z merilnim sistemom dveh vzporednih plošč (angl. *parallel plate sensor system*) (Slika 2.24) (Schramm, 2000; Zupančič-Valant, 2007).



Slika 2.24: Senzorski sistemi reometrov: (a) koaksialni valjasti, (b) stožec in plošča in (c) dve vzporedni plošči (Zupančič-Valant, 2007).

Figure 2.24: Rheometers sensor systems: (a) coaxial cylinder, (b) cone – plate and (c) plate – plate (Zupančič-Valant, 2007).

Reološke parametre refula in mulja sadre smo izmerili z dvema različnima koaksialnima valjastima reometroma, zato se bomo v nadaljevanju osredotočili samo na ta tip reometrov.

Koaksialni valjasti reometri in viskometri

Bistven del koaksialnih valjastih reometrov je merilni senzor z natančno definirano geometrijo. Merilni senzor sestavlja dva valja. Običajno se eden od valjev vrti, drugi pa miruje. Material, na katerem izvajamo preiskavo, je vgrajen med obema valjema. Obdelava površine sonde, vtisnjene v material, je odvisna od tipa reometra. Reometer, DV3T HB, proizvajalca Brookfield omogoča meritve s krilnimi sondami (angl. *vane*) in s povsem gladkimi vreteni (angl. *smooth spindles*), ConTec Viscometer 5, prvenstveno namenjen za raziskave malt in betonov pa ima sondo, sestavljeno iz vertikalnih reber.

Z vidika geometrije, je lahko razlika med radijem zunanjega in notranjega vretena velika (širok razmak) ali majhna (ozek razmak). Če je razmak ozek, se material v celoti striže približno z enako strižno hitrostjo, sicer pa temu ni tako. Različni avtorji podajajo, za veljavnost predpostavke o konstantni hitrosti striga celotnega materiala, različna razmerja med radijem notranjega in zunanjega valja. Barnes et al. (1989) so ugotovili, da mora biti razmerje 0.97, Ferguson in Kembrowski (1991) pa da se takšno stanje vzpostavi že pri razmerju 0.95.

Merjeni parametri pri deformacijsko vodenih preiskavah so: navor ali izkoriščenost vretena (angl. *torque*), čas in hitrost vrtenja merske sonde ali cilindra. Iz znanih podatkov o geometriji in/ali s podatki o faktorjih sond, ki jih poda proizvajalec naprave, lahko z uporabo ustreznih zvez iz vrednotimo reološke parametre materiala.

Teoretično ozadje in zveze, ki smo jih v nalogi uporabili za vrednotenje reoloških parametrov sedimentov z uporabo Binghamovega modela, so podane v poglavju 6.3, zato jih na tem mestu ne bomo navajali. Poseben poudarek je na vrednotenju t.i. mrtvega toka (Feys et al., 2013), ki ga bomo podrobneje pojasnili v nadaljevanju tega razdelka. Mrtvi tok (angl. *plug flow*) imenujemo območje vzorca, ki med preiskavo reoloških lastnosti ne teče, mrtvi radij (angl. *plug radius*) pa mejo med materialom, ki teče in tistim, ki miruje.

Pri meritvah s koaksialnimi valjastimi reometri se lahko pojavi več težav in vprašanj, odvisno od materiala, ki ga preiskujemo. V nadaljevanju bomo opredelili samo tiste, ki so lahko prisotne v preiskovanih sedimentih iz vodnih okolij.

Ali predpostavka laminarnega toka materiala drži? Pri velikih hitrostih lahko, mestoma v vzorcu, pride tudi do neurejenega toka. Zaradi vpliva centrifugalnih sil je manjša verjetnost, da pride do neurejenega toka v primeru vrtenja zunanjega valja (v naših raziskavah ConTec Viscometer 5) (Ferguson in Kembrowski, 1991). Če se vrti notranji valj (v naših raziskavah reometer DV3T HB), pride do vrtinčenja, zaradi težnje delcev ob notranjem valju po pomikanju navzven (Whorlow, 1992).

Je možno, da na rezultat preiskave vpliva zdrs materiala ob steni valja? Če pride do zdrsa materiala ob steni valjev, je predpostavka, da je hitrost materiala enaka hitrosti vrtenja valja, povsem napačna. Z

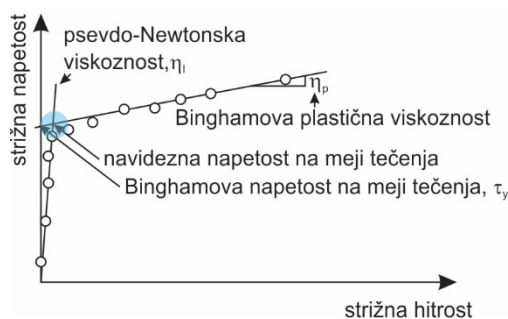
napako so v tem slučaju obremenjeni tudi rezultati preiskave. Formiranje toka ob valju lahko preprečimo z rebričasto strukturo valja, kot jo ima npr. ConTec Viscometer 5.

Ali ves material vgrajen v reometer sledi vsiljeni deformaciji? Ne vedno! V materialih, ki imajo visoko napetost na meji tečenja, vsiljene strižne deformacije morda niso zadostne, da bi povzročile tečenje celotne mase materiala v reometru. Formira se t.i. območje mirovanja. Meja med materialom, ki teče in tistim, ki miruje, se imenuje mrtvi radij in se izvednoti za vsako meritev posebej, iz rezultatov preiskav (poglavje 6.3).

Rezultat preiskave

Zveze, ki smo jih uporabili za vrednotenje preiskav v tej nalogi, so zaradi boljše sledljivosti in preglednosti podane v poglavju 6.3, v splošnem pa so odvisne od geometrijskih parametrov senzorskega sistema (Zupančič-Valant, 2007). V tem poglavju zvez za posamezne tipe senzorskih sistemov (Slika 2.24) ne bomo navajali.

Rezultate reometriških preiskav lahko prikazujemo grafično, v soodvisnosti strižna napetost (τ) – strižna hitrost ($\dot{\gamma}$), viskoznost (η) – strižna hitrost ($\dot{\gamma}$) ali viskoznost (η) – strižna napetost (τ). Shematsko je rezultat meritve v obliki soodvisnosti strižna napetost – strižna hitrost, prikazan na Sliki 2.25. Na Sliki 2.25 je shematsko prikazano tudi, kako iz tokovnih krivulj, določimo parametre Binghamovega modela (Binghamovo napetost na meji tečenja, τ_y in Binghamovo plastično viskoznost, η_p).



Slika 2.25: Shematski prikaz rezultatov reoloških meritev v laboratoriju, prirejeno po Jeong et al. (2010).

Figure 2.25: Schematic view of flow behavior observed in laboratory, adapted after Jeong et al. (2010).

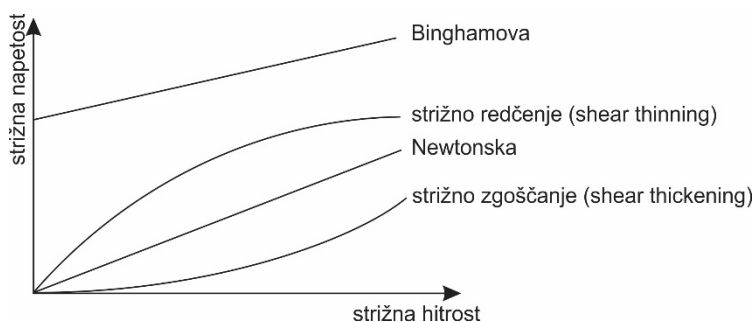
Reološke parametre lahko neposredno uporabimo v numeričnih izračunih z ustreznim programskim orodjem. Za izračun pomikov plazu Slano blato sta Fifer Bizjak in Zupančič (2009) npr. uporabili komercialni program FLAC.

Iz grafičnega prikaza soodvisnosti strižne napetosti in strižne hitrosti, lahko prepoznamo t.i. reološko različne tipe tekočin. Osnovni tipi tokovnih krivulj so prikazani na Sliki 2.26 (Jeong, 2006; Zupančič-Valant, 2007 in drugi).

Povezava reoloških parametrov z nekaterimi drugimi količinami

Napetost na meji tečenja lahko izračunamo iz tokovnih krivulj, ali pa jo direktno izmerimo z uporabo krilne sonde (Liddel in Boger, 1996). Terzaghi et al. (1996) je napetost na meji tečenja definiriral kot

maksimalno strižno napetost, ki jo zemljina lahko prevzame v nedreniranih pogojih, ne da bi prišlo do velikih nepovratnih deformacij.



Slika 2.26: Osnovni tipi tokovnih krivulj (Jeong, 2006).

Figure 2.26: Principal flow types (Jeong, 2006).

V geotehniko za določanje nedrenirane strižne trdnosti (c_u) uporabljamo postopek meritve s krilno sondo (ASTM, 2016). Locat in Demers (1988) sta analizirala napetost na meji tečenja neobčutljivih glin, merjeno v reometru in nedrenirano strižno trdnost, določeno s švedskim konusom. Ugotovila sta, da obstaja med napetostjo na meji tečenja in nedrenirano strižno trdnostjo pregnetenih preizkušancev, v logaritemski soodvisnosti, linearna zveza. Zaključimo lahko, da nedrenirana strižna trdnost in napetost na meji tečenja, merjeni s krilno sondo na enakih preizkušancih (enako vlažnih, pregnetenih), opisujeta podobno materialno lastnost.

Napetost na meji tečenja lahko povežemo tudi s kritično napetostjo za vrednotenje erozije (angl. *bed shear stress*), saj sta obe neposredno povezani s trdnostjo materiala (Berlamont et al., 1993).

Migniot (1968) je ugotovil, da je kritična napetost za sprožitev erozije (τ_b) manjša od napetosti na meji tečenja (τ_y). Na podlagi rezultatov raziskav različnih sedimentov, je podal empirični relaciji za zemljine z visoko napetostjo na meji tečenja (2.29) in za tiste z nizko (2.30) (povzeto po Dade et al. (1992)).

$$\tau_b \approx 0.25 \cdot \tau_y \quad \tau_y > 1.6 \text{ Pa} \quad (2.29)$$

$$\tau_b \approx (0.1 \cdot \tau_y)^{0.5} \quad \tau_y < 1.6 \text{ Pa} \quad (2.30)$$

Otsubo in Muraoka (1988) sta za koherentne sedimente definirala dve napetosti: (1) τ_{b1} je mejna vrednost strižne napetosti, pri kateri se delci sedimenta ločijo (2.31) in (2) τ_{b2} mejna vrednost strižne napetosti, pri kateri pride do porušitve sedimenta, večji delež sedimenta voda odplakne (2.32).

$$\tau_{b1} \approx 0.27 \cdot \tau_y^{0.56} \quad (2.31)$$

$$\tau_{b2} \approx 0.79 \cdot \tau_y^{0.94} \quad (2.32)$$

Otsubo in Muraoka (1988) tudi poročata, da je τ_b , izračunana po Migniot (1968), enakovredna τ_{b1} .

2.9 Izboljšanje lastnosti sedimentov z dodatki

V poglavju 2.2.1 smo obravnavali možnosti koristne rabe sedimentov iz vodnih okolij, ki je v t.i. družbi »brez odpadka« (angl. *zero waste*) postala skoraj pravilo. Sedimenti iz vodnih okolij vsebujejo prebitne količine vode, zato njihova uporaba v geotehniki, brez predhodnega sušenja in/ali izboljšanja z dodatki, ni možna.

Dodatno odvodnjevanje morskih sedimentov, ki vsebujejo sol, s postopki sušenja, je dolgotrajen proces. Osmotska sukucija zavira evaporacijo, suha skorja pa ovira prodiranje sušenja v globino (poglavje 2.7.2 in 2.7.3). V tem poglavju bomo podali kratek pregled možnosti izboljšanja sedimentov z organskimi in anorganskimi dodatki.

2.9.1 Organski dodatki - flokulanti

Raba organskih polimerov se je v svetu v zadnjih 50 letih močno povečala in razširila tudi na področje izboljšanja lastnosti zemljin. Ker lastnosti zemljin niso enovite, so bile izvedene obsežne raziskave možnosti rabe organskih polimerov kot dodatkov za stabilizacijo, razviti pa so bili tudi novi, namenski polimeri (Brandt, 1972; Mouldenhauer in Gabriels, 1972; Kinter, 1975; Chamberlain, 1988; Boodt, 1993; Lahalih in Ahmed, 1998 in drugi).

Izbira dodatkov za izboljšanje lastnosti sedimentov je odvisna od lastnosti sedimenta, zato splošnih pravil ni. Organski dodatki (polimeri) delujejo kot flokulanti in se lahko dodajajo takoj po črpanju ali pred usedanjem. Suspenzijo s primešanim organskim flokulantom, transportirajo v geočrevesa (angl. *geotube*), iz katerih se presežna voda odcedi (Mastin et al., 2007 in drugi).

V Sloveniji je raba flokulantov za izboljšanje lastnosti muljev v široki rabi na čistilnih napravah in v industrijskih muljih, pri sedimentih pa je še v povojih. Poskus izboljšanja lastnosti sedimenta z dodajanjem organskih flokulantov je bil izveden v Luki Koper, na refulu, odloženem v akumulaciji. Izvajalci, podjetje IS, okoljske storitve in tehnologija, d.o.o iz Velenja, so na izbrani kaseti postavili črpalko, s katero so črpali reful iz globine pod suho skorjo v prenosni rezervoar, v katerem so refulu primešali flokulant. Nastalo zmes so prečrpali v geočrevo, iz katerega je voda prosto odtekala (Slika 2.27).



Slika 2.27: Geočrevo, napolnjeno z refulom z dodanim flokulantom (foto: arhiv KMTAL).

Figure 2.27: Geotube, filled with mixture of dredged marine sediment and flocculant (photo: archive KMTAL).

Po skoraj 1 letu izpostavljenosti geočrevesa zunanjim vplivom smo z vizualnim ogledom ugotovili, da je material v notranjosti precej tog in suh. Za ovrednotenje uspešnosti izboljšanja lastnosti z rabo organskih polimerov bi bilo nujno izvesti raziskave lastnosti mešanice iz geočrevesa.

2.9.2 Anorganska veziva

Področje rabe anorganskih veziv za hidravlično vezane zmesi in izboljšanje zemljin je v EU in v Sloveniji urejeno s standardi in Tehničnimi specifikacijami. Apno so kot dodatek zemljinam uporabljali že pred več kot 2000 leti, med drugim pri gradnji Kitajskega zidu. Apno deluje kot flokulant, saj prebitni Ca^{2+} ion zmanjšuje negativni naboj na površini zrn glin, hkrati pa se pri eksotermni reakciji zemljina suši.

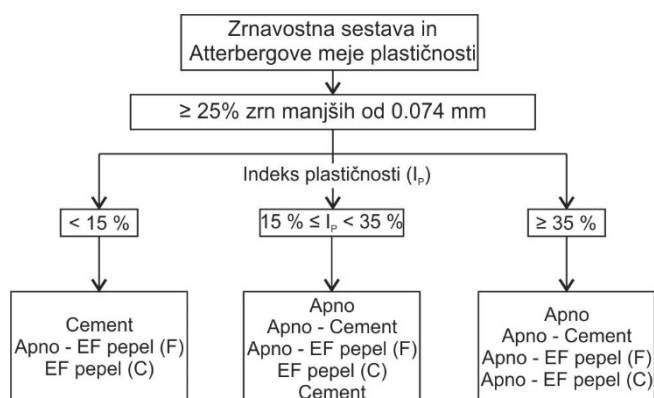
Zaradi pomanjkanja kvalitetnih surovin in viškov lokalnega izkopenega materiala je bila apnena stabilizacija masovno uporabljena pri gradnji avtoceste med Vučjo vasjo in Cogetinci. Volumsko neobstoje gline so bile stabilizirane z dodatkom apna in vgrajene v nasipe. Tudi na Dolenjskem so bili nasipi mestoma grajeni iz stabiliziranih visoko plastičnih kraških glin. O rezultatih laboratorijskih raziskav stabiliziranih mešanic, o dolgoročnem obnašanju nasipov iz stabiliziranih zemljin in o vzrokih poškodb na vozišču so poročali Petkovšek (2006b), Petkovšek et al. (2008a), Maček et al. (2010a, 2010b, 2013b, 2016).

Podobno kot pri izboljšanju zemljin, tudi za izboljšanje lastnosti sedimentov z dodatki anorganskih veziv, ni enoličnih rešitev. Ingles in Metcalf (1972) sta zapisala: »Generally, stabilization-solidification is not a magic wand by which every geotechnical properties can be improved for better«. Z dodatki anorganskih veziv lahko sediment izboljšamo (angl. *improvement*), stabiliziramo (angl. *stabilisation*) ali solidificiramo (angl. *solidification*). USEPA (1993) obravnava kombinacijo solidifikacije in stabilizacije kot en postopek, s katerim se zmanjša izluževanje onesnaževal, hkrati pa se sedimentu zviša tlačna trdnost, zmanjšata pa se mu stisljivost in prepustnost. Iz geotehničnega vidika lahko z ustreznim izboljšanjem, solidifikacijo in/ali stabilizacijo, iz sedimentov, ustvarimo material, ustrezen za temeljenje objektov ali vgradnjo v konstrukcijske nasipe (Sherwood, 1993; Maher et al., 2004; Siham et al., 2008; Garbin, Jr. et al., 2011; Amiralian et al., 2012 in drugi).

Izbira veziv in ciljni parametri, ki jim mora zadostiti izboljššan material, so v prvi vrsti odvisni od namena rabe in klimatskih pogojev na lokaciji. Dobrih praks zato ni možno neposredno prenašati iz različnih geoloških in klimatoloških okolij.

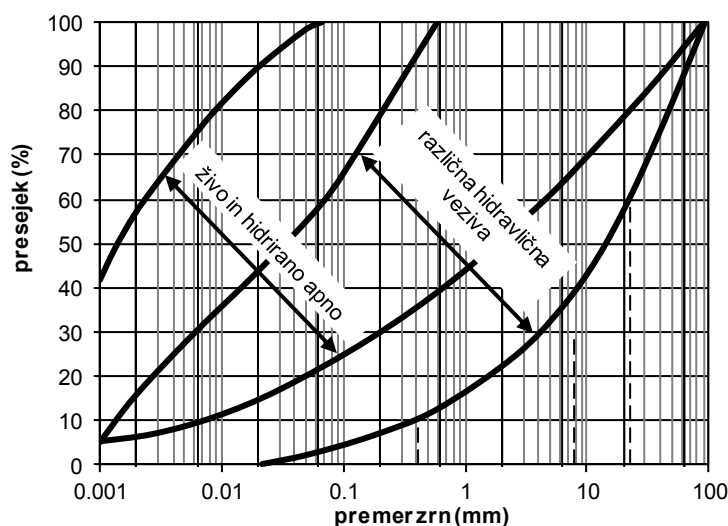
Cement, apno in elektrofiltrski (EF) pepel so najbolj pogosto uporabljena anorganska veziva za izboljšanje lastnosti sedimentov (Siham et al., 2008; Silitonga et al., 2009; Wang et al., 2012 in drugi). Ustrezno vezivo za določeno vrsto materialov lahko okvirno določimo na podlagi indeksnih lastnosti materiala (zrnastostne sestave in indeksa plastičnosti). Odločitveni diagram, povzet po Navodilih za modifikacijo in stabilizacijo zemljin in podlage v cestogradnji (Texas Department of Transportation, 2005; Little in Nair, 2009), je prikazan na Sliki 2.28, diagram izbire veziv, glede na zrnastostno sestavo zemljine pa na Sliki 2.29. Za izboljšanje lastnosti sedimentov lahko uporabimo tudi druge

anorganske materiale, ki imajo pucolanske lastnosti in jih diagram na Sliki 2.28 ne obravnava (npr. papirniški pepel, žlindro,...) in kombinacije veziv.



Slika 2.28: Izbira veziv na podlagi indeksnih lastnosti zemljine (Texas Department of Transportation, 2005).

Figure 2.28: Selection of binders based on soil index properties (Texas Department of Transportation, 2005).



Slika 2.29: Izbira veziv na podlagi zrnavostne sestave zemljine (BV Kalk, 2004).

Figure 2.29: Selection of binders based on the grain size distribution of soil (BV Kalk, 2004).

Načrtovanje stabilizacijskih mešanic sestoji iz 4 glavnih faz: (1) celovita karakterizacija sedimenta, (2) karakterizacija veziv, če izhajajo iz alternativnih virov (EF pepel, žlindra,...), (3) določitev kriterijev, ki jih mora izpolnjevati stabiliziran material za določen namen rabe, vključno s pogoji okolja in (4) določitev ustreznega deleža veziva ali kombinacije veziv, glede na rezultate faze (1) in (2) in pogojev v fazi (3). Omejitve pri uporabi veziv predstavljajo sulfidi ali sulfati in organske snovi, prisotne v zemljinah.

Sedimenti iz vodnih okolij imajo visoko vlago. Dosežena trdnost izboljšane materiala, ki je eden merodajnih parametrov rabe mešanice v geotekhniki, pa je obratno sorazmerna vodovezivnemu razmerju (Lorenzo in Bergado, 2004; Boutouil in Levacher, 2005). Sedimente lahko stabiliziramo pri njihovi naravni vlagi, ali po ustreznem znižanju deleža vode. V prvem primeru je potreben dodatek veziva večji, z večjim dodatkom veziva pridobimo dodatne volumne, vezivo pa deluje tudi kot

adsorbent. Mešanice, preiskane v sklopu te naloge, so bile pripravljene iz osušenega refula in iz refula, ki smo mu v laboratoriju iztisnili porno vodo.

Avtorji poročajo tudi o dveh metodah priprave mešanic: (1) mešanje v suhem – posušenemu, predrobljenemu sedimentu dodamo suho vezivo. Po homogenizaciji mešanici dodamo želeno količino vode in (2) mešanje v mokrem – vlažnemu sedimentu homogeno vmešamo želeno količino veziva (Siham et al., 2008; Rekik in Boutouil, 2009; Silitonga et al., 2009 in drugi).

Izboljšanje fizikalno mehanskih lastnosti sedimentov po dodatku veziv se določa eksperimentalno. Zemljini z znanimi indeksnimi lastnostmi se dodaja vezivo v različnih masnih razmerjih (običajno 5), nato pa se preverjajo učinki, največkrat z določanjem tlačne trdnosti in deformabilnosti.

Učinki dodajanja veziv so hitri in dolgoročni. Hitri učinki se kažejo v znižanju vlage in spremembi maksimalne suhe gostote. Dolgoročni učinki se kažejo v časovnem pridobivanju tlačne trdnosti, ki je lahko posledica cementacije (hidravličnih reakcij) ali tvorjenja produktov cementacije zaradi reakcij med minerali v zemljini in vezivu.

2.10 Znižanje vlage

Ločevanje trdnine in tekočine lahko poteka na način sedimentacije, filtracije ali s centrifugiranjem. Mehansko ločevanje je možno samo, kadar se fazi, ki ju želimo ločiti, ne mešata oz. imata različno gostoto.

Sedimentacija je proces prostega usedanja delcev, ki običajno poteka kadar je gravitacijska sila večja od sile upora okolišnje tekočine. Prosto usedanje delcev opišemo s Stokesovim zakonom.

Centrifugiranje je postopek, pri katerem se za ločevanje trdne in tekoče faze izkoriščajo težnostne in centrifugalne sile, ki so bistveno višje od težnostnih. Z vrtenjem povzročimo premikanje trdnih delcev, ki imajo višjo gostoto od suspenzije, skozi suspenzijo, stran od osi vrtenja. Trdni delci se nabirajo na obodu ali na dnu posode, odvisno od načina delovanja centrifuge (Tarleton in Wakeman, 2006). S centrifugo se ločujejo peščeni delci od glinenih.

S filtracijo lahko, z različnimi poroznimi mediji (filtri), ločujemo trdne delce in tekočino ali dve tekočini. V nadaljevanju se bomo omejili na ločevanje trdnih delcev in tekočine. Grobo lahko postopke filtracije razdelimo v tri skupine, glede na mehanizem filtriranja: (1) globinska filtracija (angl. *deep bed, depth filtration*), (2) membranska (obtočna) filtracija (angl. *membrane filtration / crossflow filtration*) in (3) filtracija skozi pogačo, vakuumska ali tlačna (angl. *cake filtration*). Pri globinski filtraciji se delci (običajno velikosti 300 do 5000 μm) ujamejo v filtru, ki je večjih dimenzij in je lahko peščen, iz oglja, ali iz drugih materialov. Pri membranski filtraciji se vstopna suspenzija razdeli na permeat (čisto vodo) in retentat (močno koncentrirano odpadno vodo) (Holdich, 2002). Predstavljen način filtracije za sedimenta, ki sta predmet te naloge, nista primerna, zato se bomo v nadaljevanju naloge omejili na tlačno filtracijo skozi pogačo, ki se v Cinkarni Celje že od leta 2008 uspešno izvaja, na suspenziji refula pa so bili izvedeni prvi laboratorijski poskusi (Kemijski inštitut).

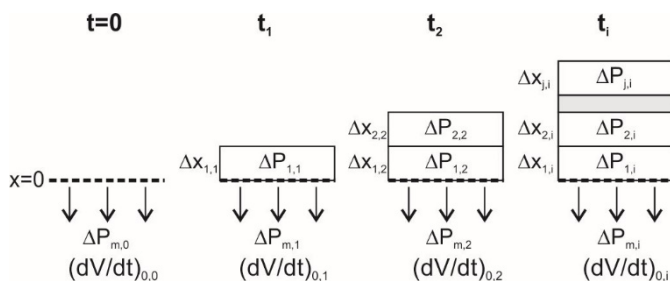
Osnovna filtracijska enačba (2.33), ki smo jo uporabili v izračunih tlačne filtracije, povezuje čas filtracije (t), prostornino filtrata (V), viskoznost tekočine (filtrata) (η), površino filtra (A), koncentracijo suspenzije (c), tlačno razliko (ΔP), upornost filtrskega kolača (α) in upornost filtra (R_m), ki ga lahko v izračunih zanemarimo (Wakeman in Tarleton, 1999).

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot c}{A^2 \cdot \Delta P} \cdot V + \frac{\eta \cdot R_m}{A \cdot \Delta P} \quad (2.33)$$

Teoretično ozadje izračunov in način določitve parametrov v izračunih, je zaradi boljše sledljivosti podano v poglavju 10.2. Za filtrski kolač se privzame, da je homogen, zato so upoštevane povprečne lastnosti (vodoprepustnost...).

Poleg osnovnih enačb filtracije, ki smo jih uporabili v tej nalogi, je za tlačno filtracijo razvitih tudi nekaj bolj kompleksnih (nelinearnih) modelov, s katerimi lahko simuliramo nastajanje filtrskega kolača (Wakeman, 1981; Stamatakis in Tien, 1991; Theliander in Fathi-Najafi, 1996; Ni et al., 2006, in drugi).

Za razliko od linearnega modela, kjer privzamemo povprečne vrednosti lastnosti kolača, v nelinearnem modelu upoštevamo lastnosti posameznih slojev filtrskega kolača. Idejo in osnovni princip izračunov, opisano v nadaljevanju, smo povzeli po Theliander in Fathi-Najafi (1996) (Slika 2.30).



Slika 2.30: Model formiranja filtrskega kolača pri tlačni filtraciji, prirejeno po Theliander in Fathi-Najafi (1996).

Legenda: $\Delta P_{m,i}$ – upad tlaka na filtru v času i , $\Delta P_{j,i}$ – upad tlaka na j -ti plasti filtrskega kolača, v času i , $\Delta x_{j,i}$ – debelina j -tega sloja filtrskega kolača, formiranega v času i .

Figure 2.30: Model of the cake formation during pressure filtration, adapted after Theliander and Fathi-Najafi (1996). Legend: $\Delta P_{m,i}$ – pressure drop across the filter medium at the time i , $\Delta P_{j,i}$ – pressure drop across the j – layer of the filter cake, at the time i , $\Delta x_{j,i}$ – the thickness of j – layer of the filter cake, formed in the time i .

V modelu je privzet konstanten tlak stiskanja. V začetnem času ($t=0$), na filtru ni kolača, zato filtrat teče samo skozi filter. Po kratkem času (t_1) se na filtru formira prva plast kolača ($\Delta x_1(t_1)$), hkrati pa odteče volumen filtrata, ki ga lahko označimo z V_1 . Zaradi plasti kolača na filtru se zmanjša tok filtrata. Z nadaljnjim formiranjem plasti kolača, ki se sprimejo s predhodnimi, se te dodatno stiskajo. Zmanjšuje se poroznost plasti kolača, specifična upornost kolača pa narašča. V izračunih so upoštevane lastnosti vsake formirane plasti, v splošnem pa se z vsako dodatno formirano plastjo kolača ustrezno zmanjša tok filtrata. Avtor iz primerjave izračunanih in merjenih vrednosti ugotavlja, da je možno simulirati nastajanje filtrskega kolača, z modelom nastajanja plasti. Ugotovil je dobro

ujemanje izračunane in merjene spremembe tlaka in odstopanje v specifični upornosti (Theliander in Fathi-Najafi, 1996).

Splošno velja, da je potrebno učinke filtracij preverjati na pilotnih poligonih. Učinki filtracije suspenzije sadre, izvedene na realni filtrski stiskalnici, so prikazani v Preglednici 2.7, učinki filtracije refula, raziskani na laboratorijski pilotni napravi pa v Preglednici 2.8.

Preglednica 2.7: Rezultati tlačne filtracije suspenzije sadre (Petkovšek, 2009).

Table 2.7: Results of pressure filtration of red gypsum slurry (Petkovšek, 2009).

Izvedba poskusa mesec / leto	Čas ožemanja s	Tlak bar	Vlaga kolača, w_k %
3/2008	120	13.5	39.70
	120	13.5	39.79
	120	13.5	38.05
4/2008	120	13.5	45.16
	120	13.5	46.23
	120	14.0	43.89
	120	14.0	39.59
	120	14.0	40.35
	180	14.0	42.26
	180	14.0	44.22
	120	14.0	41.70
	120	14.0	44.20
	240	15.0	41.70
	120	15.0	48.20
	180	15.0	43.28
	240	15.0	40.43
	300	15.0	38.64
	360	15.0	34.63
420	15.0	32.48	
480	15.0	32.83	

Preglednica 2.8: Rezultati tlačne filtracije suspenzije refula (Kemijski inštitut).

Table 2.8: Results of pressure filtration of dredged marine sediment suspension (Kemijski inštitut).

Volumen filtrata, $V_{filtrata}$ L	Tlak bar	Test 1, čas min	Test 2, čas min
0.2	5	0.6	/
0.3		1.3	/
0.4		2.33	2.72
0.5		3.7	4.33
0.6		5.5	6.33
0.7		7.6	11.28
0.8		10.28	14.38
0.9		13	17.8
1.0		16.33	26.1
1.1		19.9	31.58
1.2		24.6	36.65
1.3		29	41.83
1.4		34.02	50.07
1.5		/	58.63
1.6		/	71.8

3 MATERIALI V RAZISKAVI

3.1 Uvod

Raziskali smo mulje, ki se kopičijo v morskih plovnih poteh v Luki Koper in izvirajo iz eksogenih procesov v naravnem geološkem zaledju in mulje kemične sadre, ki so uskladiščeni za visoko pregrado Za Travnikom pri Celju in nastajajo kot stranski produkt pri proizvodnji titanovega dioksida v Cinkarni.

V Luki Koper letno izkopljejo in v zadrževalnih bazenih, zgrajenih za nizkimi zadrževalnimi nasipi, odložijo približno 80 000 m³ refula (Luka Koper, 2015). Morebitna porušitev zadrževalnih nasipov, zaradi njihove majhne višine in velike razlivne površine ne predstavlja tveganja, da bi akumulacije refula v Luki uvrstili v 3. kategorijo objektov po Evrokod 7. Predvideva se, da bodo v naslednjih nekaj letih morali v Luki rešiti ravnanje s ca. 3 MIO m³ refula.

V Cinkarni proizvedejo letno ca 300 000 m³ sadre. Od leta 1970 so mulj sadre odlagali v sedaj zaprto akumulacijo Bukovžlak, od leta 1991 dalje pa v akumulacijo Za Travnikom. Obe akumulaciji sta bili ustvarjeni za dvema visokima nasutima zemeljskima pregradama, ki sta z gradbeno višino ca. 40 in ca. 50 m hkrati najvišji zemeljski pregradi v Sloveniji. Zaradi velikih višin pregrade in velikih zadrževalnih volumnov, sodita obe pregradi med velike pregrade, oba objekta, skupaj z akumulacijo pa med objekte visokega tveganja.

3.2 Reful

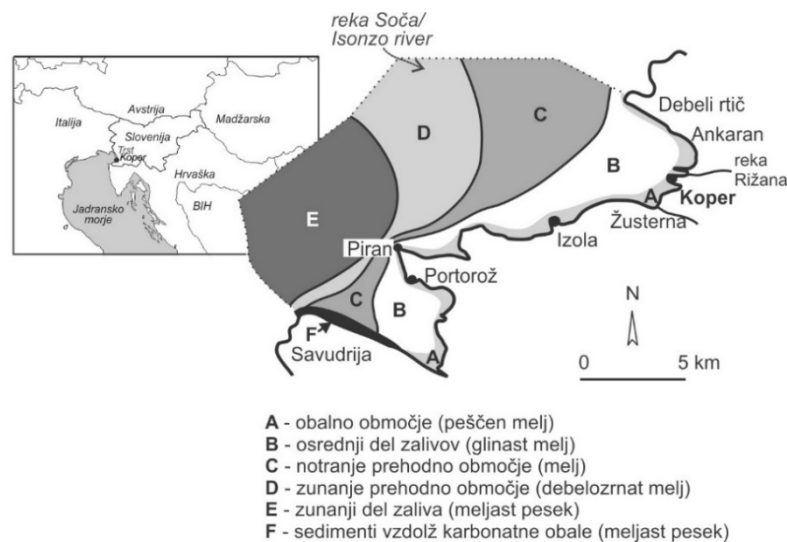
3.2.1 Geološke značilnosti lokacije

Koprski zaliv predstavlja zaprt jugovzhodni del Tržaškega zaliva, ki je najsevernejši del Jadranskega morja. Na severozahodu se Koprski zaliv odpira v Tržaški zaliv, na vzhodu pa prehaja v dolino reke Rižane (Slika 3.1). Predkvartano podlago v zalivu in vplivno zaledje na kopnem gradijo eocenske flišne kamnine (peščenjaki, laporji) (Placer et al., 2004).

Geomorfološko je Koprski zaliv potopljena široka dolina reke Rižane. Podmorski relief kaže, da je zaliv 15 do 20 metrov globoka podvodna ravnica z dokaj strmo obalo iz flišnih kamnin. Reka Rižana in potok Badaševica sta glavna vira vnosa sedimenta v Koprski zaliv. Vnos totalnega suspendiranega sedimenta (TSS) v zaliv z reko Rižano lahko ob povprečnem pretoku 4 m³/s in z upoštevanjem povprečne koncentracije TSS v rečni vodi 22 mg/l, ocenimo na 28×10³ t/leto. Večje delce reka odlaga v reko in ob njenem ustju, drobnejši delci pa potujejo naprej v zaliv. (Ogorelec et al., 1987)

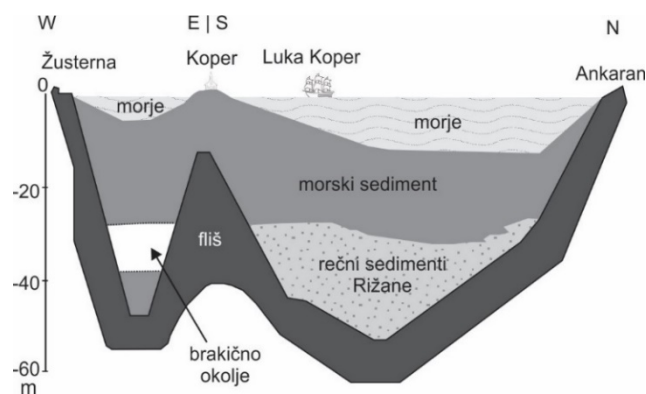
Kvartarni morski sedimenti v osrednjem delu Tržaškega zaliva dosega do debelino do 230 m (Morelli in Mosetti, 1968). V priobalnem območju Koprškega zaliva so debeline plasti teh sedimentov približno 40 m. Danes sedimentacijski bazen zapolnjujejo predvsem sedimenti iz flišnega zaledja, zrnivosti od gline do drobnega peska (Slika 3.1) (Ogorelec et al., 1991).

Na Sliki 3.2 je prikazan sedimentološki prerez Koprškega zaliva, določen na podlagi vrtin. Rekonstrukcija paleookoljskih razmer v času pleistocena je bila izvedena z geokemijskimi analizami vrtin in je pokazala, da je na globini približno 26 do 36 m pod sedanjo morsk gladino brakično okolje. Ta nivo časovno ustreza nivoju pred približno 9000 leti; obdobju splošne morske transgresije na prehodu iz würma v holocen (Ogorelec et al., 1997; Ogrinc et al., 2007a, 2012).



Slika 3.1: Koprski zaliv s prikazano porazdelitvijo površin sedimentov (Ogorelec et al., 1991).

Figure 3.1: Distribution of marine sediments inside the Bay of Koper (Ogorelec et al., 1991).



Slika 3.2: Sedimentološki prerez Koprškega zaliva (Ogorelec et al., 1997).

Figure 3.2: Sedimentological cross-section of the Bay of Koper (Ogorelec et al., 1997).

3.2.2 Zgodovina geološko geotehničnih raziskav na območju Luke Koper

Prve geomehanske raziskave in situ sedimenta v Koprskem zalivu so bile izvedene leta 1957, ko se je pričel razvoj Luke Koper. Zaradi zelo zahtevnih pogojev gradnje infrastrukture je bilo treba že zelo kmalu po izgradnji prvih operativnih obal poiskati rešitve, ki so omogočale nadaljnji razvoj Luke. Za ključne geotehnične rešitve je bil vse od začetka razvoja pristanišča odgovoren profesor Ivan Sovinc. V takrat razmeroma slabo raziskanih, težkih pogojih, je vselej poiskal rešitve za temeljenje luške infrastrukture. Prof. Sovinc in dr. Vogrinčič sta utemeljila tehnološke rešitve gradnje, ki so v Luki, oplemenitene z novimi znanji, materiali in tehnologijami, v uporabi še danes.

Večji del današnjih približno 272 ha kopnih površin, namenjenih pretovoru, skladiščenju in transportu v Luki, je bilo iztrganih morju. Za potrebe načrtovanja novogradenj, je bilo na območju Luke do danes izvrtanih preko 560 vrtin. Na podlagi podatkov iz vrtin so bili izdelani karakteristični geološko geotehnični prerezi in izdelane karte z izolinijami globin pojavljanja značilnih geoloških plasti: flišne podlage, prodno peščenih nanosov reke Rižane in mehkih morskih glin. Značilen profil tal v Luki Koper, sestavlja podlaga iz eocenskega fliša na koti med -30 in -60 m. Prekriva jo nekaj metrov debel sloj flišne preperine, na katerem so različno debeli sloji prodnih in peščenih nanosov reke Rižane, ki so na določenih mestih prekinjeni z do 5 m debelimi sloji gline. Na sloj rečnih sedimentov je odložen sloj mehkih morskih glin, sive barve, ki sega do kote približno -26 do -30 m. Med slojem morskih sedimentov in podlago je običajno sloj organske zemljine in šote (Sovinc et al., 1985; Sovinc, 1993, 1994; Sovinc in Vogrinčič, 1994; Ogorelec et al., 1997; Logar et al., 2007; Logar in Kuder, 2007; Kuder in Logar, 2008; Robas in Logar, 2008; Logar, 2010a, 2010b).

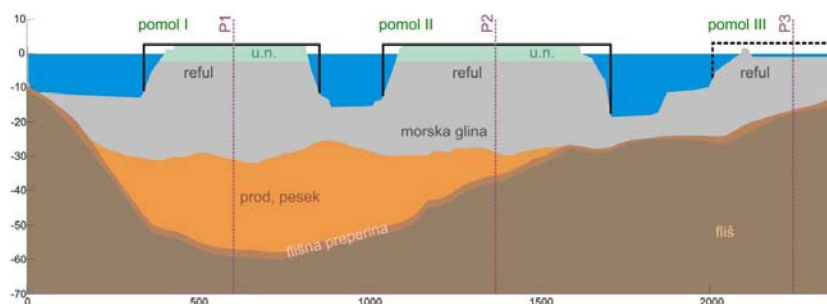
Za potrebe načrtovanja gradbenih projektov je dominanten sloj mehkih morskih glin, ki vpliva na stabilnost, posedanje tal in interakcijo na novo grajenih objektov s sosednjimi, že obstoječimi objekti. Zato je ta sloj razmeroma dobro raziskan. V Preglednici 3.1 so podane značilne fizikalno mehanske lastnosti morske glin na območju Luke. Nedrenirana strižna trdnost (c_u) narašča z globino, od 15 kPa na globini približno 2 m do 40 kPa na dnu sloja, na globini ca. 25 – 30 m.

Preglednica 3.1: Značilne fizikalno mehanske lastnosti morske glin v Luki Koper (Logar, 2010a).

Table 3.1: Physical properties of marine clay inside the Port of Koper (Logar, 2010a).

Parameter	Vrednost
Prostorninska teža, γ (kN/m ³)	17.0-18.0
Meja židkosti, w_L (%)	61
Indeks plastičnosti, I_P (%)	42
Indeks konsistence, I_C	0.1-0.6
Vlačnost, w (%)	45-50
Strižni kot, φ (°)	24-26
Vodoprepustnost, k (m/s)	10^{-10}

Reful je v primerjavi z in situ sedimentom na območju Luke Koper, z vidika geomehanskih lastnosti, slabše raziskan. Njegove lastnosti so podobne lastnostim mehkih morskih glin, le da je zaradi prečrpavanja bolj heterogen. Menjavajo se tanjši sloji bolj glinastih in bolj meljasto peščenih slojev. Značilni primer gradnje na konsolidiranem refulu je gradnja pomolov I in II, ki sta do kote -10 m zgrajena na refulu (Slika 3.3) (Logar, 2010a).



Slika 3.3: Pomola I in II, zgrajena na konsolidiranem refulu (Logar, 2010a).

Figure 3.3: Piers I and II, built on consolidated dredged marine sediment (Logar, 2010a).

Danes uveljavljena praksa ravnanja z refulom, ki nastane pri poglobljanju plovnih poti in drugih posegih v Luki, je izkopavanje mulja iz morskega dna, mešanje z morskovo vodo do ustrežne konsistence in prečrpavanje suspenzije v za to namensko zgrajene akumulacije – kasete, povprečne globine do 3.5 m, v katerih se trdni delci usedajo, odvečna voda pa odteče nazaj v morje (Slika 3.4). Kasete z refulom trenutno pokrivajo približno 10% kopne površine Luke.

Velike površine na kopnem, prekrite z refulom, ovirajo razvoj in logistične dejavnosti v Luki. Zato se zlasti zadnja leta iščejo nadomestne rešitve v več smereh, vendar do prave realizacije teh še ni prišlo. V dosedanjih poskusih je že bilo izvedeno poskusno ožemanje, poskus solidifikacije z uporabo organskih flokulantov v kombinaciji z rabo geosintetičnih zadrževalnikov tipa geotube in poskusi z izdelavo opeke. Rezultati nobenega od teh poskusov še niso objavljeni v znanstveni ali strokovno dostopni literaturi, prav tako niso finančno ovrednoteni, niti ni bila izvedena analiza življenjskega cikla (LCA).



Slika 3.4: Ena od akumulacij refula (foto: arhiv KMTAL).

Figure 3.4: One of the lagoons with dredged marine sediment (photo: archive KMTAL).

3.2.3 *Okoljska karakterizacija morskega sedimenta in refula*

Sediment v Tržaškem zalivu je z vidika onesnaženja in potencialnih vplivov na okolje zelo dobro raziskan. Reka Soča, ki je glavni sladkovodni vtok v Tržaški zaliv, je v 500-letni zgodovini rudarjenja v Idriji in Rablju, v zaliv prinesla približno 2160 ton živega srebra (Žagar et al., 2006). Vsebnost živega srebra, razporeditev in transport v morskem in obalnem sedimentu, so raziskovali in modelirali številni raziskovalci (Barbier et al., 1999; Horvat et al., 1999; Širca et al., 1999; Hines et al., 2000; Covelli et al., 2001, 2006, 2007; Faganeli et al., 2003; Ogrinc et al., 2007b; Rajar et al., 2007; Žagar et al., 2007; Foucher et al., 2009; Kotnik et al., 2015 in drugi).

Faganeli et al. (1991), Adami et al. (2000), Notar et al. (2001), Heath et al. (2006), Ščančar et al. (2006), Cibic et al. (2008) in Acquavita et al. (2010) so raziskovali onesnaženje in-situ sedimenta s težkimi kovinami, policikličnimi aromatskimi ogljikovodiki, polikloriranimi bifenili (PCB) in vsebnost organskih spojin. Ugotovili so, da je onesnaženje odvisno od geomorfoloških lastnosti morskega dna (podlage), sedimentacije, antropogenih vplivov in lokalnih hidroloških pogojev (npr. vtok sladke vode).

V okviru Evropskega projekta Safeprot – Program čezmejnega sodelovanja Slovenija – Italija (2007-2013) je bila opravljena celostna študija vplivov in-situ sedimenta na okolje. Raziskana je bila kemijska sestava sedimenta in vodnih izlužkov (ERICO, 2014). Rezultati so povzeti v Preglednicah 3.2 in 3.3.

Preglednica 3.2: Rezultati kemijskih analiz in situ sedimenta in refula iz Luke Koper.

Table 3.2: Results of chemical analysis of the in situ and dredged marine sediment from the Port of Koper.

Parameter	Vzorec					
	in situ sediment plovne poti (ERICO, 2014)	in situ sediment nepoškodovano morsko dno (ERICO, 2014)	referenčna točka, Strunjanski zaliv (Zuliani et al., 2016)	reful, (ZZV, 2011)	reful (Zuliani et al., 2016)	mejne vrednosti (Uradni list RS, 68/96 in 41/04)
suha snov (%)	41.4-59.8	46.8-56.9	/	66.2-66.9	/	ns [§]
As (mg/kg)	15.3-26.9	17.7-23.5	17.5	14-16	14.6-37.6	20
Cd (mg/kg)	<2.0	<2.0	0.100	<0.5	0.311-0.391	1
Cr (mg/kg)	/	/	135	/	208-354	100
Cu (mg/kg)	/	/	35.0	/	36.9-44.2	60
Hg (mg/kg)	0.10-0.53	0.19-0.41	0.100	<0.2-0.25	0.266-0.364	0.8
Mo (mg/kg)	/	/	0.86	/	2.22-4.20	10
Ni (mg/kg)	/	/	70	/	136-175	50
Pb (mg/kg)	21.7-40.2	23.1-35.9	25.0	19-35	25.0-36.2	85
Zn (mg/kg)	/	/	90	/	120-191	200
Sb (mg/kg)	/	/	0.60	/	1.50-2.07	ns [§]
Ba (mg/kg)	/	/	162	/	339-398	ns [§]
Se (mg/kg)	/	/	2.0	/	12.7-16.5	ns [§]
Fe (mg/kg)	/	/	33400	/	44200-66500	ns [§]
Al (mg/kg)	/	/	39100	/	55700-63200	ns [§]
Sc (mg/kg)	/	/	15.3	/	15.5-16.1	ns [§]
Rb (mg/kg)	/	/	103	/	130-172	ns [§]
PAO (mg/kg)	<0.10	<0.10	/	<1	/	ns [§]
PCB (mg/kg)	<0.10	<0.10	/	<0.1	/	0.2
PCDD/PCDF (ng/kg)	<500	<500	/	/	/	ns [§]
EOX (mg/kg)	<0.5	<0.5	/	/	/	ns [§]
Mineralna olja (mg/kg)	<50-245	<50-56	/	<10-24	/	50
BTX (mg/kg)	<0.04	<0.04	/	<1	/	ns [§]
Fenoli (mg/kg)	<20	<20	/	<2.5	/	ns [§]
TOC (% suhe snovi)	1.14-2.17	1.19-1.68	/	1.0-1.2	/	ns [§]

ns[§]-mejne vrednosti niso določene, / - parameter ni merjen

Študije izluževanja svinca, cinka, niklja in bakra so bile z navadno (enkratno) in sekvenčno ekstrakcijo, izvedene leta 2005, na refulu iz Škocjanskega zatoka, ki je danes izven območja Luke (Joksič et al., 2005). Rezultati analiz so pokazali, da koncentracije svinca, cinka in bakra ne presegajo mejnih vrednosti (60 mg/kg – baker, 85 mg/kg – svinec in 200 mg/kg – cink), podanih v Uredbi o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh (Uradni list RS, 68/96 in 41/04). Koncentracija niklja je bila višja od predpisane mejne vrednosti 50 mg/kg. Avtorji ne analizirajo vzrokov povišane vrednosti niklja; vemo pa, da so vsebnosti niklja v naravnem geološkem flišnem okolju zelo pogosto višje od predpisanih mejnih vrednosti.

Vrednotenje onesnaženosti refula je v okviru izdelave »Ocene odpadkov morskih sedimentov iz Luških kaset za Luko Koper d.d.«, izdelal Zavod za zdravstveno varstvo Novo mesto (ZZV, 2011). Preiskana sta bila že izkopan in deponiran reful iz bazena I luškega akvatorija in reful, ki je bil izkopan v bazenu II. Zuliani et al. (2016) so objavili rezultate kemijskih analiz refula in njegovih vodnih

izlužkov, primerjalno s kemijskimi analizami sedimenta iz referenčne točke v naravnem rezervatu v Strunjanskem zalivu (Preglednici 3.2 in 3.3). Ugotovili so, da je reful iz lagun obremenjen z aktivnostmi v Luki. Kemijska sestava vodnih izlužkov, ki so v Sloveniji merodajni za vrednotenje inertnosti, je kljub temu ustrezna, zato so ocenili, da se reful lahko uporablja kot alternativni material, ob upoštevanju zadržkov, ki jih predstavljajo soli, prisotne v porni vodi.

Preglednica 3.3: Rezultati kemijskih analiz izlužkov pridobljenih iz in situ sedimenta in refula iz Luke Koper.

Table 3.3: Results of chemical analysis of eluates from in situ and dredged marine sediment from the Port of Koper.

Parameter	Vzorec				mejne vrednosti za inertne odpadke (Uradni list RS, 68/96 in 41/04)
	in situ sediment plovne poti (ERICO, 2014)	in situ sediment nepoškodovano morsko dno (ERICO, 2014)	reful (ZZV, 2011)	reful bazen I, II in III (Zuliani et al., 2016)	
Razmerje tekoče / trdno; (L/S) (l/kg)	10	10	10	10	10
Celotne raztopljene snovi (mg/l)	2330-5540	3040-4820	2078-2190	/	ns [§]
pH	8.0-8.6	8.5	7.3-7.9	/	ns [§]
Sb (mg/l)	0.002-0.004	0.003-0.004	0.0058-0.0073	0.0017-0.0074	0.006
As (mg/l)	0.003-0.007	0.007	0.0047-0.0065	0.0025-0.0042	0.05
Cu (mg/l)	<0.001-0.004	0.002-0.004	<0.007-0.0076	0.0013-0.0019	0.2
Ba (mg/l)	0.003-0.007	0.004-0.006	<0.08-0.61	0.0045-0.0159	2
Be (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.0005	/	ns [§]
B (mg/l)	0.63-1.84	0.710-1.08	1.0-1.1	/	ns [§]
Zn (mg/l)	0.002-0.012	0.006	0.13-0.18	0.0015-0.0020	0.4
Cd (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.0005	0.000034-0.000041	0.004
Co (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.005	/	ns [§]
Sn (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.002	/	ns [§]
celotni Cr (mg/l)	<0.005	<0.005	0.0068-0.0069	0.00023-0.00028	0.05
Cr(VI) (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.01-0.014	/	ns [§]
Mo (mg/l)	0.011-0.137	0.007-0.025	/	0.0234-0.0334	0.05
Ni (mg/l)	0.002-0.011	0.001-0.004	0.0059-0.029	0.0009-0.0043	0.04
Se (mg/l)	<0.010	<0.010	0.01	0.0012-0.005	0.01
Ag (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.001-0.0016	/	ns [§]
Pb (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.005	0.00014-0.0017	0.05
Tl (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.001	/	ns [§]
Te (mg/l)	<0.010-0.011	<0.010	<0.001	/	ns [§]
V (mg/l)	0.004-0.036	0.031-0.036	0.0088-0.013	/	ns [§]
Fe (mg/l)	0.013-0.067	0.024-0.244	/	/	ns [§]
Hg (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.00002	0.001
Cianid (mg/l)	<0.005	<0.005	<0.005	/	ns [§]
Sulfid (mg/l)	<0.04	<0.04	<0.02	/	ns [§]
Fluorid (mg/l)	<1.0	<1.0	<1	0.69-0.95	1
Klorid (mg/l)	1690-3180	1720-2720	/	11.5-1200	80
Sulfat (mg/l)	170-845	262-804	/	160-500	600
Mineralna olja (mg/l)	<10	<10	<0.06	/	ns [§]
PAO (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.001	/	ns [§]
AOX (mg/l)	<0.010-0.056	<0.010-0.011	<0.03-0.033	/	ns [§]
Fenoli (mg/l)	<1	<1	<0.01	/	ns [§]
DOC (mg/l)	3.86-19.8	5.44-11.8	/	/	50

ns[§]-mejne vrednosti niso določene, / - parameter ni merjen

3.2.4 Sedimentacija in sušenje refula v akumulacijah

Velike površine refula so potem, ko transportna voda odteče, izpostavljene sušenju in konsolidaciji v relativno plitvih akumulacijah (kasetah). Med sušenjem se na površini refula v akumulaciji ustvarja suha skorja, katere debelina je do 50 cm in je odvisna od lokacije znotraj akumulacije in od časa izpostavljenosti površine sušenju. Ob brežinah nasipov je debelejša in se praviloma tanjša v smeri proti osrednjemu delu akumulacije. Nižje ležeče plasti pod skorjo so v židkem konsistenčnem stanju. Porna voda je slana, primarni vir slanosti so kloridi, podrejeno tudi ostale soli.

3.3 Mulj sadre

3.3.1 Nastanek

Kemična sadra nastaja kot precipitat, pri nevtralizaciji odpadne žveplene kisline z apnenim mlekom in/ali kalcitno moko, pri proizvodnji titanovega dioksida v Cinkarni. Postopek je stopenjski, v njem se najprej izloči bela sadra ali Cegips, ki se prodaja na trgu, preostali del pa je t.i. rdeča sadra, ki se zaenkrat kot gradbeni proizvod vgrajuje v akumulacijo Za Travnikom.

Od leta 1972 do leta 2008 so redko suspenzijo sadre transportirali po ceveh do nekaj km oddaljenih akumulacij, ustvarjenih za dvema najvišjima nasutima pregradama v Sloveniji: Za Travnikom (višina 45 m) in Bukovžlak (višina 37 m). Iztočna cev je bila nameščena na poseben ponton, tako da je bilo možno premikanje na različne lokacije znotraj akumulacije. Premikanje cevi je bilo potrebno, ker so se tik pod iztokom ustvarjali »nasipni stožci«, rdeča sadra pa je občasno pogledala iz vode.

Zaradi zagotavljanja protiprašne zaščite je med zahtevami soglasodajalcev tudi obvezna stalna vodna ojezeritev v višini ca 1 m nad površino sedimenta.

Leta 2008 so zaradi boljše izrabe deponijskega prostora in zaradi večje varnosti, v Cinkarni prešli na t.i. suho odlaganje. Suspenzijo, ki so jo prej odlagali neposredno v akumulacijo, danes ožamejo na filterških prešah in jo kot filterški kolač odlagajo v že ojezereno akumulacijo (Petkovšek, 2012, 2014; Petkovšek et al., 2012). Z odlaganjem kolača se pospešuje konsolidacija predhodno odloženega mulja, s tem pa se zmanjšujejo količine mulja, ki bi se v primeru porušitve pregrade lahko utekočinil.

Kljub prehodu na suho odlaganje je v akumulacijah za obema pregradama odloženih več milijonov m³ mulja sadre (Slika 3.5), ki bi v primeru porušitve pregrad kot blatni tok odtekel v dolino Ložnice.



Slika 3.5: Pogled na akumulacijo mulja sadre za pregrado Za Travnikom (foto: arhiv KMTAL).

Figure 3.5: View on the accumulation of red gypsum mud behind the high embankment Za Travnikom (photo: archive KMTAL).

3.3.2 Zgodovina raziskav mulja sadre

Začetne raziskave mulja sadre so bile izvedene pred letom 1970 za potrebe načrtovanja akumulacije Bukovžlak. Prvi vzorci so bili pripeljani iz akumulacij v Thannu - Francija, kjer se je uporabljal enak način proizvodnje titanovega dioksida, vendar pa je bila tehnologija odlaganja v Thannu podobna kot v Luki Koper, t.j. odlaganje v plitvih kasetah, v katerih se je nato v semiaridni klimi mulj sušil. Ker je bilo odlaganje mulja sadre v Cinkarni Celje različno od tistega v Thannu, se je kmalu pokazalo, da so bili izračuni volumnov deponij napačni.

Prve raziskave dejanskega stanja mulja v akumulaciji po izgradnji je opravila Petkovškova s sodelavci leta 1982. Rezultati zgoščenosti in trdnosti mulja po globini so se zelo razlikovali od prvotnih napovedi. Ugotovljeno je bilo, da je do globine ca. 10 m pod površino ojezeritve, mulj v stanju suspenzije. S takratnimi postopki meritev ni bilo možno izmeriti nedrenirane strižne trdnosti do te globine.

Nujnost izboljšanja znanj o lastnostih muljev sadre v akumulaciji Za Travnikom se je pokazala po letu 1996, ko so bili storjeni prvi koraki v smeri raziskav za ožemanje mulja in nato po letu 2008, z uvedbo ožemanja in s preходом iz mokrega na suho odlaganje kolača sadre v ojezereni del akumulacije (Petkovšek in Majes, 2007; Petkovšek, 2009, 2014; Petkovšek et al., 2012). Prehod na suho odlaganje kolača sadre je bil ključ za ohranitev proizvodnje titanovega dioksida v Cinkarni Celje.

Kolač in mulj sadre se razlikujeta v vsebnosti vlage, suhe gostote in togosti ter homogenosti plasti, v katerih se nahajata v akumulaciji. Bistvene fizikalno mehanske lastnosti kolača sadre so povzete v Preglednici 3.4 (Petkovšek, 2012, 2014; Petkovšek et al., 2012; Maček et al., 2015).

Preglednica 3.4: Značilne fizikalno mehanske lastnosti filtrskega kolača sadre (Petkovšek, 2014).

Table 3.4: Typical physical properties of the red gypsum filter cake (Petkovšek, 2014).

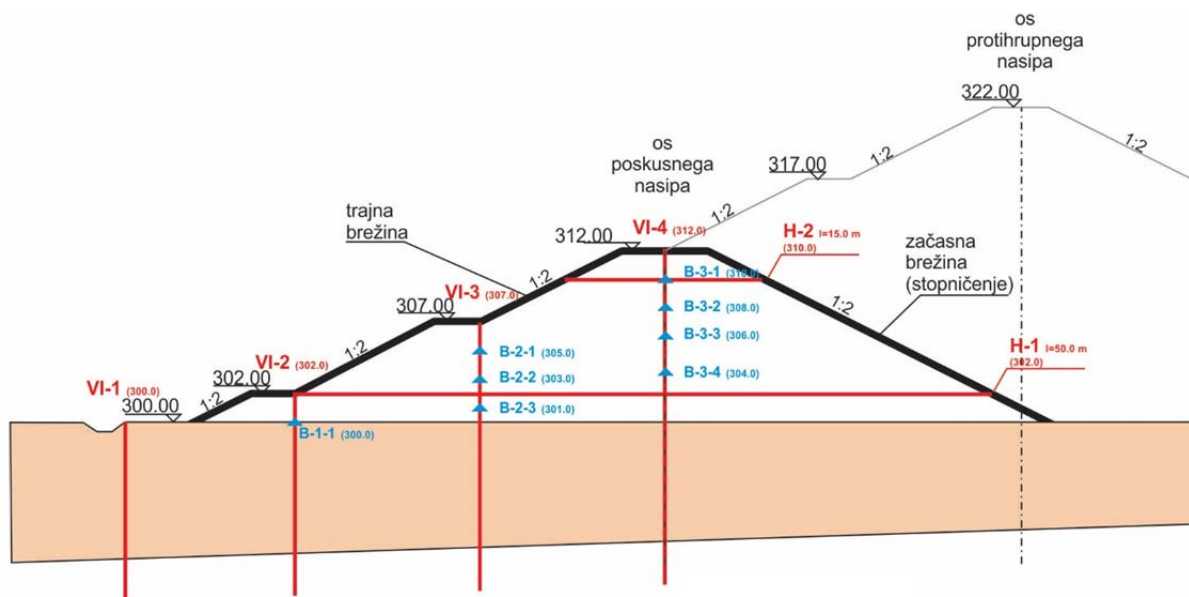
Parameter	Vrednost
Naravna vlaga, w_0 (%)	35-50
Meja židkosti, w_L (%)	46-56
Gostota zrn, ρ_s (t/m^3)	2.36
Indeks plastičnosti, I_p (%)	<11

Optimalna vlaga (SPP), w_{opt} (%)	34
Maksimalna suha gostota (SPP), ρ_{dmax} (t/m ³)	1.24
Drenirana strižna trdnost	strižni kot, $\varphi' = 38-40^\circ$ kohezija, $c' = 28-30$ kPa
Vodoprepustnost, k (m/s)	$10^{-8} - 10^{-9}$

Z raziskavami v laboratoriju je bilo prepoznano izrazito lezenje (angl. *creep*) plasti, zgrajenih iz kolača. Zato je bil na območju suhega odlagališča Za Travnikom leta 2012 zgrajen 125 m dolg, 60 m širok in 12 m visok poskusni nasip (Slika 3.6). Temeljen je na suho odloženem filtrskem kolaču sadre in predstavlja del bodoče protihrupne zaščite, končne višine ca. 25 m (Petkovšek, 2014).

Za spremljanje deformacijskega obnašanja vgrajenega filtrskega kolača sadre sta v veliki tehnološki nasip vgrajena 2 horizontalna inklinometra (HI), 4 vertikalni inklinometri (VI), 8 BAT merilnikov tlaka in 8 površinskih geodetskih točk (Petkovšek, 2014).

Vzporedno s suhim zapolnjevanjem so se leta 2008 pričele izvajati periodične terenske in laboratorijske preiskave mulja v akumulaciji. Vzorci mulja pod suhim nasipom so bili iz vrtine prvič odvzeti leta 2009 (DMT-1) in kasneje še leta 2015 (IN-1/15). Prvi vrtini, vrtani s plavajočega pontona, v ojezerjenem delu akumulacije sta bili izvedeni leta 2013 (TJ-1 in TJ-4), z namenom, da se preverijo lastnosti mulja v akumulaciji. Rezultati raziskav, ki jih v celoti financira Cinkarna Celje, so podani v poročilih o rezultatih raziskav (Maček et al., 2014; Smolar et al., 2015).



Slika 3.6: Prečni prerez poskusnega nasipa iz filtrskega kolača sadre z vgrajeno mersko opremo (Petkovšek, 2014).

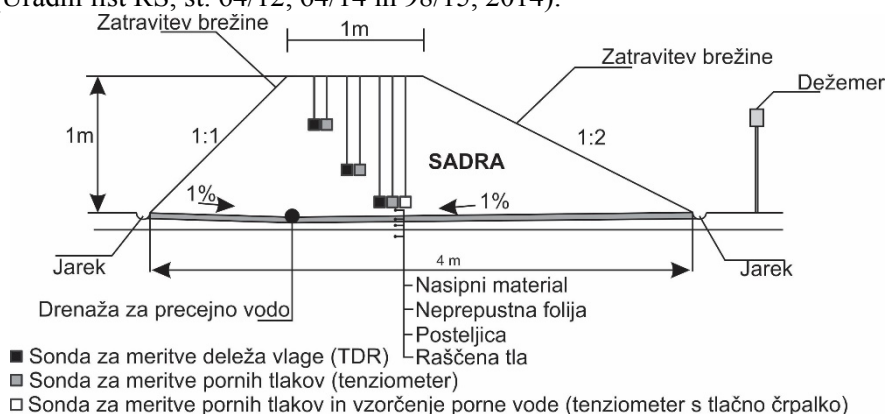
Figure 3.6: Cross-section of the experimental embankment built with red gypsum filter cake with measuring devices (Petkovšek, 2014).

3.3.3 Okoljska karakterizacija sadre

Za spremljanje količine in kakovosti vode, ki teče skozi nasip iz kolača sadre, je bil leta 2011 zgrajen t.i. mali ekološki nasip, ki je tlorisnih dimenzij 4×3 m in visok 1 m (Petkovšek, 2014; Maček et al.,

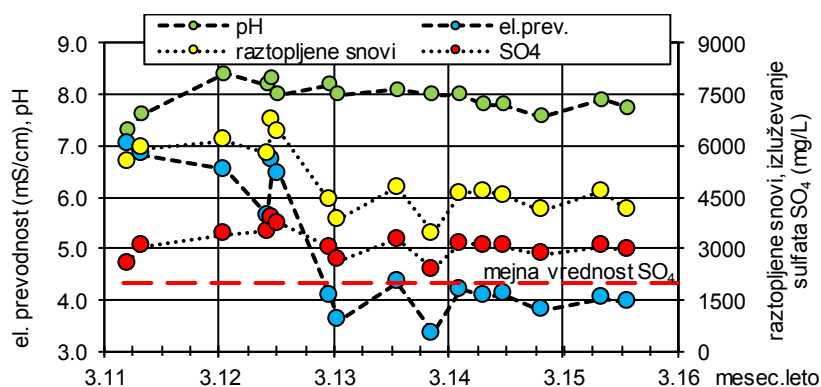
2015). Celotna površina tlorisa nasipa je hkrati tudi neprepustna skleda lizimetra, zatesnjena s PEHD membrano. Na membrano je vgrajena drenažna plast, v kateri je drenažna cev za zbiranje vode, ki teče skozi lizimeter. Vode, ki odtečejo površinsko, preko jarkov ob vznožju brežin nasipa odtečejo v rezervoarje za čisto vodo. V lizimeter so vgrajeni trije merilniki vlage in temperature (TDR) in trije tenziometri (T) (Slika 3.7).

Zaradi visoke topnosti sadre, približno 2 g/l, je v vodi, pronikli skozi lizimeter, tudi po 4 letih opazovanja lizimetra, povišana vsebnost sulfatov (Slika 3.8). Izmerjene vrednosti presegajo mejne vrednosti po Uredbi o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, št. 64/12, 64/14 in 98/15, 2014).



Slika 3.7: Prečni prerez lizimetra iz sadre (Petkovšek, 2014).

Figure 3.7: Cross-section of the lysimeter, built with red gypsum filter cake (Petkovšek, 2014).



Slika 3.8: Rezultati analiz kakovosti vode precejene skozi lizimeter iz sadre, obdobje 2011-2016 (Smolar et al., 2016).

Figure 3.8: Results of chemical analysis of the water, percolated through lysimeter from red gypsum filter cake, period 2011-2016 (Smolar et al., 2016).

3.3.4 Sedanje ravnanje z muljem sadre

Na odlagališču Za Travnikom poteka suho zapolnjevanje od leta 2008. Čelo suhega zapolnjevanja napreduje v ojezerjeni del in ga počasi zapolnjuje. Dokler je v akumulaciji uskladiščen mulj, je pregrada objekt visokega tveganja v primeru porušitve. Pregrada Za Travnikom bo imela status velike pregrade vse dotlej, dokler akumulacija ne bo v celoti na suho zapolnjena, predhodno odloženi mulj pa

konsolidiran do take meje, da bo možnost njegovega utekočinjenja ob potresu ali porušitvi pregrade minimalna. Po sedanji prognozi dogodkov bo takšno stanje doseženo leta 2024. Od stanja mulja v akumulaciji pod vodnim pokrovom sta odvisna način in dinamika približevanja suhega nasipa proti pregradi. Nepremišljeni posegi bi lahko povzročili prelitje mulja čez preliv ali celo porušitev pregrade.

Z vidika tveganja nepredvidenih dogodkov je bolj rizična pregrada Bukovžlak, za katero je uskladiščenih ca. 3.3 MIO m³ mulja. Ne ve se še, kakšni ukrepi bodo sprejeti v nadaljnjih letih v zvezi z akumulacijo Bukovžlak. Raziskave, predstavljene v tej nalogi, sodijo v sklop raziskav za povečanje učinkovitosti suhega odlaganja sadre in zmanjšanja tveganja nenadnega utekočinjenja mulja pod suhim nasipom sadre med odlaganjem.

4 EKSPERIMENTALNE METODE

4.1 Uvod

Lastnosti sedimentov iz vodnih okolij določamo s terenskimi (in situ) in laboratorijskimi preiskavami. Postopke preiskav moramo prilagoditi tako, da prepoznamo njihove specifične lastnosti, ki izvirajo iz zgodovine nastajanja in kopičenja. Kakovost in relevantnost rezultatov laboratorijskih preiskav je odvisna od kakovosti odvzetega vzorca.

Način odvzema vzorcev muljev za laboratorijske preiskave je odvisen od globine (višine) vodnega pokrova, od globine, iz katere želimo odvzeti vzorec in potrebne količine in kakovosti vzorca (neporušen, porušen) in ga moramo prilagajati stanju mulja. V Preglednici 4.1 povzemamo osnovne načine odvzema vzorcev in pripadajočo kakovost vzorca. Po odvzemu moramo vzorce hraniti tesno zaprte v vrečkah, plastičnih ali steklenih posodah, odvzemnih valjih ali črevesih (UNEP, 2006; Sharma in Singh, 2015).

Preglednica 4.1: Odvzem porušjenih in intaktnih vzorcev sedimentov (Sharma in Singh, 2015).

Table 4.1: Sampling of undisturbed and remolded sediment specimens (Sharma and Singh, 2015).

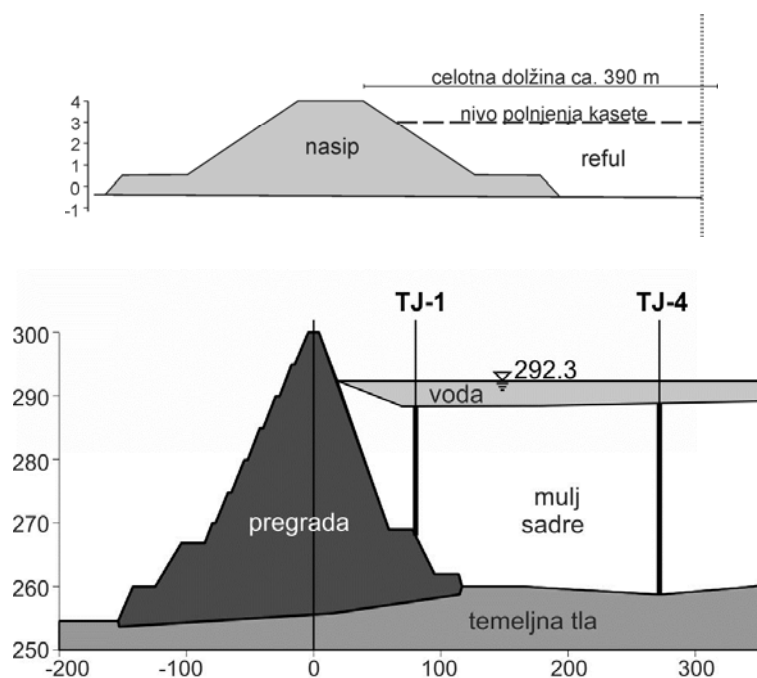
Kakovost vzorca	Postopek vzorčenja	Možna globina vzorčenja	Opomba
Porušen (pregneten)	z lopato	površinski sedimenti, globina do nekaj deset centimetrov	vzorčenje ne ojezerjenih sedimentov in sedimentov pod plitvim vodnim pokrovom, v mirnih vodah, za vse vrste sedimentov
	z grabežem / z bagersko žlico	površinski sedimenti, globina 10-30 cm (z bagersko žlico tudi globlje)	vzorčenje sedimentov pod plitvim vodnim pokrovom, v mirnih vodah, za gline, melje in peske
Neporušen (intakten)	iz vrtin	globine več deset metrov	način jedrovanja je potrebno prilagoditi stanju in vrsti sedimenta

4.2 Odvzem vzorcev za laboratorijske preiskave

Vzorci za laboratorijske preiskave so bili odvzeti iz plitvih površinskih razkopov in iz globokih vrtin. Shematski prerez akumulacije refula je prikazan na Sliki 4.1 zgoraj, akumulacije mulja sadre pa na Sliki 4.1 spodaj.

Na površini »starih« akumulacij refula, izpostavljenih sušenju, se po dekantaciji, prične ustvarjati suha skorja, v kateri nastajajo krčitvene razpoke, podobne krokodilji koži (Slika 4.2, levo). Lastnosti suhe skorje v debelini približno 20 cm so bistveno drugačne od lastnosti refula pod njo, zato so bili vzorci suhe skorje pri vzorčenju odvzeti ločeno.

Vlažnost refula pod suho skorjo je približno enaka vlagi pri meji židkosti oz. je nad njo. Porušeni vzorci so bili odvzeti ročno, z lopato in bagersko žlico, intaktni pa iz vrtin. Vrtine so bile izvedene z ročnim vtiskanjem in izvlekom tankostenske cevi, opremljene z nastavkom, ki preprečuje izgubo vzorca med izvlekom (Slika 4.2, desno).



Slika 4.1: Shematski prikaz prereza akumulacije za odlaganje refula (zgoraj) in akumulacije za zadrževanje mulja sadre (spodaj) (Smolar, 2015).

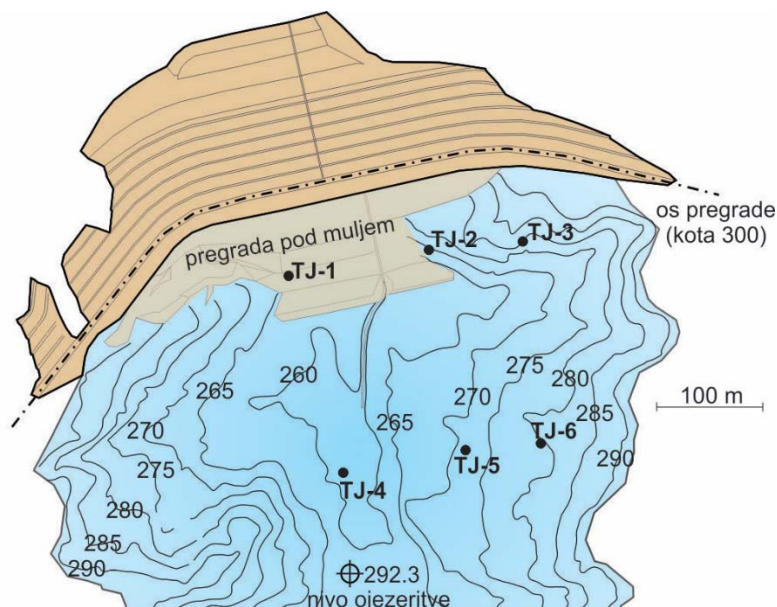
Figure 4.1: Schematic cross-section of the accumulation with reful (upper) and accumulation with red gypsum mud (lower) (Smolar, 2015).



Slika 4.2: Stanje površine v kasetah, kjer reful že več let miruje (fotografirano poleti 2015) (levo) in odvzem intaktnih vzorcev (desno) (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.2: Surface dry crust formed on the few years old lagoon with dredged marine sediment (photo taken in summer 2015) (left) and sampling of intact samples with boreholes (right) (photo: archive KMTAL).

Vzorci mulja sadre iz akumulacije so bili odvzeti iz vrtin TJ-1 in TJ-4, vrtanih s plavajočega pontona (Slika 4.3, zgoraj). Vzorčenje je potekalo tako, da je bila notranja stran jedrne cevi obložena s PVC črevesom, zunanji konec cevi pa opremljen s posebno loputo, ki se je ob izvleku jedrne cevi zaprla. Na ta način so bili odvzeti vzorci po odsekih dolžine ca 1 m (Slika 4.3, spodaj). Ker je v pripovršinskih plasteh struktura mulja zelo rahla, intaktnih vzorcev ni bilo možno odvzeti. Tudi tisti vzorci, ki so ustrezali stanju »intaktnega« vzorca, so se med transportom v laboratorij utekočinili. Vendar pa je bilo možno na vseh vzorcih določiti vlago in gostoto.



Slika 4.3: Situacija ojezerjenega dela akumulacije Za Travnikom z vrisanimi lokacijami izvedbe terenskih meritev in vrtin, iz katerih je bil odvzet mulj sadre za laboratorijske preiskave. Izolinije na situaciji prikazujejo dno akumulacije pred polnjenjem (zgoraj). Jedro vrtnine mulja sadre, shranjeno v PVC črevesih, dolžine 1 m (spodaj) (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.3: Situation of accumulation Za Travnikom with locations of field tests and boreholes from which samples for laboratory investigations were obtained. Isolinien shows the bottom of the accumulation before filling started (upper). Red gypsum mud from boreholes stored in PVC hose (length of about 1 m) (lower) (photo: archive KMTAL).

4.3 Terenske preiskave

Ker je zaradi rahlega stanja mulja odvzemanje intaktnih vzorcev za laboratorijske preiskave težavno in pogosto neuspešno, so se za določanje mehanskih lastnosti muljev uveljavile predvsem terenske metode; CPTu, DMT in krilna sonda (Benson, 1999). Zveze za vrednotenje rezultatov terenskih preiskav so semiempirične in so bile razvite na osnovi dolgoletnega preučevanja zemljin. Ker se mulji razlikujejo od zemljin, je potrebno podatke terenskih raziskav interpretirati glede na specifične lastnosti mulja, prepoznane v laboratoriju. Zato so v vsakem primeru referenčne laboratorijske raziskave nujno potrebne.

Terenske preiskave refula so bile izvedene na površinah, kjer je bila debelina suhe skorje tolikšna, da je bil dostop z mersko opremo varen. Terenske raziskave mulja sadre v ojezeritvi so bile izvedene s plavajočega pontona.

4.3.1 Terenska krilna sonda (*Field vane test*)

Meritve nedrenirane strižne trdnosti mulja sadre so bile izvedene po standardu, s terensko krilno sondo Geonor H-10, dimenzij 65 mm × 130 mm, ki je bila vtisnjena do izbrane globine, kjer je bila izvedena meritvev z rotacijo sonde 1 °/sec. Ko je bil dosežen in zabeležen maksimalni torzijski moment, je bila krilna sonda zavrtena za 25 obratov, nakar je bil izmerjen še torzijski moment na pregnetenem materialu.

4.3.2 Statični penetracijski preskus (*CPT/CPTu*)

Za preiskave refula je bila uporabljena naprava za vtiskanje (penetrometer) TG 63-150 proizvajalca PAGANI, za preiskave mulja sadre pa merilna oprema Icone in HYSON100 KN - LW, proizvajalca A.P. van den Berg.

CPT/CPTu preiskave so bile v refulu in mulju sadre izvedene skladno s standardom. Uporabljena je bila standardna konica (10 cm²), vtiskanje je potekalo s hitrostjo 2±0.5 cm/s. Odpor pod konico in odpor po plašču ter meritve pornih tlakov so bile zabeležene z napredovanjem penetracije na vsaka 2 cm. Disipacijski testi, s katerimi lahko določimo vodoprepustnost mulja, so bili v mulju sadre izvedeni na globinah od 7 m do 20 m in so trajali tako dolgo, da je bil izmerjen hidrostatski tlak na izbrani globini.

Izjemno mehkih sedimentov s standardnim konusom ne moremo preiskovati, ker je mersko območje premalo natančno (poglavje 5.11.7). V refulu smo meritve zato prvič v Sloveniji izvedli z uporabo t.i. piezokrogla (angl. *piezoball*) (Slika 4.4, levo). Piezokrogla, izdelana iz jekla, ima premer 113 mm, projekcijska površina je 100 cm², kar je 10 krat več od standardnega konusa. Izdelana je tako, da jo lahko namestimo na isti nastavek kot konus (Slika 4.4, desno).

Zveze, uporabljene za vrednotenje rezultatov meritev, bodo podane v ustreznih poglavjih z rezultati raziskav.

4.3.3 Ploskovni dilatometrijski preskus (*DMT*)

DMT preiskave so bile izvedene v mulju sadre, s ploskim dilatometrom proizvajalca Marchetti, po standardu. Za vtiskanje sonde v mulj s hitrostjo 2 cm/s, je bila uporabljena enaka garnitura in drogovje, kot za izvedbo CPTu testov. Med testom membrano, premera 60 mm, izbočimo s tlakom. Vtiskanje sonde je bilo prekinjeno vsakih 20 cm, ko se je izvajala meritvev tlakov A in B. Tlak A predstavlja kontaktni tlak med muljem in membrano, B pa tlak, ki je potreben, da centralni del membrane napremo za 1.1 mm v mulj.



Slika 4.4: Piezokrogla, last podjetja SLP d.o.o., prvič uporabljena za preiskave mehkih sedimentov v Sloveniji (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.4: Piezoball (SLP d.o.o) for the first time used for investigations of deposited dredged sediments in Slovenia (photo: archive KMTAL).

4.4 Geomehanske laboratorijske preiskave

Standardni postopki, uporabljeni pri izvedbi laboratorijskih preiskav, so navedeni v Preglednici 4.2. Nestandardni postopki, odstopanja od standardnih metod in napredna merska oprema so podrobneje opisani v nadaljevanju tega poglavja.

Preglednica 4.2: Pregled standardnih laboratorijskih preiskav.

Table 4.2: List of standard laboratory tests.

Preiskava	Standard
Ugotavljanje vlažnosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1:2004
Ugotavljanje gostote drobnozrnatih zemljin	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-2:2004
Ugotavljanje gostote zrn - Metoda s piknometrom	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-3:2004
Ugotavljanje zrnastostne sestave	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-4:2004
Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-5:2004
Preskus s konusom	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-6:2004
Enosni tlačni preskus drobnozrnatih zemljin	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-7:2004
Neposredni strižni preskus	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004
Ugotavljanje prepustnosti s konstantnim in spremenljivim hidravličnim padcem	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-11:2004
Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12:2004
Preskus z metilen modrim	SIST EN 933-9:2009+A1:2013
Ugotavljanje adsorpcije vode – Enslin Neff	DIN 18132:2012
Ugotavljanje meje krčenja	ASTM D4943-08

Meritve nedrenirane strižne trdnosti z laboratorijsko krilno sondo	ASTM D4648-00
--	---------------

4.4.1 *Priprava preizkušancev*

Preizkušanci za geomehanske laboratorijske preiskave so bili pripravljani na različne načine in sicer:

- izrezani iz intaktnih vzorcev,
- pripravljani iz naravno vlažnih pregnetenih vzorcev,
- pripravljani iz vzorcev, sušenih na zraku v laboratoriju in
- pripravljani iz »ožetih« vzorcev, ki smo jim v velikem edometru iztisnili presežno porno vodo.

Sušenje vzorcev refula se je izkazalo kot manj primerna metoda za pripravo preizkušancev, saj z izgubo vode ob sušenju narašča vsebnost soli, kar vpliva tako na fizikalno mehanske lastnosti sedimenta kot tudi na lastnosti porne vode in s tem povezano osmotsko sukcijsko.

4.4.2 *Indeksne preiskave*

Naravno vlago sedimentov in vlago po zaključenih preiskavah smo refulu izmerili s sušenjem pri temperaturi (T) $60 \pm 5^\circ\text{C}$ in $100 \pm 5^\circ\text{C}$, mulju sadre pa pri $40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. S sušenjem smo zaključili takrat, ko se masi v dveh zaporednih tehtanjih nista več razlikovali. Kontrolna tehtanja mulja sadre so trajala približno 7 dni. Vlaga refula je bila enaka za obe temperaturi sušenja, zato v nadaljevanju navajamo enotno temperaturo sušenja $T 100 \pm 5^\circ\text{C}$.

Indeksne preiskave zemljin se običajno izvajajo v inertnem okolju in so vrednotene kot količina destilirane vode, ki jo zemljina zadržuje v značilnih konsistenčnih stanjih (w_L , w_P , w_S). Ker je porna voda v muljih slana, smo raziskali tudi vpliv slanosti porne vode na indeksne lastnosti refula. Obnašanje v slanem in inertnem okolju smo preverili tudi za sposobnost adsorpcije organskega kationa Metilen modro.

Zrnovostno sestavo mulja sadre smo ugotovili z mokrim in suhim sejanjem in z areometrično analizo. Zaradi visoke topnosti sadre v vodi smo pri mokrem sejanju uporabili porno vodo iz mulja sadre. Pri sejanju nismo uporabljali mehanskih pripomočkov (čopič...), ampak smo samo s potresanjem poskušali vsa igličasta zrna obrniti v smeri krajše stranice navzdol. Z mehanskimi pripomočki bi lahko krhka zrna zlomili in s tem povsem spremenili krivuljo zrnivosti.

4.4.3 *Preiskave stisljivosti in lezenja*

Preiskave deformabilnosti obeh sedimentov smo izvedli v edometru. Pri mulju sadre smo prepoznali izrazito lezenje. Preiskave smo zato prilagodili tako, da smo posamezno bremensko stopnjo v edometru spremljali tudi več kot 1 leto.

Vplive kemične sestave porne tekočine na lezenje sadre smo ovrednotili z vzporednimi preizkusi na vzorcih, preplavljenih s sadrovico in s petrolejem.

Velik edometer (t.i. Rowe celico), premera 250.4 mm in višine približno 100 mm smo uporabili za ožemanje refula in mulja sadre (Slika 4.5). Vertikalno obremenitev smo nanašali v stopnjah in glede na količino vode, ki se je izcedila iz vzorca pri izbrani bremenski stopnji, ocenili pripadajočo vlago. Iz refula, ki smo ga oželi do želene vlage, smo nato pripravili stabilizacijske mešanice z anorganskimi vezivi.

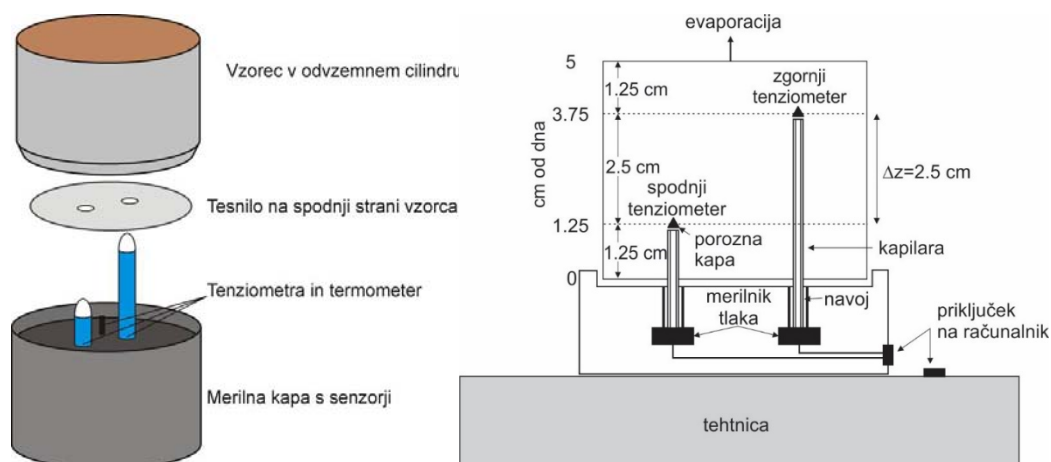


Slika 4.5: Veliki edometer – Rowe celica, v kateri smo s konsolidacijo iztiskali vodo iz sedimentov (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.5: Large oedometer cell – Rowe cell for consolidation tests and dewatering of sediments (photo: archive KMTAL).

4.4.4 Meritve sukcije

Meritve matrične sukcije smo izvedli z napravo Hyprop proizvajalca UMS. Shematski prikaz naprave je na Sliki 4.6. Vzorce smo zaradi visoke vlage vgrajevali neposredno v napravo. Na spodnji strani je preizkušanec višine 5 cm, zatesnjen, zgornja površina pa je izpostavljena izhlapevanju. Sukcijo merita dva tenziometra, nižji na $\frac{1}{4}$ višine, višji pa na $\frac{3}{4}$ višine vzorca. Celotna naprava je postavljena na tehtnico, ki hkrati z meritvami sukcije, meri spremembo mase preizkušanca zaradi izhlapevanja vode.



Slika 4.6: Shema naprave Hyprop (Maček, 2012).

Figure 4.6: Hyprop device (Maček, 2012).

Če je prepustnost preizkušanca znatno višja od hitrosti izhlapevanja, povzroči izhlapevanje navidezno stacionarno stanje, v primeru, ko je prepustnost preizkušanca nižja od hitrosti izhlapevanja, pa povzroči izhlapevanje v vzorcu povečan hidravlični gradient. Iz znanih sprememb mase med preiskavo, končne mokre mase in končne suhe mase preizkušanca lahko za vsako mersko točko izračunamo povprečno vlago preizkušanca. Ker je preizkušanec med preiskavo v nestacionarnem stanju, bi lahko retencijsko krivuljo ali krivuljo prepustnosti v odvisnosti od sukcije dobili le s povratnimi analizami. Če pa naredimo določene predpostavke, lahko meritve zelo enostavno ovrednotimo (Maček, 2012; Maček et al., 2013c).

Predpostavke preiskave so:

- enodimenzionalen problem,
- sukcija je razporejena linearno z višino,
- vlaga je razporejena linearno z višino,
- sprememba volumna vode in sukcije med dvema merskima točkama je linearna s časom,
- sprememba prepustnosti med dvema merskima točkama je majhna (velja le za meritve v kratkih časovnih intervalih!).

Iz predpostavk sledi:

- vlaga v sredini vzorca je enaka povprečni vlagi,
- sukcija v sredini vzorca je enaka povprečni sukciji (oziroma povprečni vrednosti med obema tenziometroma),
- evaporacija med dvema merskima točkama je konstantna, prav tako gradient.

Prednosti te metode so natančnost meritev (0.01 kPa), veliko število merskih točk med meritvijo retencijske krivulje in dobro določena točka vstopa zraka. Z zgoraj privzetimi predpostavkami lahko določimo tudi zvezo med vodoprepustnostjo in sukcijo. Pomanjkljivosti metode sta sorazmerno majhno delovno območje merjenja sukcije, od 0 do 85 kPa, izjemoma do 150 kPa in dolgo trajanje preiskave (7 dni). Prav tako vzorcev ne zasitimo popolnoma, ampak imajo stopnjo zasičenosti pri točki ujetih zračnih mehurčkov (Maček, 2012).

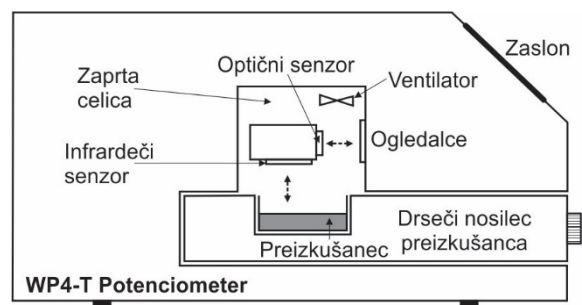
Meritve totalne in osmotske sukcije smo izvedli z napravo WP4-T, proizvajalca Decagon Devices (Slika 4.7). Gre za posredno metodo merjenja, pri kateri sukcijo določimo preko vlage zraka. Odvisnost relativne vlage zraka od sukcije povezuje Kelvinova enačba (4.1).

$$\psi = \frac{\rho_w RT}{M_w} \ln \left(\frac{p_v}{p_{v0}(T)} \right) \quad (4.1)$$

kjer je R plinska konstanta, T temperatura v K, M_w molska masa vode, p_v delni tlak vodne pare, $p_{v0}(T)$ zasičeni tlak vodne pare, ki ga ocenimo preko empiričnih zvez.

V psihrometru WP4-T merimo temperaturo zraka in temperaturo zrcalca, ki ga ohlajamo s termočlenom. Ko temperatura zraka v komori pade na temperaturo rosišča, se zrcalce zarosi in s tem prekine laserski žarek, ki sveti na ogledalce. Standard ASTM D6836 (ASTM, 2008) predvideva uporabo takšnega psihrometra pri meritvah sukcije nad 1000 kPa.

Meritve sukcije v psihrometru potekajo na vzorcih majhnega volumna in so hitre (ca. 15 minut) in natančne ($\pm 1\%$ ali ± 100 kPa), saj naprava z meritvijo čaka tako dolgo, da pride do ekvilibracije temperature in relativne vlage vzorca in zraka v komori (Agus in Schanz, 2007). Med meritvijo ne moremo zagotavljati konstantne sukcije (sušenje preizkušanca) (Maček, 2012).



Slika 4.7: Shematski prečni prerez naprave WP4-T (Maček, 2012).

Figure 4.7: Cross-section of WP4-T dewpoint potentiometer (Maček, 2012).

4.4.5 Meritve reoloških lastnosti

Meritve reoloških lastnosti sedimentov smo izvedli z dvema koaksialnima valjastima reometroma (angl. *coaxial cylinder rheometer*) z nastavlljivo strižno hitrostjo (angl. *rotational velocity*): manjšim DV3T HB, proizvajalca Brookfield in večjim Con Tec Viscometer 5. Con Tec Viscometer 5 se prvenstveno uporablja za merjenje reoloških lastnosti malt in betonov (Hočevnar, 2013). Bistvena razlika med reometroma je v velikosti vzorca, v razdalji (razliki) med notranjim in zunanjim radijem in v geometriji merske sonde.

Z reometrom DV3T HB, smo izvajali meritve z uporabo različnih kombinacij krilnih sond oz. vreten in dimenzij valjev s preizkušancem (Preglednica 4.3, Slika 4.8). Površine vreten, krilnih sond in notranjost uporabljenih valjev, so gladke. Pri vrednotenju rezultatov preiskav smo uporabili efektivno

dolžino vreten in krilnih sond, kot jih navaja proizvajalec naprave (Brookfield Engineering Labs., Inc., 2014).

Meritve smo izvajali na način upada hitrosti (angl. *down curve*). Število obratov krilne sonde oz. vretena je v stopnjah upadalo od 250 obr/min do 0.02 obr/min. Vsaka stopnja (pri izbrani hitrosti) je trajala tako dolgo, da se je sonda zavrtela najmanj za en obrat (360°) oz. najmanj 1 minuto pri hitrostih višjih od 1 obr/min.

Kot rezultat smo zabeležili čas v sekundah (s) (angl. *time*), hitrost vrtenja vretena oz. sonde v obratih na minuto (angl. *speed, rounds/min – RPM*) in izkoriščenost vretena v % (angl. *torque*). Izkoriščenost vretena smo za vsako stopnjo določili kot povprečje merjenih vrednosti po tem, ko so se le-te ustalile. Med meritvijo je bila posoda s preizkušancem pritrjena in je mirovala, vrtelo se je vreteno.

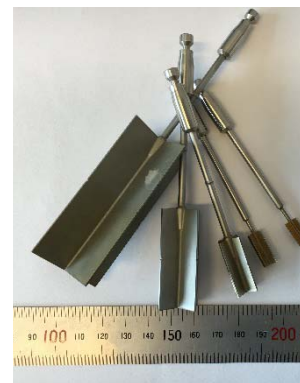
Nedrenirano strižno trdnost oz. dejansko napetost na meji tečenja pregnetenih preizkušancev, smo izmerili s krilno sondo, ločeno, po postopku, kot ga podaja standard ASTM D4648 (ASTM, 2016).

Preglednica 4.3: Vretena in posode s preizkušancem v preiskavah z reometrom DV3T HB.

Table 4.3: Spindles and chambers used in the investigations with rheometer DV3T HB.

Kombinacija	Steklena čaša (angl. <i>glass beaker</i>) (GB)	Mali valj (angl. <i>small sample adapter</i>) (SA)
Gladko vreteno (angl. <i>spindle</i>) (S)	$V_{\text{vzorca}} \sim 800 \text{ ml}$ $R_o \sim 40 \text{ mm}$ gap $\sim 31\text{-}34 \text{ mm}^1$	$V_{\text{vzorca}} \sim 7\text{-}14 \text{ ml}$ $R_o \sim 9.525 \text{ mm}$ gap $\sim 1.14\text{-}3.645 \text{ mm}^1$
Krilna sonda (angl. <i>vane</i>) (V)	$V_{\text{vzorca}} \sim 800 \text{ ml}$ $R_o \sim 40 \text{ mm}$ gap $\sim 23\text{-}34 \text{ mm}^1$	/

¹ gap – nazivna razdalja med notranjim in zunanjim valjem, ki je odvisna od dimenzije vretena. V_{vzorca} – volumen vzorca, R_o – radij zunanjšega cilindra



Slika 4.8: DV3T HB reometer (levo), koaksialni cilindri z vreteni (sredina) in krilne sonde (desno) (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.8: DV3T HB rheometer (left), small sample adapter with spindles (middle) and vanes (right) (photo: archive KMTAL).

Pri ConTec Viscometru 5 (CTV 5) (Slika 4.9) je radij zunanjega cilindra 145 mm, notranjega pa 100 mm, razdalja med notranjim in zunanjim valjem (angl. *gap*) je 45 mm. Višina vzorca, na katerem poteka meritve, je 100 mm. Meritev poteka tako, da se zunanji valj, katerega stene so opremljene z rebri proti drsenju materiala ob steni, vrti. Notranji valj, na katerem se meri navor, miruje. Notranji valj je sestavljen iz treh delov: spodnja »vetrnica«, ki preprečuje anomalije pri dnu (angl. *bottom effect*), glavna sonda (vertikalni »zobje«) in obroč, ki ga namestimo na zgornji del glavnega merilnega dela in služi za zagotavljanje konstantne višine (Slika 4.9, desno). S tako sestavljenim notranjim valjem zagotavljamo dvo dimenzionalni strig materiala med cilindroma (Hočevnar, 2013).

Meritev smo izvajali v dveh stopnjah: (1) »pred strig« - zunanji valj z vzorcem vrtimo z maksimalno hitrostjo približno 30 sekund, (2) meritev – stopenjski upad hitrosti iz 100 obr/min na 6 obr/ min. Izmerili smo čas, hitrost vrtenja zunanjega valja s preizkušancem v obratih na sekundo (RPS) in navor (Nm). Navor smo za posamezno stopnjo (hitrost vrtenja) izvednotili iz 10 najnižjih merjenih vrednosti v 1 minuti merjenja, po ekvilibracijskem času 15 s.

Reometer DV3T HB (Brookfield) in ConTec Viscometer 5 sta umerjena s standardnim silikonskim oljem.



Slika 4.9: ConTec Viscometer 5 (levo), zunanji in notranji valj (desno). V zunanjem valju so vidna rebra, ki preprečujejo zdrs materiala po steni cilindra (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.9: ConTec Viscometer 5 (left), outer and inner cylinder (right). The internal surface of the outer cylinder is ribbed. The slippage on the contact of the material and internal surface of the outer cylinder is prevented (photo: archive KMTAL).

4.4.6 Meritve strižnega lezenja mulja sadre v cikličnem enostavnem strižnem aparatu

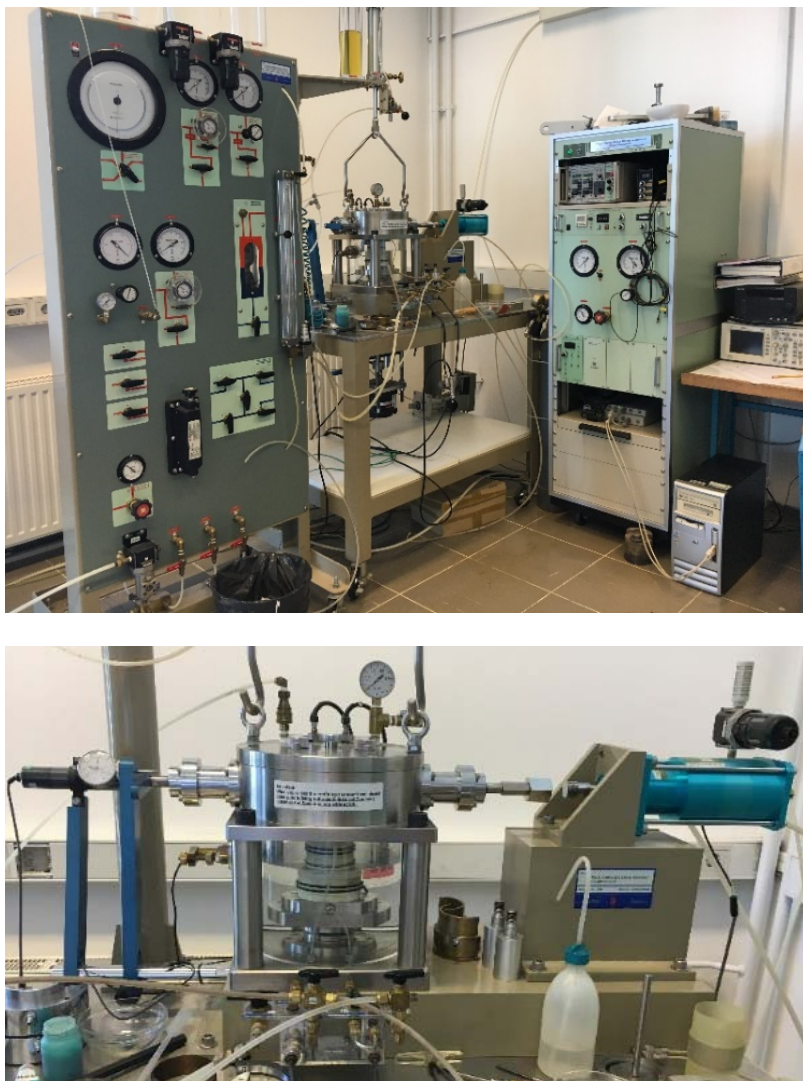
Konsolidacijsko lezenje mulja sadre smo izmerili v edometru, strižno pa v cikličnem strižnem aparatu DTA-136 proizvajalca Seiken (Slika 14.10). Naprava je v osnovi namenjena merjenju števila ciklov obremenitve do pojava likvifikacije pri danem razmerju strižne in normalne napetosti, merjenju strižnega modula pri deformacijah večjih od 10^{-4} (10^{-5}) in enostavnim strižnim preiskavam.

Preizkušance lahko obremenimo izotropno s celičnim tlakom ali z vertikalno silo. Bočno oporo preizkušancu nudijo K_0 obroči oz. žična membrana. Stanje preizkušanca, obdanega s K_0 obroči ali žično membrano je podobno kot v edometru, razlika je v tem, da v nobeni smeri (horizontalni in vertikalni) nimamo strižnega odpora. Bočno podprt preizkušane se med vsiljevanjem bočnih deformacij deformira enako kot pri čistem strigu. Od tod tudi ime naprave enostavni strižni aparat (angl. *simple shear apparatus*) (Maček, 2012).

Razlika v mehanizmu obnašanja preizkušanca, obremenjenega z vertikalno silo in z vsiljeno horizontalno deformacijo, v direktnem in enostavnem strigu, je prikazana na Sliki 4.11.

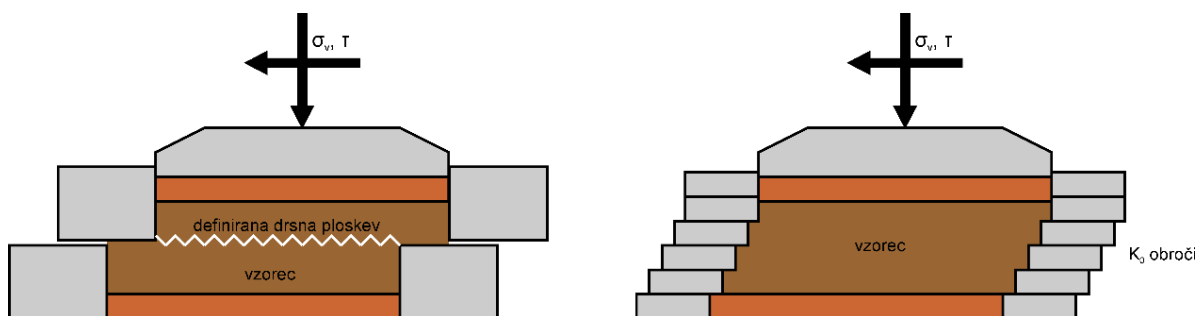
Lezenje smo izmerili tako, da smo namesto postopnega striženja preizkušanca, s pnevmatičnim batom, hipno nanegli horizontalno obtežbo (čas trajanja nanosa ca. 12 s) in nato opazovali deformacijo.

Izvedli smo štiri preiskave lezenja pri različnih vertikalnih napetostih in različnem razmerju strižne in vertikalne napetosti (τ/σ_v).



Slika 4.10: Ciklični enostavni strižni aparat DTA-136 (zgoraj) in pogled na vgrajen preizkušaneec, obdan z žično membrano (spodaj) (foto: arhiv KMTAL).

Figure 4.10: Cyclic simple shear apparatus DTA-136 (upper) and detailed view on the specimen during investigation (lower) (photo: archive KMTAL).



Slika 4.11: Mehanizem obnašanja preizkušanca v direktnem strigu (levo) in enostavnem strigu (desno).

Figure 4.11: The predefined shear surface in direct shear apparatus (left) and the specimen, during investigation, in the simple shear apparatus (right).

4.5 Laboratorijske preiskave izboljššanega refula

4.5.1 Veziva

Za stabilizacijo refula smo uporabili anorganski vezivi apno in cement in vezivi iz alternativnih virov: kalcijski elektrofiltrski (EF) pepel in papirniški pepel. Lastnosti apna in cementa so določene s certifikatom in jih nismo preiskovali, vezivom iz alternativnih virov pa smo določili vlago in časovni prirast tlačne trdnosti v zbitem stanju.

4.5.2 Priprava mešanic

Mešanice smo pripravili iz refula, ki smo mu z ožemanjem odstranili presežno porno vodo oz. ga na zraku osušili do zelene vlage. Začetno vlago refula smo prilagajali lastnostim uporabljenega veziva in jo podajamo za vsako mešanico ločeno, v poglavju z rezultati raziskav (poglavje 7.4).

Reful znane vlage smo nastrgali na manjše kosme, mu dodali vezivo in mešanico homogenizirali z mešanjem in gnetenjem. Veziv, ki smo jih dodajali v mešanico, nismo sušili v sušilniku. Na paralelnih preizkušancih smo določili povprečno vlago in jo upoštevali pri pripravi mešanice.

Iz sveže mešanice smo pripravili preizkušance za preiskave tlačne trdnosti, stisljivosti in mineraloške analize. Pri preiskavah smo se osredotočili na časovni prirast trdnosti. Preizkušance smo starali tesno zavite v folijo, postavljene v vlažno komoro.

4.5.3 Ugotavljanje tlačne trdnosti alternativnih materialov in mešanic

Časovni prirast tlačne trdnosti veziv iz alternativnih virov smo merili na preizkušancih premera 100 mm in višine 120 mm. Preizkušance smo pripravili iz alternativnega materiala, navlaženega na optimalno vlago, določeno po Proctorjevem postopku. Po ekvilibraciji vlage smo vzorce zbili z energijo po Standardnem Proctorjevem postopku in na ta način pripravili serijo najmanj 10 preizkušancev. Vse preizkušance smo do meritve tlačne trdnosti hranili na sobni temperaturi, tesno zavite v folijo, postavljene v vlažno komoro.

Iz mešanic smo pripravili preizkušance premera ca. 38 mm in višine med 65 mm in 70 mm. Preizkušance smo pripravili tako, da smo enakomerno pregneteno mešanico ročno zbili v kalup. Vgrajevanje je potekalo v treh plasteh, pri čemer smo predhodno vgrajeno plast, pred vgradnjo nove, zaradi boljše sprijemnosti, razbrazdali. Preizkušance smo iz kalupa previdno iztislili, jim poravnali zgornjo in spodnjo ploskev in jih zavili v folijo. Tako pripravljene smo starali v vlažni komori do dneva izvedbe meritve tlačne trdnosti. Tlačno trdnost smo določili pri hitrosti obremenjevanja 1 mm/min.

4.5.4 Preiskave stisljivosti

Preiskave stisljivosti smo izvedli v edometru na svežih in 7 dni starih preizkušancih. Preizkušance smo pripravili tako, da smo svežo stabilizacijsko mešanico ročno zbili v edometrski nožek in takoj vgradili

v edometriško celico oz. starali v edometriškem nožku. V času staranja (7 dni) volumskih deformacij nismo zaznali. Med preiskavo smo preizkušance v edometriških celicah preplavili z morskovo vodo.

4.5.5 Meritve sukcije

Napravi, ki smo ju uporabili za izvedbo meritev, in princip merjenja so podrobneje predstavljeni v poglavju 4.4.4.

Meritve sukcije smo izvajali na staranih preizkušancih, po preiskavi določanja tlačne trdnosti. Izmerili smo matrično sukcijo z napravo Hyprop in totalno sukcijo z napravo WP4-T. Iz vzporednih točkovnih meritev matrične in totalne sukcije na enako starem, vlažnem preizkušancu, smo izvrednotili osmotsko sukcijo. Na dveh stabilizacijskih mešanicih, v katerih smo kot vezivo uporabili kombinacijo elektrofiltrskega pepela in apna oz. cementa, smo spremljali časovni razvoj totalne sukcije. Vsem preizkušancem smo izmerili vlago.

4.6 Mineraloške analize

Fazna analiza je bila izvedena s praškovo rentgensko difrakcijo (XRD) (angl. *X-ray powder diffraction*), na rentgenskem praškovnem difraktometru EMPERYAN, PANalytical. Analiza je bila izvedena pri napetosti 45 kV in toku 40 mA, z Cu K α anodo, v kotnem območju 6–70° (2 θ), s korakom 0,02° 2 θ in integracijskim časom 150 s. Pri analizi elektrofiltrskega pepela in cementa je bil uporabljen grafitni monokromator. Interpretacija rezultatov je bila izvedena s pomočjo programske opreme HighScore v.4.x LTU. Manjša količina vzorca je bila za analizo podrobljena v ahatni terilnici na velikost pod 40 μ m.

Morfologija in mikrostruktura vzorcev sta bili določeni z vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM) (angl. *Scanning electron microscope*), semikvantitativna kemična analiza je bila določena z elektronsko disperzno spektroskopijo (EDS) (angl. *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*). Obe analizi sta bili izvedeni na aparaturi JEOL 5500 LV. Uporabljeni so bili odbiti elektroni (BSE) in nizek vakuum. SEM/EDS analiza je bila opravljena na svežih vzorcih.

5 REZULTATI EKSPERIMENTALNEGA DELA

5.1 Uvod

V tem poglavju so opisani rezultati geotehničnih raziskav refula in mulja sadre. Rezultati so vrednoteni in interpretirani upoštevajoč specifične lastnosti preiskanih sedimentov. Vsoda stopanja od vrednotenja in interpretacij, ustreznih za zemljine, so podrobno opisana. Rezultati reoloških preiskav in rezultati stabilizacije refula so podani ločeno v poglavjih 6 in 7.

Rezultati raziskav refula so podani tako, da je omogočena primerjava lastnosti in situ sedimenta na morskem dnu in lastnosti refula v akumulaciji.

Rezultati mulja sadre so podani tako, da je omogočena primerjava lastnosti mulja v ojezerenem delu akumulacije in lastnosti mulja pod obtežbo z nasipom iz kolača sadre (v nadaljevanju suh nasip).

Rezultati so predstavljeni in interpretirani tako, da globina (z) 0 m v akumulaciji refula pomeni površino suhe skorje, v akumulaciji mulja sadre pa je globina (z) 0 m dno vode v ojezeritvi. V primerjalnih študijah refula in naravnega sedimenta iz morskega dna, globina (z) 0 m za in situ sediment predstavlja morsko dno. Primerjalne analize mulja sadre v ojezeritvi in pod poskusnim nasipom so prikazane v absolutnih kotah (m.n.m.) in z globinami (m), pri čemer se globina mulja sadre pod nasipom meri od kote krone nasipa (298.22 m.n.m.) v času vrtnanja sond.

Rezultati preiskav in situ sedimenta iz območja Luke Koper so z dovoljenjem Luke povzeti iz arhivskih poročil o geotehničnih raziskavah, izvajanih za potrebe širjenja in gradnje luške infrastrukture, rezultati preiskav mulja pod suhim odlaganjem so povzeti iz rezultatov raziskav jeder iz kontrolnih vrtin, izvedenih na UL FGG, financiranih s strani Cinkarne Celje d.d.

Vse mineraloške analize (*XRD*, *SEM*, *EDS*) refula, veziv in mešanic, katerih rezultati so podani v eksperimentalnem delu naloge, sta opravili doc.dr. Ana Mladenovič in dr. Vesna Zalar Serjun na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, Oddelek za materiale, Laboratorij za betone, kamen in reciklirane materiale. Mineraloške analize mulja sadre so bile izvedene v Cinkarni Celje. V nadaljevanju besedila in slik sklicev na izvajalce preiskav in institucijo ne bomo navajali.

5.2 Mineralna sestava

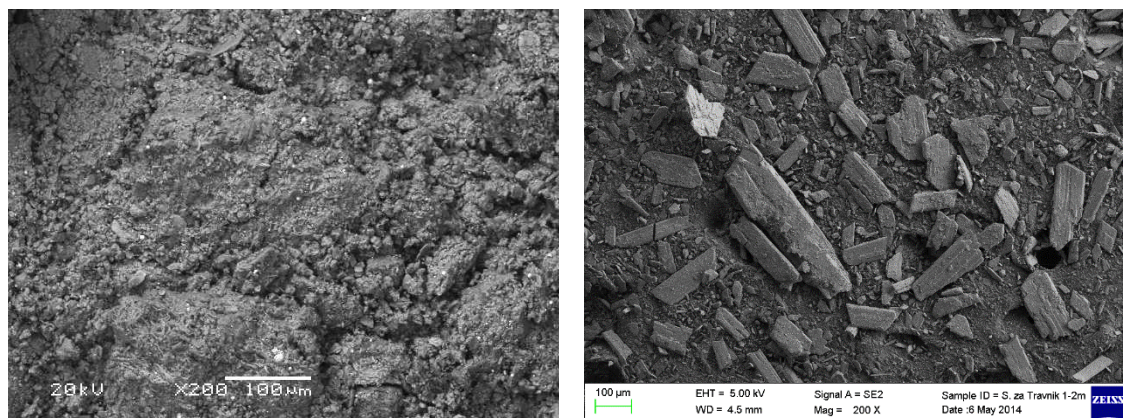
Geomehanske lastnosti materialov so odvisne od njihove mineralne sestave, zato lahko poznavanje le-te pripomore k ustrezni interpretaciji rezultatov preiskav. Lastnosti zemljin se ne spreminjajo sorazmerno s količino (zastopanostjo) posameznega minerala. Že prisotnost zelo majhnih količin določenih mineralov (npr. montmorillonitne glin) lahko bistveno vpliva na geomehanske lastnosti zemljin (Dolinar, 2000).

V Preglednici 5.1 so podani glavni minerali, na Sliki 5.1 pa so prikazane geometrijske lastnosti zrn obeh sedimentov.

Preglednica 5.1: Mineralna sestava refula in mulja sadre.

Table 5.1: Mineral composition of dredged marine sediment and red gypsum mud.

Vzorec	Mineralna sestava
reful	muskovit/illit, klorit, kalcit, kremen, dolomit, pirit, glinenci, Ca montmorillonit
mulj sadre	sadra, železovi oksidi, titanov dioksid, sledovi kremenca in kalcijevih in magnezijevih hidroksidov



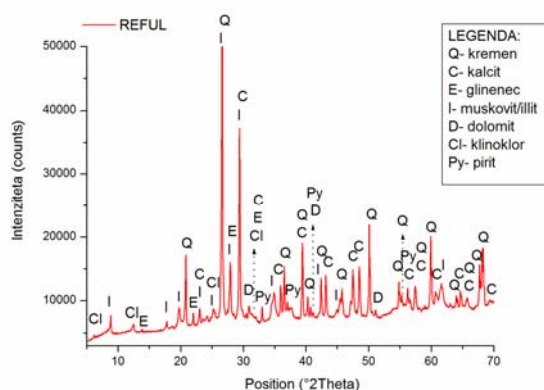
Slika 5.1: SEM posnetek refula (levo) in mulja sadre iz ojezeritve (desno).

Figure 5.1: SEM photomicrograph of dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).

V mulju sadre prevladujejo podolgovata in ploščata zrna sadre, obdana z železovimi oksidi v obliki koloidov (Slika 5.1 – desno). Splošno velja, da prisotnost izrazito podolgovatih zrn, slabo vpliva na stabilnost strukture (Petkovšek et al., 2012).

Rezultati XRD analize refula so grafično prikazani na Sliki 5.2. Mineralna sestava refula je podobna mineralni sestavi zemljin – flišnih preperin. Več kot 40% je mineralov glin (Preglednica 5.2). Pričakovano je mineralna sestava refula enaka mineralni sestavi sedimenta na širšem območju Koprskega zaliva (Ogorelec et al., 1987; Malačič et al., 2009; Mladenovič et al., 2013).

Mikro posnetki posameznih zrn v refulu in semi-kvantitativna elementna EDS analiza so prikazani na Slikah 5.3, 5.4 in 5.5.



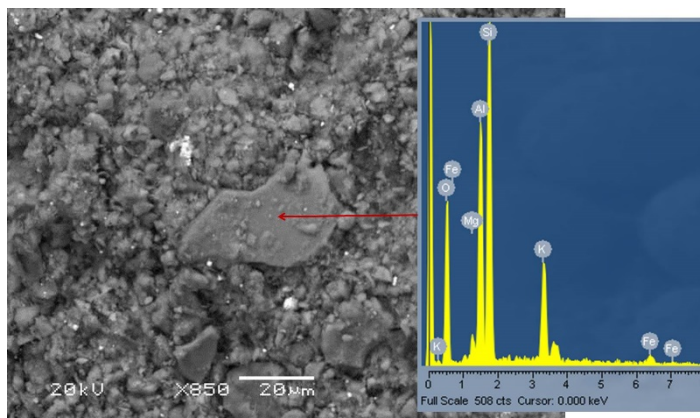
Slika 5.2: XRD spekter vzorca refula.

Figure 5.2: XRD pattern of dredged marine sediment.

Preglednica 5.2: Zastopanost posameznih mineralov v in situ sedimentu in v refulu.

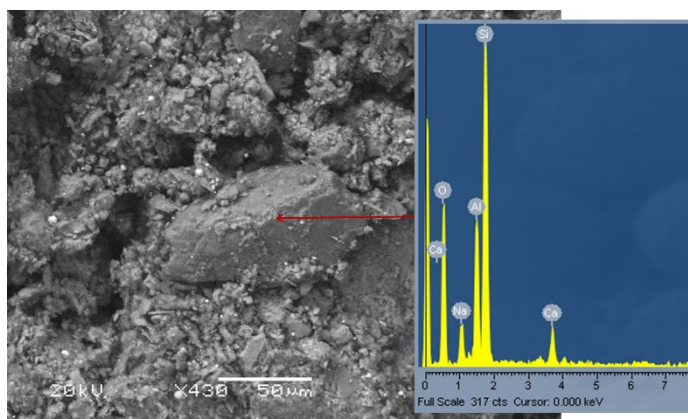
Table 5.2: Mineral phases in in situ and dredged marine sediment.

Mineral	Vzorec				
	naravni sediment (morsko dno)			reful	
	(Ogorelec et al., 1987)			(Malačič et al., 2009)	(Mladenovič et al., 2013)
	ob obali	znotraj zaliva	na vstopu v zaliv	ob obali	lagune
Kalcit (%)	20-27	20-28	20-26	24-33	19
Kremen (%)	18-35	15-22	11-18	12-18	21
Muskovit / Ilit (%)	18-27	20-35	20-23	28-37	25
Klorit (%)	10-20	15-21	11-18	8-17	20
Plagioklazi (%)	4-8	4-8	3-6	5-11	/
K-glinenci (%)	3-4	3	2-4	/	/
Dolomit (%)	2-4	1-8	9-24	2-8	3
Sadra (%)	5-10	3-5	/	/	/
Pirit (%)	3-5	2-4	3-5	1-3	2
Rogovača (%)	2	4	/	/	/
Glinenci (%)	/	/	/	/	9
Ca montmorillonit (%)	/	/	/	/	1



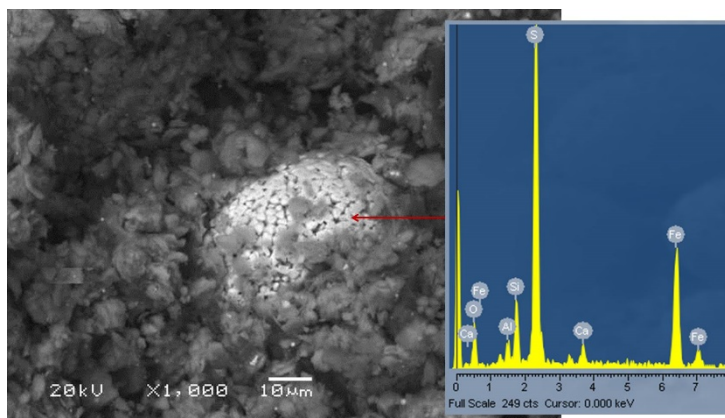
Slika 5.3: SEM mikro posnetek refula in rezultati EDS analize – zrno sljude.

Figure 5.3: SEM photomicrograph of dredged marine sediment with results of EDS analysis – mica.



Slika 5.4: SEM mikro posnetek refula in rezultati EDS analize – zrno glinenca.

Figure 5.4: SEM photomicrograph of dredged marine sediment with results of EDS analysis – feldspar.



Slika 5.5: SEM mikro posnetek refula in rezultati EDS analize – zrno framboidalnega pirita.

Figure 5.5: SEM photomicrograph of dredged marine sediment with results of EDS analysis – framboidal pyrite.

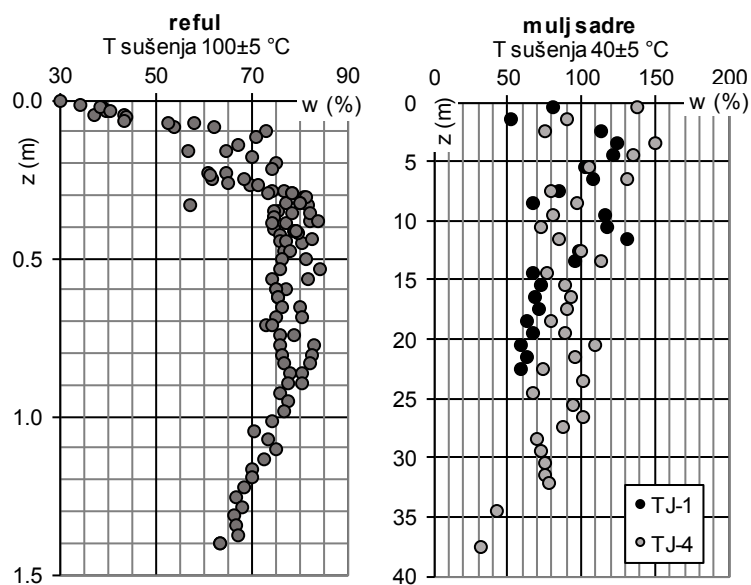
5.3 Vlaga in gostota sedimentov v akumulacijah

Naravna vlaga in suha gostota sta, v povezavi z mineralno sestavo in ostalimi indeksnimi lastnostmi, pomemben kazalnik stanja sedimentov v akumulacijah in odločujoče vplivata na razumevanje v nadaljevanju obravnavanih fizikalno mehanskih lastnosti. Oba sedimenta sta na mestu, kjer smo odvzeli vzorce, odložena že več let, zato lahko trenutno stanje vlage in suhe gostote (Slika 5.6 in 5.7) opredelimo kot merodajno, v primeru, da ne bo večjih posegov v akumulacijah.

Vlaga suhe skorje, ki je bila v debelini približno 20 - 30 cm formirana na mestu odvzema intaktnih vzorcev refula, je bistveno nižja od vlage v globljih plasteh. V globljih plasteh je reful židek in ima nižjo suho gostoto od suhe skorje. Vlaga se od globine 0.3 m do približno 1.0 m ne spreminja ($w = 75-85\%$), globlje počasi upada in na globini 1.4 m upade na vrednost nekaj več kot 60% (Slika 5.6 levo) in približno ustreza meji židkosti.

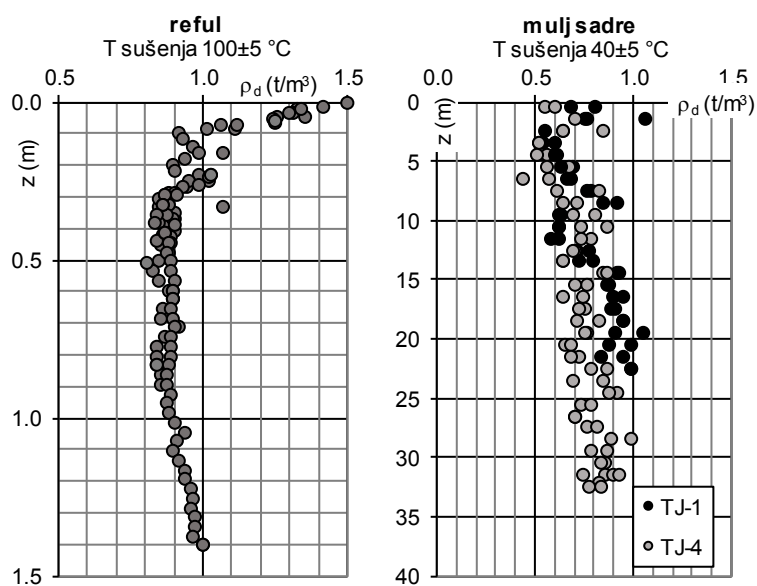
Najbolj rahle plasti mulja sadre v pripovršinskih slojih v akumulaciji izkazujejo vlago, ki se dobro ujema z vlago, izmerjeno pri prosti sedimentaciji v laboratoriju ($w = 120-140\%$). Raztros merjenih vlag in suhih gostot po globini je velik. Generalno gledano pa vlaga z globino upada (Slika 5.6 desno).

Da bi ovrednotili vpliv suhega nasipa iz filtrskega kolača sadre, s katerim postopoma zapolnjujejo akumulacijo Za Travnikom, na mulj, smo preverili stanje vlage mulja pod suhim nasipom. Suhi nasip gradijo tako, da filtrski kolač postopoma narivajo v ojezeritev in spremljajo dogajanja na nasipnem čelu ter posedke. Mulja predhodno ne izboljšujejo z dodatki ali osuševanjem. Vzorci so bili pridobljeni iz kontrolnih vrtin, vrtanih skozi suh nasip, v letih 2009 (DMT-1) in 2015 (IN-1/15). S Slike 5.8, kjer je vlaga prikazana v odvisnosti od absolutne kote (m.n.m.), vidimo, da je generalno gledano vlaga mulja pod nasipom nižja kot v akumulaciji in je posledica konsolidacije mulja pod suhim nasipom. Kota kontakta med dnem suhega nasipa in površino mulja je iz jeder vrtin ocenjena na 290 m.n.m. Posebnost, ki jo opazimo na Sliki 5.8 je izjemno visoka vlaga približno na kontaktu med muljem in suhim nasipom, izmerjena na vzorcih iz vrtine IN-1/15. To je lahko ali posledica napake pri vrtanju ali lezenja suhega nasipa po mulju.



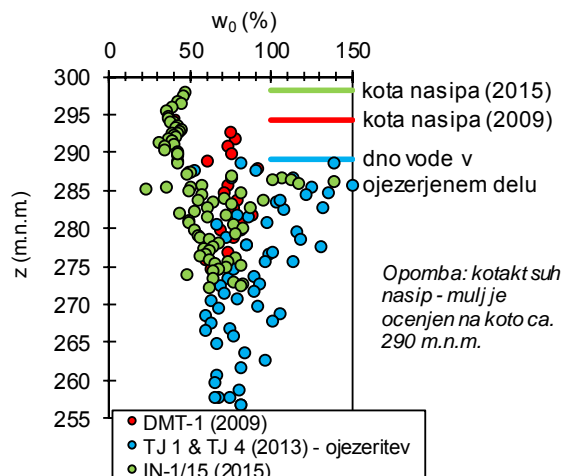
Slika 5.6: Profil vlage v akumulaciji refula (levo) in mulja sadre v ojezeritvi (desno).

Figure 5.6: Natural water content along the depth; dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).



Slika 5.7: Profil suhe gostote v akumulaciji refula (levo) in mulja sadre v ojezeritvi (desno).

Figure 5.7: In-situ dry density along the depth; dredged marine sediment (left) and red gypsum mud (right).



Slika 5.8: Primerjava vlage mulja sadre pod vodnim pokrovom (modri simboli) in mulja sadre pod suhim nasipom (rdeči in zeleni simboli).

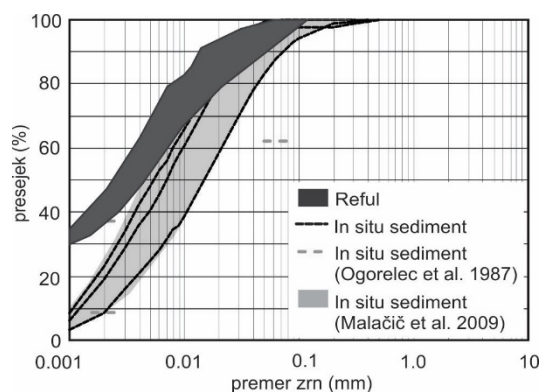
Figure 5.8: Comparison of water content of red gypsum mud from the accumulation (blue dots) and under the dry embankment (red and green dots).

5.4 Zrnavostna sestava

5.4.1 Morski sedimenti iz Luke Koper

Na Sliki 5.9 je prikazana zrnavostna sestava refula in in situ sedimenta na morskem dnu. Reful je drobnozrnat, delež zrn, manjših od 0.063 mm, je večji od 90% in vsebuje večji delež glinenih zrn (<0.002 mm) kot naravni sediment. To lahko pripišemo: (1) črpanju, hidravličnemu transportu in sedimentaciji v novem okolju in (2) mestu odvzema vzorcev refula v akumulaciji. Pri hidravličnem transportu refula, v obliki suspenzije v akumulacijo, se lahko večji delci hitreje posedajo v ozkem območju pod vtokom (cevjo). Lokalno se tam nahajajo bolj meljasto peščeni materiali, kot v večini območja lagune, vendar je dostop na mesto pod iztokom cevi težaven.

Prikazano zrnavostno sestavo refula lahko ocenimo kot reprezentativno. Določena je bila na večjem številu vzorcev, odvzetih pod suho skorjo, iz dveh akumulacij.



Slika 5.9: Območje krivulj zrnivosti refula in naravnega sedimenta iz Koprškega zaliva.

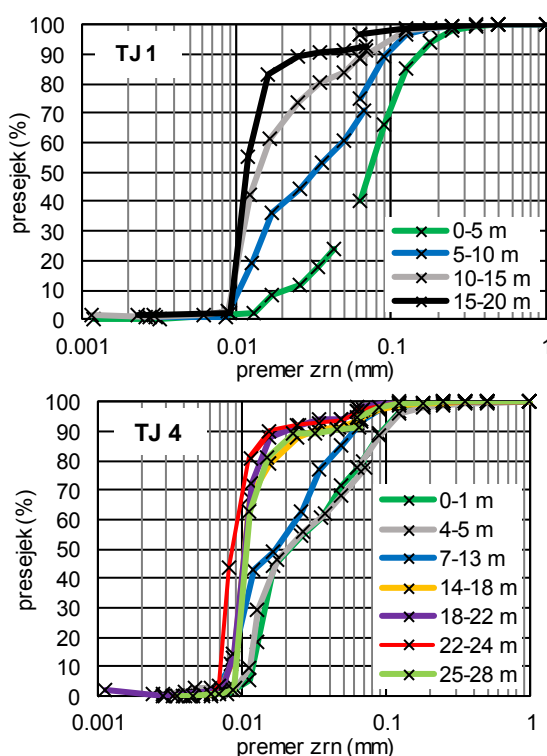
Figure 5.9: Area of grain size distribution of dredged marine sediment and in situ sediment from the Bay of Koper.

5.4.2 Mulj sadre

Krivulje zrnivosti mulja sadre so obremenjene s sistemsko napako, ki izvira iz sedimentacije ploščatih zrn, ki se ne podreajo Stokes-ovemu zakonu, kot tudi z napako, ki izvira iz topnosti in lomljivosti igličastih zrn. Vpliv topnosti smo izločili tako, da smo za preiskave uporabljali zasičeno porno vodo iz mulja sadre.

Prve raziskave zrnivosti mulja sadre iz ojezeritve so pokazale, da je zrnivost odvisna od globine. Da bi kar najbolj identificirali spremembo v zastopanosti posameznih frakcij v vzorcih, smo krivuljo zrnivosti določili za vsak meter vrtine. Na Sliki 5.10 so podane izbrane, za določene globine značilne krivulje zrnivosti. Zastopanost posameznih frakcij; debelega melja (<0.063 mm), srednjega melja (<0.02 mm) in drobnega melja (<0.0063 mm) do globine 25 m je prikazana na Sliki 5.11.

S Slik 5.10 in 5.11 vidimo, da s klasičnimi postopki ugotavljanja zrnivostne sestave glinene frakcije (<0.002 mm), ki bi jo lahko predstavljali železovi oksidi, nismo mogli določiti. Kljub temu pa je lepo vidno, da je mulj sadre v akumulaciji, v zgornjih 10 m bolj debelo zrnat, kot globlje, kar je nepričakovano.

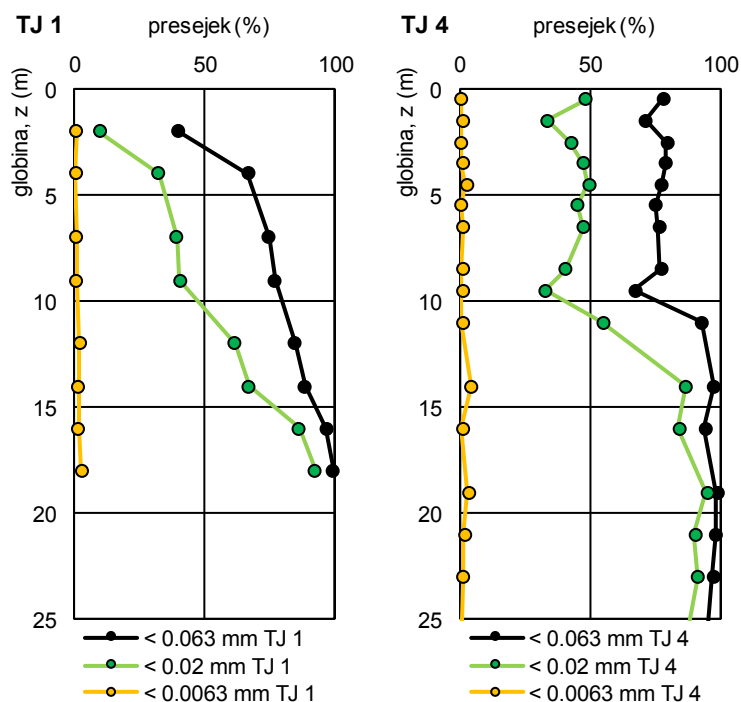


Slika 5.10: Krivulje zrnivosti mulja sadre iz vrtin v ojezeritvi (Slika 4.3, zgoraj).

Figure 5.10: Grain size distribution of red gypsum mud from the accumulation (Figure 4.3, upper).

Naraščanje deleža bolj drobnih zrn z globino je lahko posledica več dejavnikov: (1) lomljenja igličastih zrn mulja sadre zaradi pritiskov višje ležečih plasti, (2) rekristalizacije in/ali raztapljanja in (3) spremembe v proizvodnji, kjer mulj sadre nastaja kot stranski produkt. Zaradi odvzema bele sadre v rdeči sadri po letu 2008 narašča vsebnost železovih oksidov, ki kot koloidi predstavljajo fino

frakcijo. Morda je sistemska napaka pri preiskavi zrnivosti vezana tudi na kopičenje koloidov na zrnih sadre in se zato v zgornjih plasteh kaže navidezno debelejša zrnavostna sestava.



Slika 5.11: Zastopanost posameznih frakcij v mulju sadre iz vrtin TJ-1 (levo) in TJ-4 (desno), v odvisnosti od globine.

Figure 5.11: The amount of separate fractions in red gypsum mud, along the depth. Borehole TJ-1 (left) and TJ-4 (right).

5.5 Indeksne lastnosti

V Preglednici 5.3 so prikazani indeksi parametri naravno slanega refula in mulja sadre.

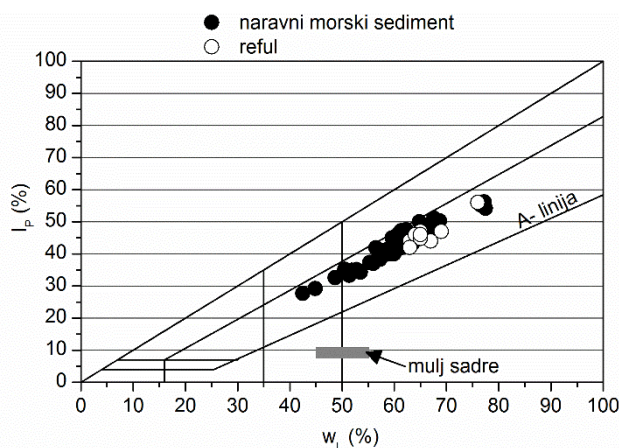
Na mejo židkosti (w_L) morskih sedimentov lahko vpliva priprava vzorca. Mitchel in Soga (2005) poročata o razlikah v meritvah meje židkosti na naravno vlažnem vzorcu ($w_L = 106\%$), na vzorcu predhodno sušenem na zraku do konstantne mase ($w_L = 84\%$) in na vzorcu, sušenem do konstantne mase v sušilniku, ($w_L = 60\%$). Da bi kar najboljše opisali lastnosti odloženega refula, smo v naših raziskavah uporabljali naravne vzorce, ki smo jih na zraku postopoma enakomerno sušili in izvajali meritve.

Vzorci refula, odvzeti iz kasete na pomolu 2 in kasete na območju bodočega kamionskega terminala Sermin, izkazujejo višji indeks plastičnosti kot naravni sediment iz morskega dna (Slika 5.12) in 10% do 15% višjo vodovpojnost. Gostota zrn je primerljiva gostoti zrn sedimenta iz morskega dna ($2.62\text{--}2.72\text{ t/m}^3$). Glede na že znane rezultate raziskav zrnivosti so ugotovljene razlike pričakovane. Po USCS klasifikaciji sodi reful med visoko plastične gline (CH) (Slika 5.12).

Mestoma se v kasetah (običajno na vtoku) pojavlja reful, ki ga lahko opišemo kot pusto glino s školjkami (CL) in ima mejo židkosti 39% in indeks plastičnosti 21%. Vse preiskave smo izvajali na

vzorcih refula z mejo židkosti med 67% in 76%, izjema so preiskave poskusa izboljšanja refula z vezivi, kjer smo uporabili tudi reful z mejo židkosti 39%.

Gostota zrn sadre je podobna gostoti zrn naravne sadre in je v povprečju 2.36 t/m^3 (Petkovšek et al., 2012). Po USCS sistemu klasifikacije mulj sadre uvrščamo med melje (ML\MH) (Slika 5.12).



Slika 5.12: AC diagram s prikazom lastnosti preiskovanih sedimentov.

Figure 5.12: Plasticity chart with the investigated sediments properties.

Pri hidravlično transportiranih muljih je pomemben kazalnik obnašanja usedline v akumulaciji t.i. vodni faktor usedline, ki je izražen kot delež vode, izločene iz enega litra suspenzije. Preiskali smo tri vzorce: (1) suspenzijo refula, pripravljeno v laboratoriju, (2) suspenzijo mulja sadre iz površinskih plasti v ojezerjeni akumulaciji in (3) suspenzijo mulja sadre iz proizvodnje. Po prostem usedanju v laboratoriju je bila vlaga usedline refula in obeh vzorcev mulja sadre med 120% in 140% in prostorninska teža med 13.5 in 14.0 kN/m^3 .

Preglednica 5.3: Indeksni parametri naravno slanega refula in mulja sadre.

Table 5.3: Index parameters of dredged marine sediment at natural salt content and red gypsum mud.

Parameter	Vzorec	
	reful (naravno slan)	mulj sadre
gostota zrn, ρ_s (t/m^3)	2.70-2.77	2.30-2.40
meja židkosti, w_L (%)	63-76	46-56
indeks plastičnosti, I_p (%)	40-53	<11
vodovpojnost; Enslin-Neff, w_A (%)	76-84	104-106
meja krčenja, w_s (%)	19-20	42
Vodni faktor usedline - suspenzija pripravljena v laboratoriju		
vlaga usedline, w_u (%)	123-140	120-140
količnik por usedline, e	3.5-4.0	2.80-3.0
gostota usedline, ρ (t/m^3)	1.37-1.40	~1.35
suha gostota usedline, ρ_d (t/m^3)	~0.60	~0.58
Vodni faktor usedline - suspenzija ob črpanju oz. iz proizvodnje		
vlaga suspenzije, w_{su} (%)	233-400*	205
vlaga usedline, w_u (%)	123-140*	123-138
gostota usedline, ρ_u (t/m^3)	1.37-1.40*	1.31-1.45
suha gostota usedline, ρ_{du} (t/m^3)	~0.60*	~0.58

*vzorec suspenzije ob črpanju ni bil odvzet. Razmerje trdnina/voda; povprečno 20-30% trdnine in 70-80% vode. V Preglednici so podane računsko določene vrednosti.

5.5.1 Vpliv soli na indeksne lastnosti refula

Večina indeksnih lastnosti naravnih geoloških materialov (zemljin) se določa kot količina destilirane vode, ki jo zemljina zadržuje v značilnih konsistenčnih stanjih (w_L , w_P , w_S , w_A).

Raziskali smo vpliv slanosti na indeksne lastnosti refula in primerljivost izmerjenih vrednosti s podatki iz literature (Preglednica 5.4, Slika 5.13 in 5.14). Rezultati kažejo, da slanost porne vode ne vpliva bistveno na Atterbergove meje plastičnosti refula, močno pa vpliva na lastnosti bentonita, ki smo ga uporabili kot referenčni material. Dobljeni rezultati so skladni z rezultati, objavljenimi v literaturi (Yan in Chang, 2015 in drugi).

Preglednica 5.4: Vpliv slane vode na indeksne lastnosti morskih glin in bentonita (Smolar, 2015).

Table 5.4: The influence of pore water salinity on index properties of marine sediments and bentonite (Smolar, 2015).

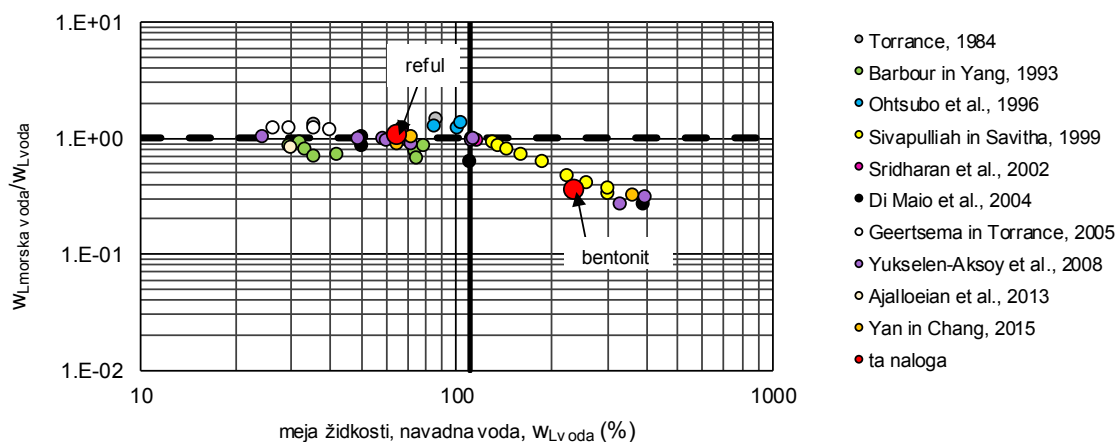
Parameter	Material								
	reful		Bentonit Na		morska glina*			Bentonit CF*	
porne vode	čista	morska	čista	morska	čista	slana	slana	čista	slana
vsebnost soli v vodi	/	3.3 m%	/	3.3 m%	0 m%	5 m%	10 m%	0 m%	10 m%
ρ_s (t/m ³)	2.61-2.66	2.70-2.77	/	/	/	/	/	/	/
w_L (%)	65	69	236	85	72	74	78	362	100
I_P (%)	45	46	/	/	34	34	36	311	40
meja krčenja, w_S (%)	21-23	19-20	/	/	/	/	/	/	/
metilen modro, MB / MB_f (g/kg)	38	22	188	134	/	/	/	/	/

* podatki iz literature: (Yan in Chang, 2015)

Na Sliki 5.13 je prikazana zveza med mejo židkosti, določeno z navadno/destilirano vodo ($w_{L\text{voda}}$) in normirano vrednostjo meje židkosti, izračunano kot razmerje ($w_{L\text{morska voda}} / w_{L\text{voda}}$), na Sliki 5.14 pa zveza med $w_{L\text{voda}}$ in normiranim indeksom plastičnosti, izračunanem kot razmerje ($I_{P\text{morska voda}} / I_{P\text{voda}}$). Rezultati so povzeti po Torrance (1984), Barbour in Yang (1993), Ohtsubo et al. (1996), Sivapullaiah in Savitha (1999), Sridharan et al. (2002), Di Maio et al. (2004), Geertsema in Torrance (2005), Yukselen-Aksoy et al. (2008), Ajalloeian et al. (2013) in Yan in Chang (2015). S črno črtkano horizontalno črto je označeno razmerje 1, ki pomeni, da slanost ne vpliva na prikazane indeksne parametre. Pri $w_{L\text{voda}}$ višjem od 110% se normirana vrednost odkloni od vrednosti 1, kar pomeni, da od te vrednosti dalje sol vpliva na Atterbergove meje plastičnosti (črna vertikalna črta na Slikah 5.13 in 5.14). Vidimo, da so raztrosi v normiranih vrednostih indeksa plastičnosti bistveno večji od raztrosov normiranih vrednosti meje židkosti. To lahko pripišemo natančnosti določanja meje plastičnosti (t.i. »človeškemu faktorju«).

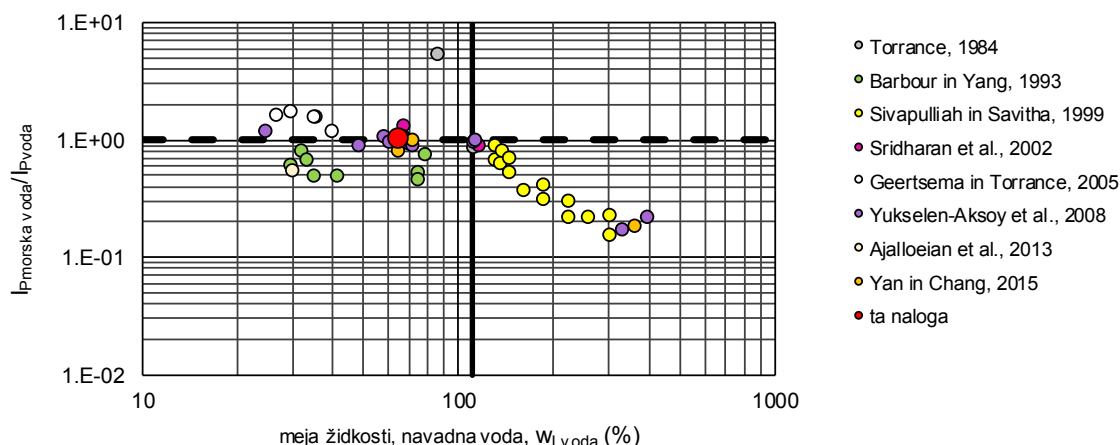
Raziskave aktivnosti zrn refula z metodo titracije organskega kationa metilen modro kažejo, da je vpliv soli na MB vrednost velik. Aktivnost zrn refula se v slanem okolju močno zmanjša, vrednost MB upade za ca. 40%. Primerljiv upad zmanjšanja aktivnosti zrn v slanem okolju (ca. 30%) se kaže tudi na bentonitu (Preglednica 5.4).

Kot smo že omenili, objav o vplivu soli na sposobnost za kationsko izmenjavo z organskim kationom metilen modro ni, zato naših rezultatov ne moremo primerjalno ovrednotiti.



Slika 5.13: Normirana vrednost $w_{Lmorska\ voda}/w_{Lvoda}$ v odvisnosti od w_{Lvoda} .

Figure 5.13: Normalized values $w_{L\ sea\ water}/w_{Lwater}$ versus w_{Lwater} .



Slika 5.14: Normirana vrednost $I_{pmorska\ voda}/I_{pvoda}$ v odvisnosti od w_{Lvoda} .

Figure 5.14: Normalized values $I_{P\ sea\ water}/I_{P\ water}$ versus w_{Lwater} .

5.5.2 Krčenje zaradi sušenja

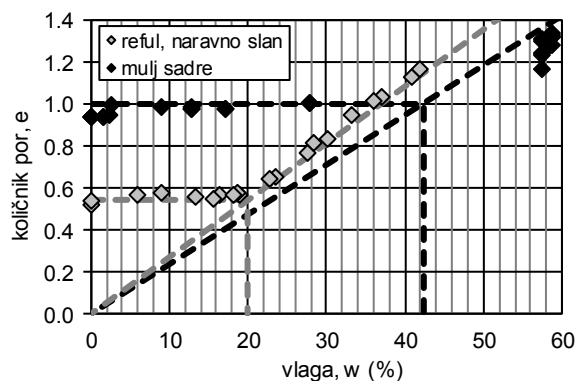
Med sušenjem se drobnozrnate saturirane zemljine krčijo, pri čemer nastajajo krčitvene razpoke. Z mejo krčenja določimo vlago, pod katero se pri nadaljnji izgubi vlage zemljina ne krči več. Mejo krčenja smo določili s spremljanjem vlage in gostote preizkušancev, ki smo jih pripravili pri naravni vlagi, višji od meje židkosti in jih počasi enakomerno sušili na zraku.

Meja krčenja je pomembna pri obravnavi nezasičenih zemljin. Iz nje lahko posredno ocenimo volumenske deformacije, ki bi se zgodile pri izsušitvi zemljine. Ključna je za razumevanje volumskih sprememb zemljine zaradi cikličnega sušenja in vlaženja.

Izmerjeni krivulji krčenja refula in mulja sadre sta prikazani na Sliki 5.15. S slike vidimo, da je krivulja krčenja refula dokaj značilna za nenabreklijve gline, krivulja krčenja sadre pa ustreza meljem. Spremembe volumna mulja sadre se vršijo do vlage približno 42%, spremembe volumna refula pa do vlage 20%. Pri nižjih vlagah se sedimenta posušita do konstantne mase pri zanemarljivih spremembah volumna (horizontalni črtkani črti na Sliki 5.15).

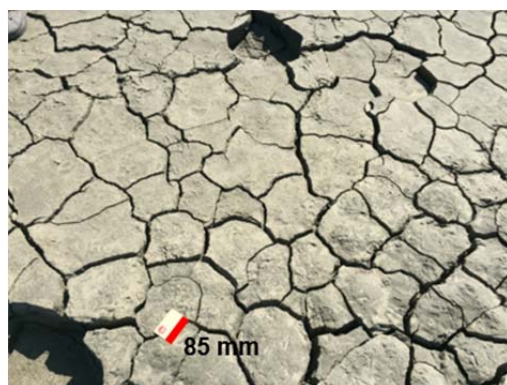
Izmerjeni meji krčenja veljata za material brez vertikalne obtežbe. To ustreza stanju površine refula in stanju mulja sadre, ko voda odteče in površina usedline pride v stik z zrakom.

Kljub izrazitim krčitvenim razpokam na površini odloženega refula (Slika 5.16) je vlaga, izmerjena na suhi skorji na globini 0.5 cm, za ca. 10% višja od meje krčenja (Slika 5.6, levo). Material, katerega vlaga bi se kar najbolje približala meji krčenja, bi morali najverjetneje v plasti nekaj milimetrov lokalno postrgati iz razpok ali površine. Zaradi visoko plastične narave refula (CH) in njegove nizke vodoprepustnosti poteka sušenje samo na izpostavljenih površinah in zelo omejeno prodira v globino.



Slika 5.15: Krivulja krčenja refula in mulja sadre (naravna pora raztopina).

Figure 5.15: Shrinkage curves of dredged marine sediment and red gypsum mud (natural pore fluid).



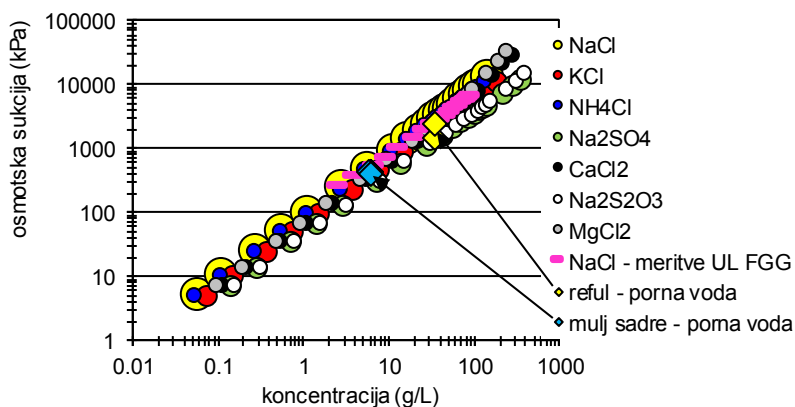
Slika 5.16: Krčitvene razpoke na površinah refula, ki so izpostavljene okoljskim vplivom (foto: arhiv KMTAL).

Figure 5.16: Shrinkage cracks in the dry crust of deposited dredged marine sediment, exposed to environmental impacts (photo: archive KMTAL).

5.6 Sukcija

Retencijska krivulja je temeljna zveza med vlago/stopnjo saturacije in napetostjo, s katero je voda vezana v zemljini. Totalna sukcija je vsota matrične in osmotske sukcije. Matrična sukcija je odvisna od vlage zemljine, osmotska pa od količine snovi (soli), raztopljenih v porni vodi.

V akumulacijah muljev je matrična sukcija nična, dokler se nad muljem vzdržuje vodni pokrov, velikost osmotske sukcije pa je odvisna od lastnosti porne vode in je lahko zelo visoka v primerih, ko so v porni vodi raztopljene soli ali pa zelo nizka, če je porna voda čista voda. Na Sliki 5.17 je prikazana empirična zveza med koncentracijo soli v porni vodi in osmotsko sukciijo za standardne raztopine soli. V diagramu so podane tudi izmerjene vrednosti osmotske sukcije za porno vodo iz refula in sadre, ki se lepo prilegajo empirični zvezi.



Slika 5.17: Osmotska sukcija porne vode iz preiskovanih muljev in osmotska sukcija standardnih raztopin pri različnih koncentracijah (vir: glej poglavje 2.6.3).

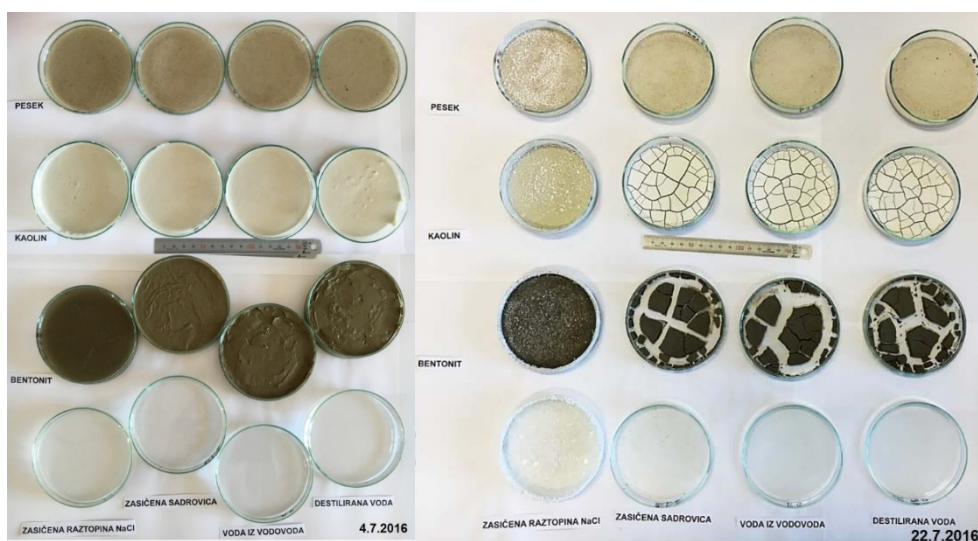
Figure 5.17: Osmotic suction of pore water from investigated sediments with osmotic suction of standard solutions at different concentrations (source: look chapter 2.6.3).

Takoj ko voda odteče, se na refulu prične tvoriti površinska skorja, v kateri s časom naraščata osmotska sukcija kot posledica naraščanja koncentracije soli in matrična sukcija, kot posledica sušenja in krčenja. Porazdelitev osmotske sukcije v refulu po globini ni linearna zaradi sezonskih vplivov padavin in temperature. Najvišja je tik pod površino suhe skorje, navzdol pa upada do vrednosti osmotske sukcije morske vode. Odstopanja se pojavljajo na robovih razpok, kjer so zunanji vplivi največji.

Sadra je ves čas pod vodnim pokrovom, zato matrične sukcije ni. Velikost osmotske sukcije je pogojena s koncentracijo sulfata in drugih soli iz proizvodnje, vendar se sezonsko spreminja zaradi vplivov razredčenja s padavinami. V primeru, če bi znižali vodni pokrov, pa bi tudi na površinah, izpostavljenih zraku, pričeli naraščati osmotska in matrična sukcija.

Na Sliki 5.17 vidimo, da je osmotska sukcija različnih soli pri enakih koncentracijah raztopine različna. Najvišje osmotske sukcije so izmerjene na raztopinah natrijevega klorida (NaCl). To pomeni, da so tudi mehanizmi sušenja in nastajanja suhe skorje različni za različne tipe porne vode in različne lastnosti zrn sedimenta. Na Sliki 5.18 je ilustrativen prikaz sušenja treh referenčnih materialov,

kremenovega peska, kaolina in bentonita, z uporabo štirih različnih raztopin porne vode. Podrobnejša analiza dogajanj je opisana v poglavju 9.

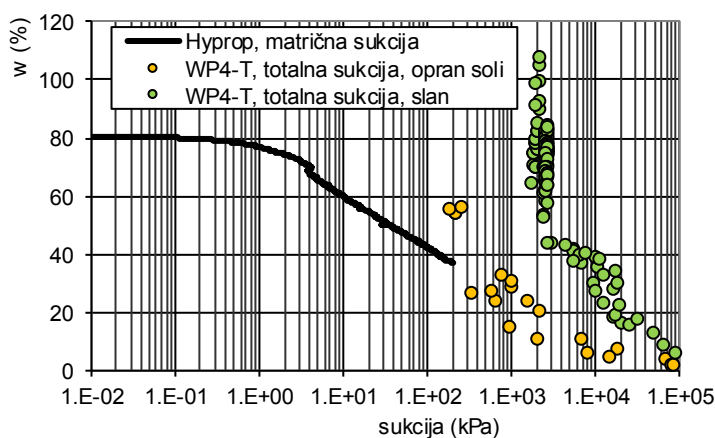


Slika 5.18: Sušenje zemljin v različnih raztopinah. Začetno stanje (levo) in stanje 22 dni zračno sušenih preizkušancev (desno).

Figure 5.18: Drying of soils in different pore fluids. Initial state (left) and state after 22 days of air drying (right).

5.6.1 Reful

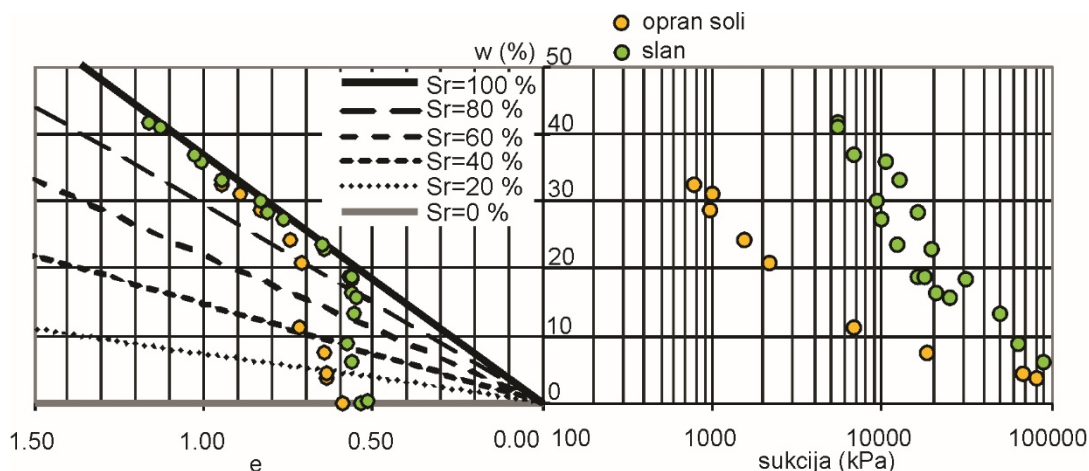
Slika 5.19 prikazuje rezultate meritev totalne in matrične sukcije refula. Visok prispevek osmotske sukcije je viden zlasti pri nižjih totalnih sukcijah, pri višjih totalnih sukcijah pa se ta vpliv zmanjša. Primerjava meritev refula in podatkov v diagramu na Sliki 5.17 pokaže, da smo v saturiranem refulu merili kar sukcijo morske vode. Z dodatnim zniževanjem vlage koncentracija soli narašča, kar na Sliki 5.19 vidimo kot koleno med vlagama 40% in 20%. Pri vlagi pod 20% pa se krivulji za slan in opran reful približata, saj se pod vlago 20% prične intenzivna desaturacija sedimenta.



Slika 5.19: Retencijska krivulja refula.

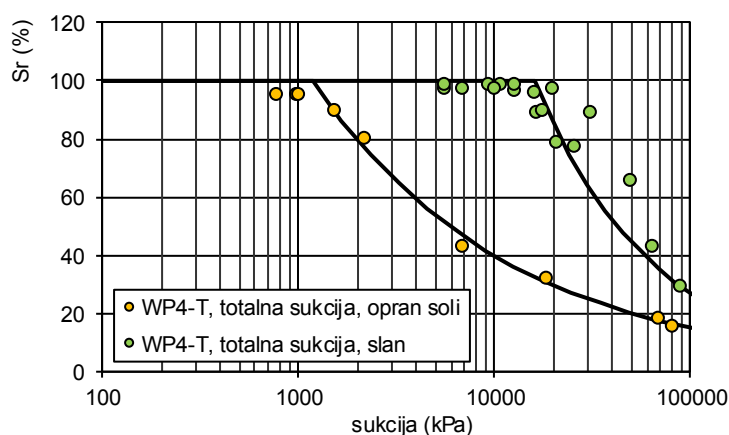
Figure 5.19: SWRC of deposited dredged marine sediment.

Na Slikah 5.20 in 5.21 so prikazane zveze med vlago, količnikom por, sukciijo in stopnjo saturacije. Eksperimenti kažejo, da je točka vstopa zraka v opranem in sušenem refulu pri sukciiji 1000 kPa, v sušenem slanem refulu pa pri sukciiji 20000 kPa. Večino sukciije v osušenem slanem refulu predstavlja osmotska sukciija.



Slika 5.20: Povezava med vlago, sukciijo, količnikom por in saturacijo refula.

Figure 5.20: Relationship between water content, suction, void ratio and degree of saturation, determined on deposited dredged marine sediment.



Slika 5.21: Zveza sukciija – saturacija določena na slanem in opranem refulu.

Figure 5.21: Suction versus saturation for salty and washed dredged marine sediment.

Za opis retencijske krivulje na Sliki 5.21 (črni krivulji), smo uporabili Brooks in Corey-ovo funkcijo (5.1) (Brooks in Corey, 1964):

$$Se = \min \left(1, \left[\frac{\alpha_{BC}}{\psi} \right]^{\lambda_{BC}} \right) \quad (5.1)$$

kjer je Se efektivna stopnja zasičenosti, α_{BC} oblikovni parameter (točka vstopa zraka), λ_{BC} oblikovni parameter, odvisen od razporeditve por.

Efektivno stopnjo zasičenosti lahko izračunamo kot (5.2):

$$Se = \frac{S_r - S_{rr}}{S_{rs} - S_{rr}} \quad (5.2)$$

kjer je S_r stopnja zasičenosti, izračunana iz merjenih vrednosti, S_{rr} stopnja zasičenosti pri rezidualni vlagi in S_{rs} stopnja zasičenosti zasičene zemljine (običajno 1).

Parametre Brooks in Corey-eve funkcije, s katero smo opisali zvezo sukcija – saturacija, podajamo v Preglednici 5.5, ločeno za slan in opran reful. Brooks in Corey-eva funkcija velja le za zemljine z enojnim sistemom por.

Preglednica 5.5: Parametri Brooks in Corey-eve funkcije za slan in opran reful.

Table 5.5: Parameters of Brooks and Corey function for salty and washed dredged marine sediment.

Parameter	reful naravno slan	reful opran soli
S_{rs} (%)	100	100
S_{rr} (%)	0	0
α_{BC}	16021	1189
λ_{BC}	0.713	0.432

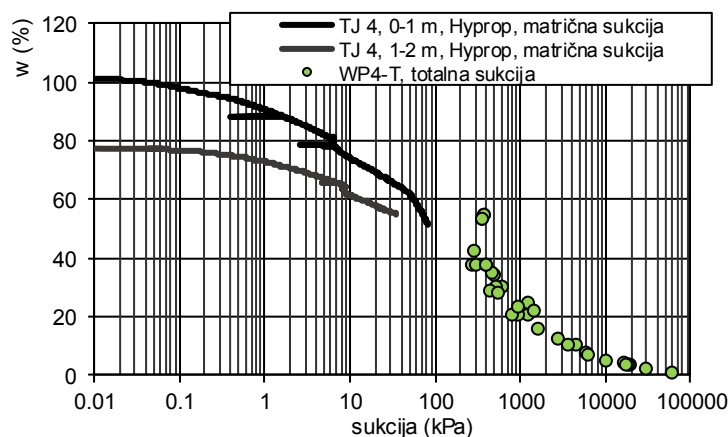
5.6.2 Mulj sadre

Retencijska krivulja mulja sadre je prikazana na Sliki 5.22. Izmerili smo krivuljo sušenja naravno vlažnih preizkušancev. Zaradi raztopljenih snovi v porni vodi (predvsem sulfat) je v mulju sadre prisotna osmotska sukcija. Izničenje osmotske sukcije s spiranjem soli (kot v primeru refula), zaradi visoke topnosti sadre v vodi, ni možno. Osmotsko sukcijo smo tako ob predpostavki nične matrične sukcije, ocenili iz meritev totalne sukcije saturiranih preizkušancev. Iz Slike 5.22 vidimo, da je v mulju sadre prisotna osmotska sukcija med 300 kPa in 400 kPa.

Osmotsko sukcijo smo izmerili tudi na filtrirani porni vodi, izcejeni iz mulja sadre. Da bi ovrednotili spreminjanje (upad) osmotske sukcije zaradi zmanjšanja koncentracije soli, smo porno vodo razredčili z destilirano. Spreminjanje osmotske sukcije v odvisnosti od koncentracije raztopljenih snovi (soli), je prikazano na Sliki 5.23, levo. Za vsako meritev je prikazano območje natančnosti merjenja naprave.

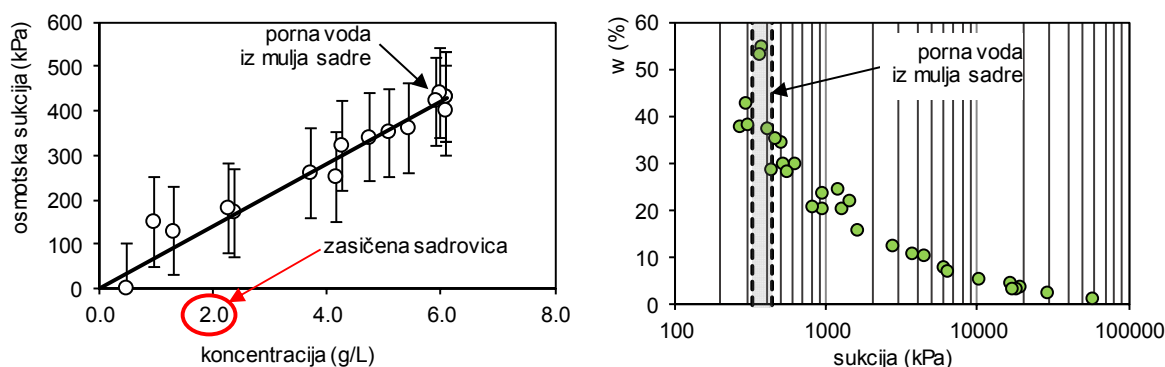
Koncentracija raztopljenih snovi v porni vodi mulja sadre je ca. 6 g/L, pripadajoča osmotska sukcija pa ca. 400 kPa. Količina raztopljenih snovi v preiskani porni vodi je višja od topnosti sadre (2 g/L). Iz tega lahko sklepamo, da so v porni vodi mulja sadre poleg sadre, prisotne še druge raztopljene snovi (soli).

Totalna sukcija, izmerjena na naravnih zasičenih preizkušancih je pričakovano enaka osmotski sukciji porne vode v mulju sadre (Slika 5.23, desno).



Slika 5.22: Retencijska krivulja mulja sadre.

Figure 5.22: SWRC of red gypsum mud.



Slika 5.23: Zveza osmotska sukcijska – koncentracija soli (levo) in primerjava osmotske sukcijske nasičenih preizkušancev in meritev na porni vodi (desno).

Figure 5.23: Osmotic suction versus salt concentration (left) and comparison of osmotic suction of saturated red gypsum mud specimens and pore water from the same mud (right).

5.7 Strižna trdnost merjena v laboratoriju

Meritve strižne trdnosti sedimentov smo izvedli s konusom in krilno sondo (nedrenirano stanje) in v direktnem strižnem aparatu (drenirano stanje). Zaradi rahlega naravnega stanja vzorcev refula in pripovršinskih plasti mulja, triosnih preiskav nismo izvajali. Preizkušanci refula so bili preiskani pregneteni, preizkušanci mulja sadre pa odvisno od globine in gostotnega stanja; pregneteni ali delno rekonstituirani. Preiskave so bile izvedene na naravno vlažnih preizkušancih.

Krilna sonda DV3T HB (Brookfield) je podrobneje opisana v poglavju 4.4.5. Dimenzijo krilne sonde smo izbrali glede na konsistenčno stanje preizkušanca, hitrost pa po standardu ASTM D 4648, 60 do 90°/min (ASTM, 2016). Preizkušanci vertikalno niso bili obremenjeni.

Drenirano strižno trdnost smo izmerili z direktno strižno preiskavo. Konsolidacijo smo zaradi rahlega stanja visoko vlažnih preizkušancev izvajali postopoma. Pričeli smo z bremensko stopnjo 12.5 kPa in nadaljevali v stopnjah do končne obremenitve 25, 50, 100, 150, 200 ali 300 kPa. Preizkušanci so bili

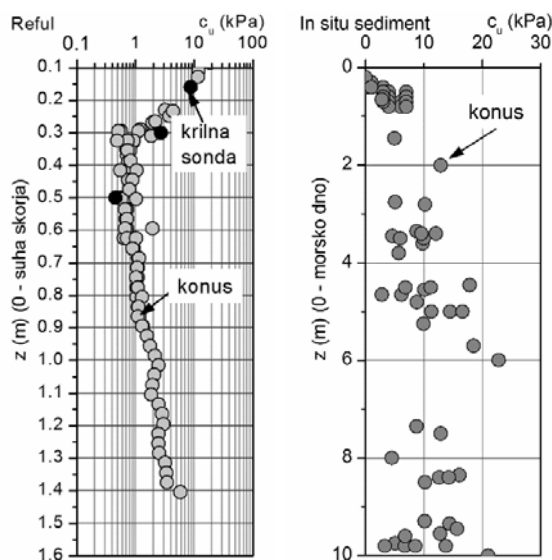
med preiskavo preplavljeni z vodo iz vodovoda. Po končani konsolidaciji smo preizkušance strigli s hitrostjo, ki smo jo določili iz krivulj konsolidacije in je bila tolikšna, da med preiskavo ni prišlo do presežnih pornih tlakov. Vpliv hitrosti striga na izmerjene vrednosti je bil raziskan v diplomskem delu (Šelekar, 2015).

Strižne karakteristike, ki smo jih določili iz meritev na terenu, bodo primerjalno, z rezultati laboratorijskih meritev interpretirane v ločenem poglavju (5.11.6).

5.7.1 Nedrenirana strižna trdnost

Na Sliki 5.24 (levo) je prikazan profil nedrenirane strižne trdnosti (c_u) refula v laguni na lokaciji bodočega kamionskega terminala (Sermin). Vpliv površinskega sušenja sega do globine približno 0.3 m, kjer c_u iz vrednosti 10 kPa (suha skorja), upade na manj kot 1 kPa. Globlje c_u počasi narašča in na globini 1.4 m doseže vrednost približno 3 kPa. Merjene vrednosti c_u so neodvisne od metode merjenja (konus, krilna sodna).

Vpliv premeščanja morskega sedimenta in sedimentacije v laguni na njegove trdnostne karakteristike smo ocenili iz primerjalne analize nedrenirane strižne trdnosti refula in in situ sedimenta (Slika 5.24, desno). Do globine ca. 0.3 m primerjava merjenih vrednosti ni mogoča zaradi suhe skorje na refulu. Globlje so merjene vrednosti podobnega velikostnega reda.



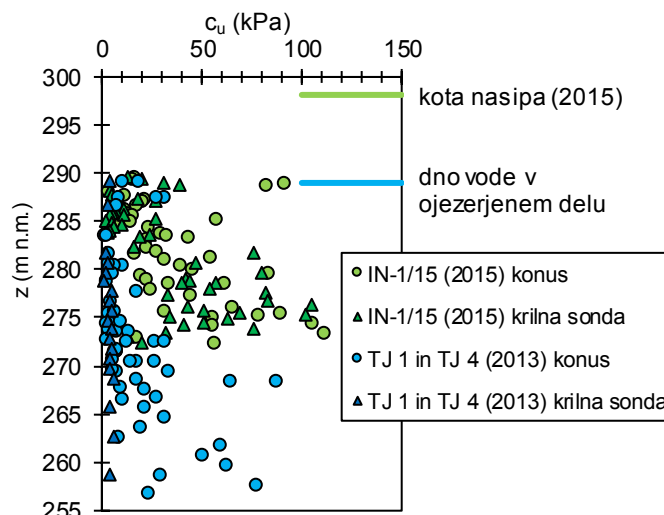
Slika 5.24: Nedrenirana strižna trdnost refula (levo) in in situ sedimenta na morskem dnu (desno).

Figure 5.24: Undrained shear strength of deposited dredged marine sediment (left) and in situ sediment (right).

Nedrenirana strižna trdnost mulja sadre v akumulaciji generalno z globino narašča (Slika 5.25, modri simboli). Kaže se velik raztros merjenih vrednosti, rezultati meritev pa so močno odvisni od metode merjenja. Konus daje višjo vrednost c_u od krilne sonde. To lahko pojasnimo z naravo materiala in obliko zrn. Meritev s konusom je hipna in poteka na principu padca konusa na zglajeno površino. S

krilno sondo prodremo globlje v vzorec, med vrtenjem pa porušimo strukturo materiala (premeščanje in orientacija zrn).

Suh nasip iz filtrskega kolača sadre ima, tako kot na vlago, učinek tudi na nedrenirano strižno trdnost. Mulj pod nasipom izkazuje pričakovano višjo nedrenirano trdnost od mulja sadre v akumulaciji (Slika 5.25, zeleni simboli).

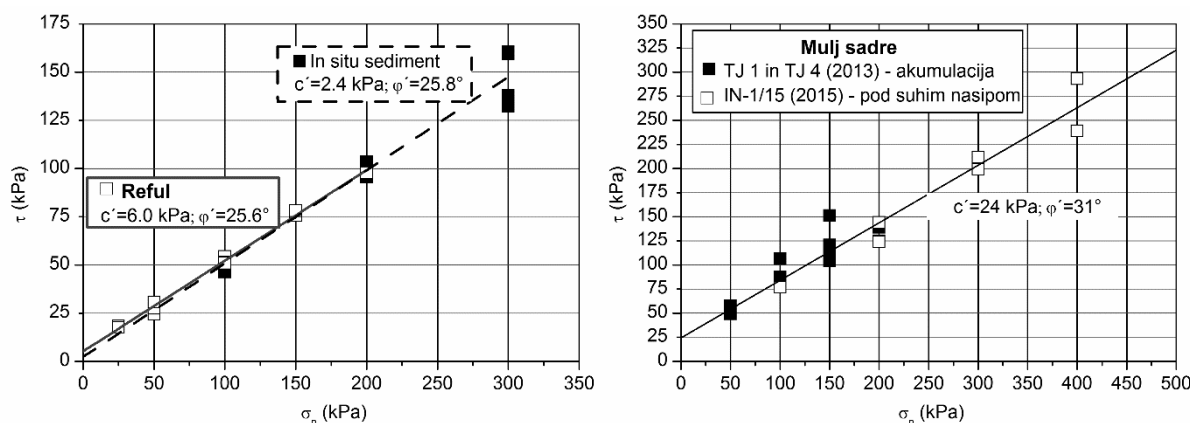


Slika 5.25: Nedrenirana strižna trdnost mulja sadre v ojezeritvi (modri simboli) in pod suhim nasipom (zeleni simboli).

Figure 5.25: Undrained shear strength of the red gypsum mud from the accumulation (blue symbols) and under the dry embankment (green symbols).

5.7.2 Drenirana strižna trdnost

Ovojnice maksimalnih strižnih napetosti, izmerjenih v direktnem strižnem aparatu, so prikazane na Sliki 5.26. Strižna trdnost refula je primerljiva strižni trdnosti in situ sedimenta (Slika 5.26, levo), strižna trdnost mulja sadre iz akumulacije pa sovпада s strižno trdnostjo mulja pod suhim nasipom (Slika 5.26, desno). Vrednosti, izmerjene na refulu, so značilne za glinene zemljine, strižne karakteristike mulja sadre pa ustrezajo meljem.



Slika 5.26: Drenirana strižna trdnost refula in in situ sedimenta (levo) in mulja sadre (desno).

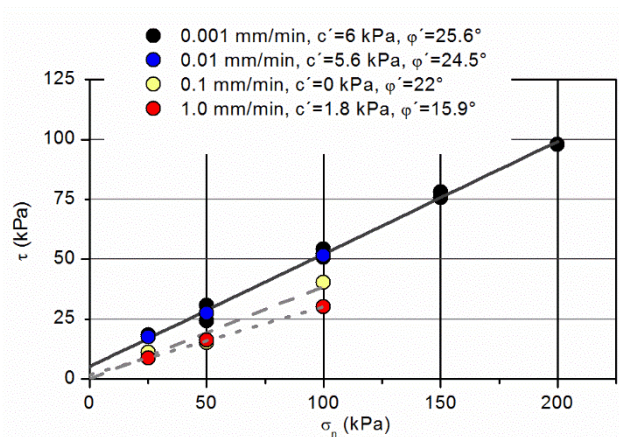
Figure 5.26: Drained shear strength of dredged and in situ marine sediment (left) and of red gypsum mud (right).

5.7.3 Vpliv hitrosti na drenirano strižno trdnost refula

Vpliv hitrosti striženja na drenirano strižno trdnost refula smo raziskali v direktnem strižnem aparatu (Šelekar, 2015).

Vsi preizkušanci so bili vgrajeni naravno vlažni ($w = 91\%$) in med preiskavo preplavljeni. Iz krivulj konsolidacije smo kot ustrezno ocenili hitrost striženja 0.001 mm/min . Pri tako nizki hitrosti, bi poleg nekaj dni trajajoče konsolidacije (5-7 dni), za fazo striženja potrebovali najmanj 5 dni. Preverili smo, kako hitrost striženja vpliva na rezultat.

Ovojnice maksimalnih vrednosti strižnih napetosti in strižne karakteristike so, za vse strižne hitrosti, zbrane na Sliki 5.27. Ugotovljeno je dobro ujemanje rezultatov strižne preiskave pri za dekado višji hitrosti, od tiste, določene iz linije konsolidacije. Striženje pri še višjih hitrostih pa rezultira v neprimerljivo nižjih interpretiranih strižnih karakteristikah.



Slika 5.27: Vpliv hitrosti striga na izmerjene strižne karakteristike refula.

Figure 5.27: The influence of shear speed on the shear strength of dredged marine sediment.

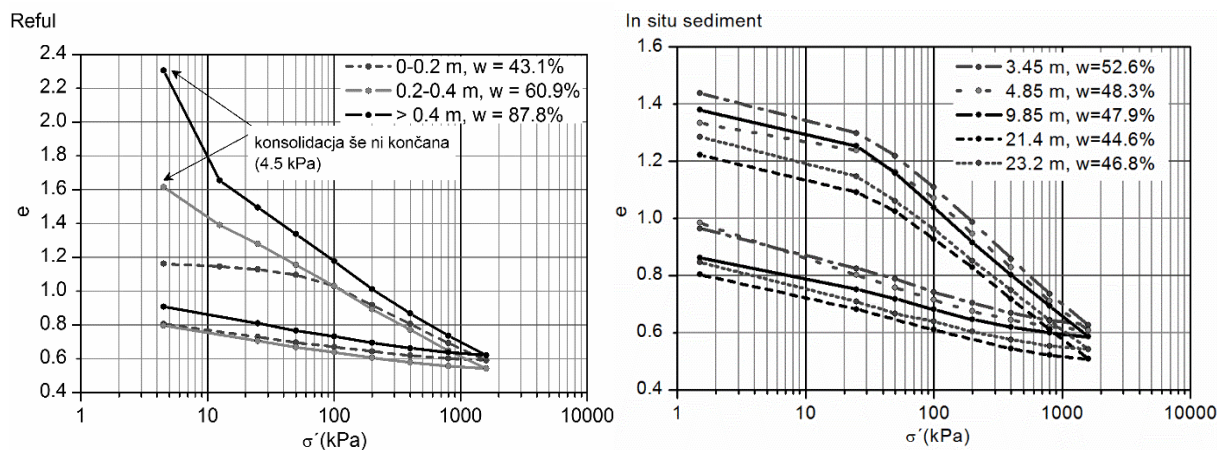
5.8 Deformabilnost

5.8.1 Reful

Rezultati preiskav stisljivosti refula in in situ sedimenta iz Luke Koper so prikazani na Sliki 5.28. Začetni količnik por je odvisen od mesta odvzema vzorca in globine. Pri bremenskih stopnjah višjih od 100 kPa in med razbremenjevanjem, se krivulje stisljivosti vseh preizkušancev ujamejo. Indeks stisljivosti (C_c), določen iz krivulj konsolidacije po zvezi (5.3), je med 0.35 in 0.40 za in situ sediment in med 0.37 (skorja) in 0.50 (pod skorjo) za reful.

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma_v'} \quad (5.3)$$

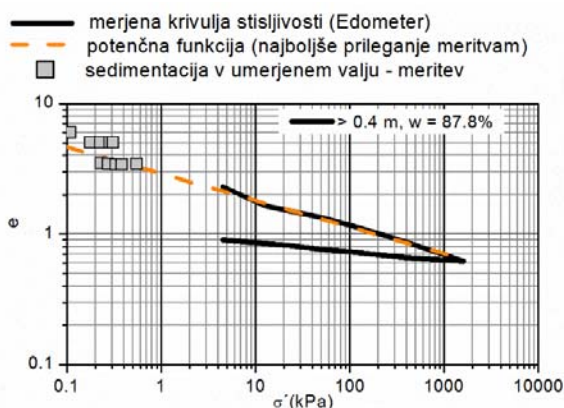
kjer je Δe sprememba količnika por na izbranem linearnem delu krivulje stisljivosti in $\Delta \log \sigma_v'$ sprememba logaritma efektivne vertikalne napetosti na istem linearnem delu krivulje stisljivosti.



Slika 5.28: Krivulje stisljivosti refula (levo) in in situ sedimenta (desno). Legenda: 0-0.2 m globina, w=43.1% vlaga ob vgradnji.

Figure 5.28: Compression curves of dredged marine sediment (left) and in situ marine sediment (right). Legend: 0-0.2 m depth, w=43.1% initial water content.

Količnik por pri t.i. nični efektivni vertikalni napetosti (angl. *zero effective stress void ratio*) smo izračunali iz sedimentacije suspenzije refula v umerjenih valjih in iz obremenilnega dela krivulje konsolidacije (Slika 5.29). Na ta način določen količnik por predstavlja stanje sedimenta, po končani sedimentaciji, ob pričetku konsolidacije (Znidarčič, 2007). Merjenim vrednostim obremenilnega dela krivulje stisljivosti se najbolje prilega navadna potenčna funkcija (oranžna linija na Sliki 5.29), ki se dobro ujame s količniki por, določenimi s preiskavo proste sedimentacije (sivi simboli na Sliki 5.29).



Slika 5.29: Količnik por refula pri t.i. nični efektivni vertikalni napetosti.

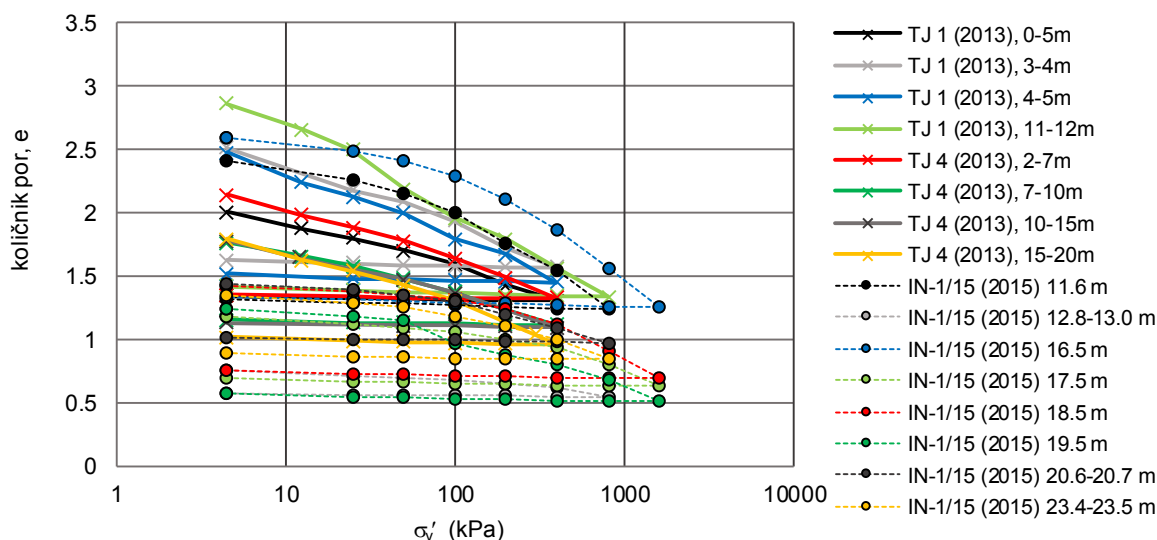
Figure 5.29: Zero effective vertical stress void ratio of dredged marine sediment.

Tudi drugi raziskovalci so ugotovili, da lahko merjene vrednosti najbolj opišemo s krivuljo, katere osnova je potenčna funkcija. Model za opis enodimenzionalnega stiskanja normalno konsolidiranih koherentnih zemljin, oblike potenčne funkcije, je podal Hardin (1989). Liu in Znidarčič (1991) sta v svojem modelu odpravila pomanjkljivosti Hardin-ovega modela in ga poenostavila. Za modelni opis krivulje konsolidacije zemljin sta podala razširjeno potenčno funkcijo, oblike $e = A(\sigma' + Z)^B$, kjer sta A in B brezdimenzijski konstanti, dobljeni iz rezultatov raziskav, in Z vrednost efektivne napetosti izračunane za začetni količnik por. Parameter Z preprečuje numerične nestabilnosti pri nizkih

efektivnih napetostih, kjer količnik por narašča eksponentno. Ugotovila sta, da je funkcija primerna za normalno konsolidirane in prekonsolidirane zemljine in omogoča določitev količnika por od nične efektivne napetosti do izbrane maksimalne efektivne napetosti. V naši raziskavi smo merjene vrednosti opisali z navadno potenčno funkcijo (Slika 5.29), podrobnejše analize razlik med navadno in razširjeno potenčno funkcijo nismo izvajali.

5.8.2 Mulj sadre

Krivulje stisljivosti mulja sadre iz ojezeritve (TJ-1 in TJ-4) in pod suhim nasipom (IN-1/15) so prikazane na Sliki 5.30. Krivulje, podane v soodvisnosti med vertikalno efektivno napetostjo (σ'_v) in količnikom por (e), kažejo velik raztros merjenih vrednosti. Razlik v deformacijskem obnašanju neobremenjenega mulja sadre v ojezeritvi in mulja sadre, obremenjenega s suhim nasipom, ni moč jasno definirati. Ugotovili smo, da za mulj sadre takšna, sicer v geotehniko običajna interpretacija meritev v edometru, ni najbolj indikativna.



Slika 5.30: Krivulje stisljivosti mulja sadre, soodvisnost med količnikom por (e) in efektivno vertikalno napetostjo (σ'_v).

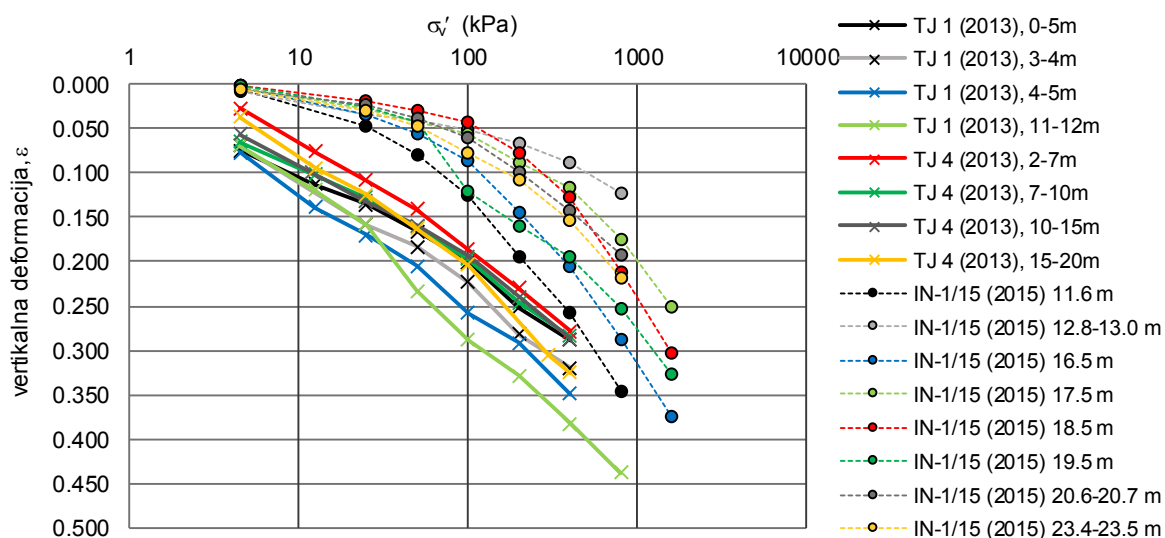
Figure 5.30: Compression curves of red gypsum mud, void ratio (e) versus effective vertical stress (σ'_v).

Iz znanega začetnega količnika por (e_0) in količnika por, določenega po koncu vsake bremenske stopnje, smo zato za obremenilni del krivulje iz vrednotili vertikalno deformacijo (ε). Krivulje stisljivosti v obliki odvisnosti $\varepsilon - \sigma'_v$ so prikazane na Sliki 5.31. Na ta način podani rezultati preiskav so bolj pregledni. Lepo se kaže velika razlika med deformacijskim obnašanjem neobremenjenega mulja iz ojezeritve (Slika 5.31, polne črte) in mulja, obremenjenega s suhim nasipom (Slika 5.31, prekinjene črte).

S preiskavami stisljivosti v edometru smo prepoznali izrazito sekundarno konsolidacijo oz. lezenje sadre. Časovni potek konsolidacije/lezenja preizkušanca mulja sadre, preplavljenega z vodo iz akumulacije, ki ga pri bremenski stopnji 400 kPa spremljamo že več kot šest mesecev, podajamo na Sliki 5.32, levo. Primarna faza konsolidacije se kaže samo pri bremenski stopnji 4.5 kPa. Pri ostalih

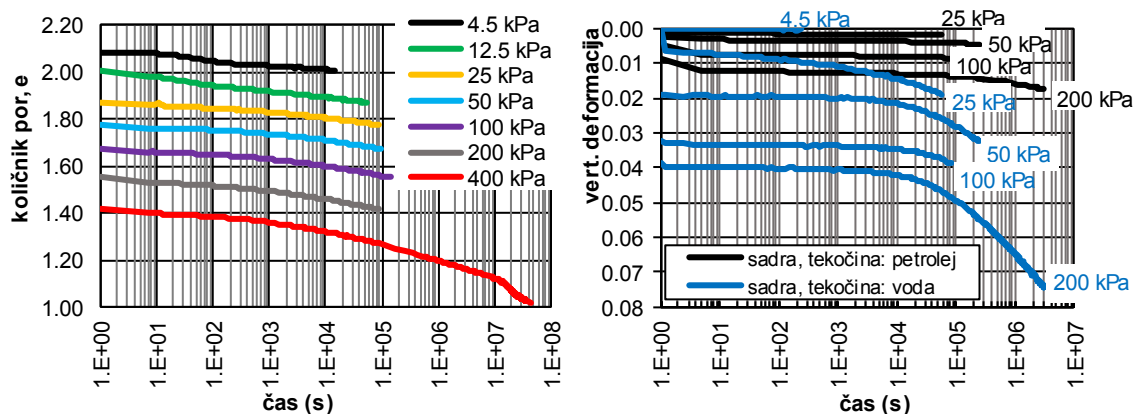
bremenskih stopnjah je ne moremo ločiti od sekundarne konsolidacije, ki se vrši predvsem na račun lezenja.

Vodo iz ojezeritve mulja sadre smo v preiskavah uporabili zato, ker bi se sicer del konsolidacijskega lezenja lahko zgodil zaradi topnosti sadre v vodi. To smo pokazali s preiskavo dveh paralelnih preizkušancev energetske sadre. Enega smo med preiskavo preplavili z vodo, drugega pa s petrolejem. Časovni potek konsolidacijskega lezenja je prikazan na Sliki 5.32, desno. V petroleju je lezenje neprimerljivo manjše kot v vodi (Petkovšek, 2014).



Slika 5.31: Krivulje stisljivosti mulja sadre, soodvisnost vertikalne deformacije (ϵ) in efektivne vertikalne napetosti (σ'_v).

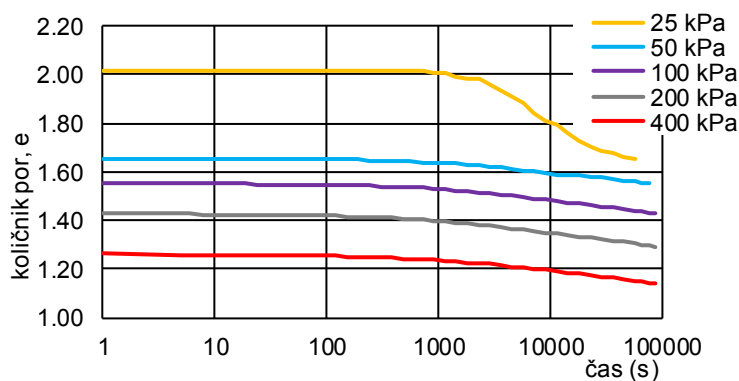
Figure 5.31: Compression curves of red gypsum mud, vertical strain (ϵ) versus effective vertical stress (σ'_v).



Slika 5.32: Časovni potek konsolidacije mulja sadre v edometru, lezenje med dolgo bremensko stopnjo 400 kPa (levo) in konsolidacijsko lezenje energetske sadre v petroleju in vodi (desno) (Petkovšek, 2014).

Figure 5.32: Consolidation of red gypsum mud in oedometer, creep observed during long loading stage 400 kPa (left) and consolidation creep of gypsum in petroleum and water (right) (Petkovšek, 2014).

Primarno konsolidacijo, ki je v navadnem edometru, na preizkušancih višine 19 mm, nismo uspeli identificirati, bi lahko bolje izmerili na preizkušancih večjih dimenzij, kjer vse poteka počasneje. Preiskavo konsolidacije smo zato izvedli v večjem edometru (t.i. Rowe celici), na vzorcu višine 100 mm. Rezultati so prikazani na Sliki 5.33. Vidimo, da je v primerjavi z vzorcem višine 19.1 mm (Slika 5.32, levo), konsolidacija vzorca višine 100 mm res bistveno počasnejša, primarna faza konsolidacije pa je, podobno kot v navadnem edometru, vidna samo pri najnižji bremenski stopnji (25 kPa).



Slika 5.33: Časovni potek konsolidacije mulja sadre v velikem edometru (Rowe celici).

Figure 5.33: Consolidation of red gypsum mud in Rowe oedometer.

Sekundarno konsolidacijo/konsolidacijsko leženje mulja sadre, ki smo ga izmerili v edometru in je posledica preurejanja zrn, iztiskanja porne vode in raztapljanja soli, bomo v poglavju 8 opisali z materialnim modelom. Strižno leženje mulja sadre bomo obravnavali v sklopu reoloških lastnosti.

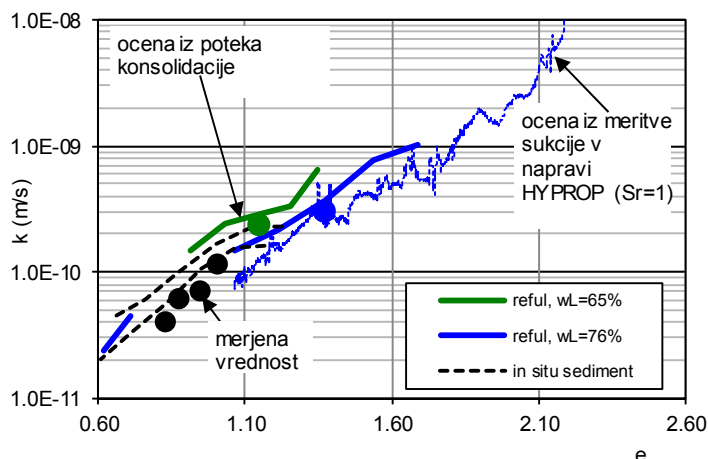
5.9 Vodoprepustnost v zasičenem stanju

Koeficient vodoprepustnosti (k) je odvisen od strukture por, gostotnega stanja zemljine (količnika por) in stopnje zasičenosti. V nadaljevanju bomo obravnavali vodoprepustnost zasičenih sedimentov.

5.9.1 Reful

Soodvisnost količnik por – vodoprepustnost za reful in in situ sediment je prikazana na Sliki 5.34. Točke (krogi) na sliki so rezultati meritev v edometru, lomljenje ravne linije so prepustnosti določene iz poteka konsolidacije, krivulja (modra) vodoprepustnosti pa je izračunana iz meritev sukcije v napravi Hyprop ob predpostavki 100% zasičenosti.

Reful ima, pri enakem količniku por, primerljivo vodoprepustnost kot in situ sediment. Merjene vrednosti sovpadajo z oceno vodoprepustnosti iz linije konsolidacije in so enakega velikostnega reda kot vodoprepustnost izračunana iz meritev sukcije (Hyprop).

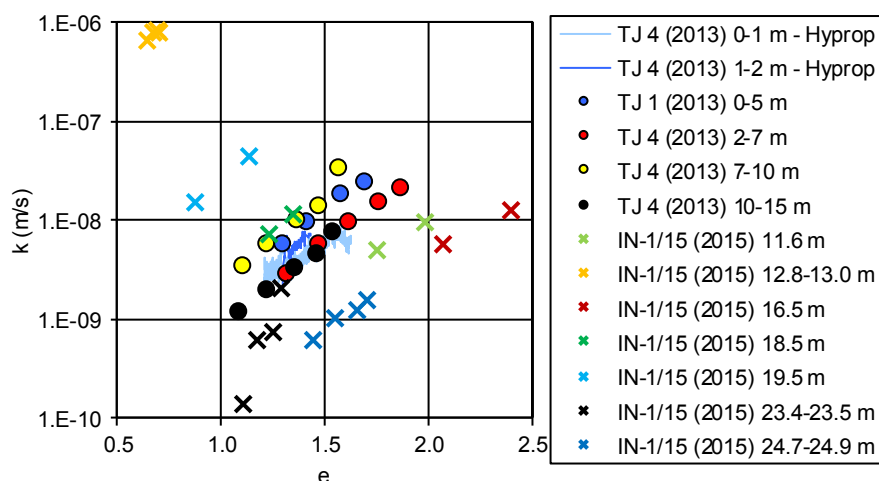


Slika 5.34: Vodoprepustnost refula in in situ sedimenta.

Figure 5.34: Hydraulic conductivity of dredged and in situ marine sediment.

5.9.2 Mulj sadre

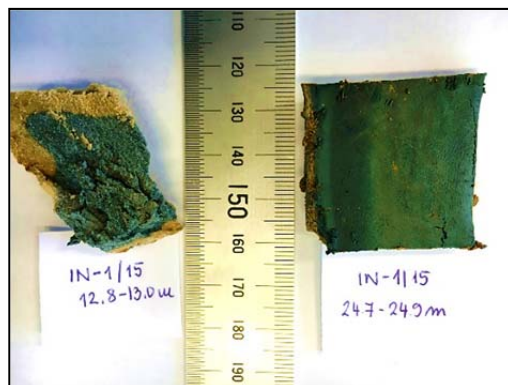
Vodoprepustnost mulja sadre, merjena v edometru (točkovni podatki) in ocenjena iz meritev sukcije v napravi Hyprop (krivulji), je v odvisnosti od količnika por prikazana na Sliki 5.35. V primerjavi z muljem pod suhim nasipom, izkazuje mulj iz ojezeritve manjše raztrose merjenih vrednosti. Merjene vodoprepustnosti mulja sadre iz ojezeritve so primerljive ocenjenim iz preiskave sukcije v napravi Hyprop.



Slika 5.35: Vodoprepustnost mulja sadre iz ojezeritve in mulja sadre pod suhim nasipom.

Figure 5.35: Hydraulic conductivity of red gypsum mud from accumulation and under the dry embankment.

Raztros vodoprepustnosti mulja sadre pod suhim nasipom lahko pojasnimo z makroskopskim pregledom mejnih vzorcev (Slika 5.36). Vzorec na globini 12.8 m - 13.0 m, ki izkazuje najvišjo vodoprepustnost (red velikosti 10^{-6} m/s), je meljasto peščene narave. Zrna v vzorcu so lepo vidna. Nasprotno, je vzorec iz globine 24.7 m - 24.9 m, ki izkazuje vodoprepustnost reda velikosti 10^{-9} m/s, finoizrnatna homogena gošča.



Slika 5.36: Pogled na različno prepustna vzorca mulja sadre pod suhim nasipom.
Figure 5.36: View on red gypsum mud specimens with different hydraulic conductivity.

5.10 Rezultati terenskih preiskav v refulu

Pred meritvijo CPTu smo lokalno odstranili suho površino, debeline ca. 5 cm - 10 cm. Poleg standardnega konusa smo prvič v Sloveniji meritve izvedli tudi s t.i. piezo kroglo (angl. *piezoball*). Trije uporabljeni postopki vrednotenja nedrenirane strižne trdnosti refula, povzeti po Robertson in Cabal (2015) in Colreavy et al. (2016), so podrobneje opisani v nadaljevanju.

(1) Vrednotenje c_u iz meritev odpora pod konico standardnega konusa (5.4):

$$c_u = \frac{q_{cnet}}{N_{kt}} \quad (5.4)$$

kjer je N_{kt} empirični faktor, med 10 in 18, v izračunih smo privzeli povprečno vrednost 14. q_{cnet} izračunamo po (5.5).

$$q_{cnet} = q - [\sigma_v - u_2 \cdot (1 - \alpha)] \quad (5.5)$$

kjer je σ_v totalna vertikalna napetost na globini z , u_2 merjeni tlak vode tik nad konico med penetracijo in α faktor sonde, določen s kalibracijo v laboratoriju (angl. *net area ratio*) (0.75).

(2) Vrednotenje c_u iz presežnih porežnih tlakov; meritve izvedene s standardnim konusom (5.6) in (5.7).

$$c_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \quad (5.6)$$

$$\Delta u = u_2 - u_0 \quad (5.7)$$

kjer je $N_{\Delta u}$ empirični faktor med 4 in 10, v naših izračunih 8 in u_0 hidrostatski tlak na globini z .

(3) Vrednotenje c_u iz meritev s piezo kroglo.

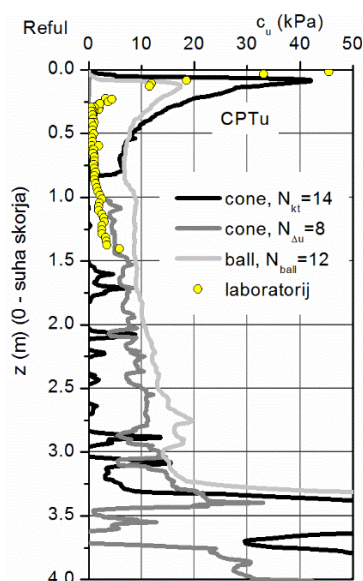
Izračun nedrenirane strižne trdnosti iz meritev s piezo kroglo, smo izvedli po Colreavy et al. (2016), ki za izračun korigirane odpornosti piezo krogle (q_{bnet}), povzema enačbe Chunga in Randolpha (2004) (5.8) in (5.9).

$$c_u = \frac{q_{bnet}}{N_{ball}} \quad (5.8)$$

$$q_{bnet} = q - [\sigma_v - u_0 \cdot (1 - \alpha)] \cdot \frac{A_s}{A_p} \quad (5.9)$$

kjer je N_{ball} empirični faktor, ki ima vrednost 12 (Long et al., 2014), A_s projekcijska površina plašča (nastavka), v našem primeru 10 cm^2 in A_p projekcijska površina krogle, v našem primeru 100 cm^2 .

Rezultati meritev, izračunani po postopkih (1) do (3) so podani na Sliki 5.37. Meritve odpora konice konusa so premalo natančne za mehke gline. Vrednosti nedrenirane strižne trdnosti, merjene s piezo kroglo in izračunane iz presežnih pornih tlakov so primerljive. V laboratoriju izmerjene vrednosti c_u so nižje od merjenih na terenu (Slika 5.37, rumeni simboli). Odstopanja so lahko posledica različne lokacije terenskih meritev in izvedbe vrtin (razdalja ca. 5 m), bolj verjetno pa so posledica pregnetenosti laboratorijskih preizkušancev.



Slika 5.37: Nedrenirana strižna trdnost refula določena iz terenskih meritev in merjena v laboratoriju.

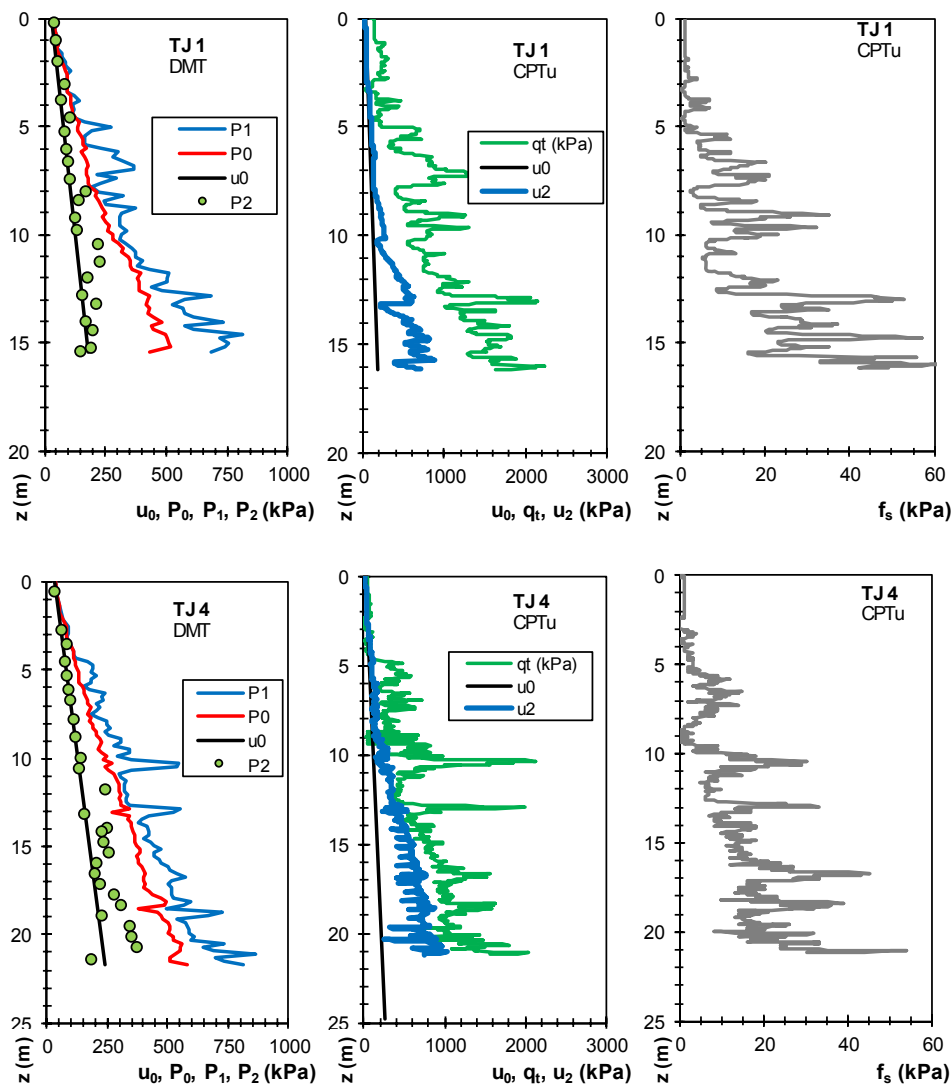
Figure 5.37: In situ undrained shear strength of dredged marine sediment in comparison with results of laboratory tests.

5.11 Rezultati terenskih preiskav v mulju sadre

V mulju sadre v ojezeritvi smo izvedli preiskave s CPTu, DMT in terensko krilno sondo. Z rezultati laboratorijskih raziskav smo že pokazali, da se mulj sadre razlikuje od zemljin (nižja gostota zrn, oblika zrn,...) primerljive zrnivosti, zato je potrebno tudi pri interpretaciji podatkov terenskih raziskav, upoštevati specifični značaj mulja in morebitne vplive strukture na rezultate.

5.11.1 Merjeni podatki – CPTu in DMT

Merjeni podatki CPTu in DMT v TJ-1 in TJ-4, ki smo jih uporabili za nadaljnje analize in interpretacije geomehanskih parametrov, so podani na Sliki 5.38. Legenda k Sliki 5.38: P_0 – merjen tlak nedeformirane membrane (v začetni legi), P_1 – tlak, ki središče membrane izboči za 1.1 mm, P_2 – tlak, ko je membrana med razbremenitvijo zopet v nedeformirani legi, q_t – korigirani odpor konice, u_0 – prvotni tlak v tleh na koti izvajanja testa, u_2 – penetracijski porni tlak, f_s – odpor po plašču.



Slika 5.38: Merjeni (surovi) podatki CPTu in DMT v TJ-1 (zgoraj) in TJ-4 (spodaj).

Figure 5.38: Raw data of CPTu and DMT in TJ-1 (upper) and TJ-4 (lower).

5.11.2 Korelacije meritev CPTu in DMT

Iz podatkov DMT smo osnovne dilatometrijske količine (angl. *intermediate parameters*): materialni indeks I_{D_DMT} , indeks horizontalnega tlaka K_{D_DMT} in dilatometrijski modul E_{D_DMT} , z upoštevanjem korekcije togosti membrane, izvednotili iz merjenih tlakov po standardu CEN ISO/TS 22476-11 (SIST, 2008).

Iz meritev CPTu smo po Robertson in Cabal (2015) izračunali brezdimenzijska normirana odpora konice (Q_{t1}, Q_{tn}), normiran količnik trenja (F_r (%)), normiran porni tlak (B_q) in materialni indeks (angl. *soil behaviour type index*) (I_c).

Korelacije meritev CPTu – DMT smo analizirali po Robertson (2009a). Primerjali smo osnovne dilatometrijske količine ($I_{D_DMT}, K_{D_DMT}, E_{D_DMT}$) in iz normiranih CPTu parametrov, po zvezah (5.10) do (5.12), izračunane ustrezne količine ($I_{D_CPTu}, K_{D_CPTu}, E_{D_CPTu}$).

$$I_{D_CPTu} = 10^{(1.67 - 0.67I_{c1})} \quad (5.10)$$

$$K_{D_CPTu} = \begin{cases} 0.3(Q_{t1})^{0.95} + 1.05; & \text{če je } I_{c1} > 2.60 \\ \frac{0.144Q_{t1}}{I_{D_CPTu}}; & \text{sicer} \end{cases} \quad (5.11)$$

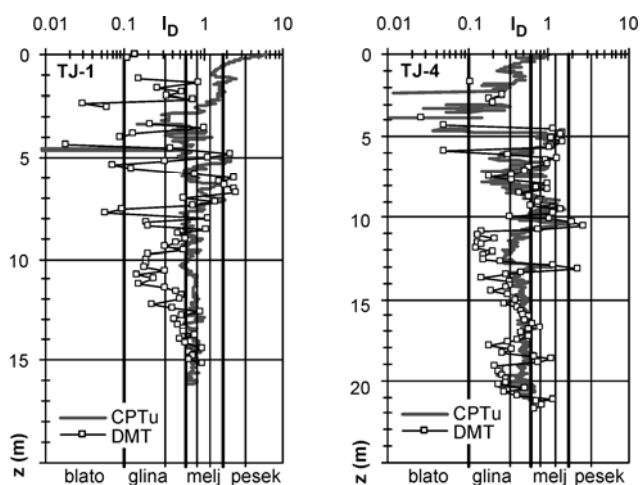
$$E_{D_CPTu} = 34.7 \cdot I_{D_CPTu} \cdot K_{D_CPTu} \cdot \sigma_v' \quad (5.12)$$

Primerjave so podane na Slikah 5.39 do 5.41.

Analize kažejo na razlike v parametru I_D , predvsem na globinah, kjer so bili z DMT identificirani sloji klasificirani kot mulj (izjemno mehko) ali šota.

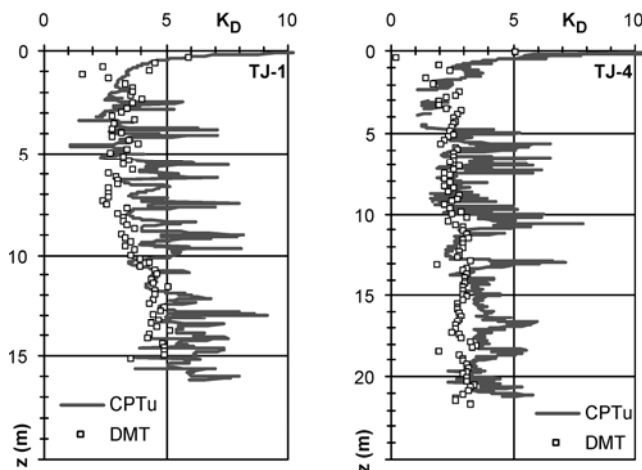
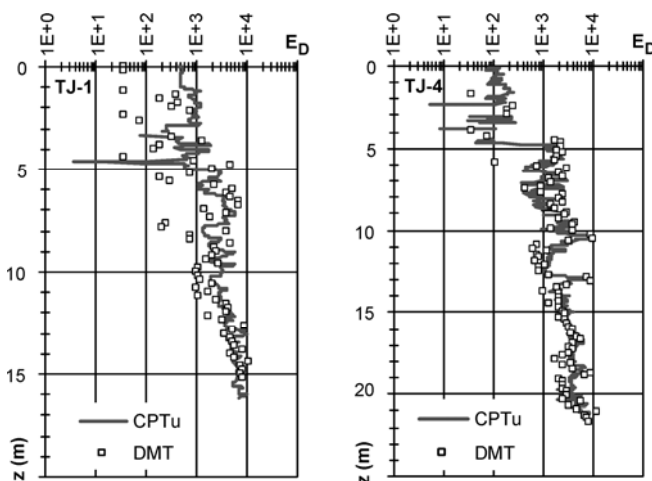
Vrednosti parametra K_D , iz vrednotene iz CPTu, so tudi do štirikrat višje od iz vrednotenih iz DMT. CPTu meritve kažejo izrazite »skoke«, katerim K_D , izračunan iz DMT, ne sledi. Ker parameter K_D nastopa v zvezah za izračun inženirskih količin (mirnih zemeljskih pritiskov, nedrenirane strižne trdnosti in drugih) iz DMT (Marchetti, 1980), je pričakovati, da se bodo razlike v parametru K_D odražale na izračunanih geomehanskih parametrih.

Ujemanje parametra E_D na globinah, večjih od 5 m, (Slika 5.41) je relativno dobro. Parameter E_D na globinah, večjih od 5 m, z globino narašča.



Slika 5.39: Primerjava parametra I_{D_DMT} in I_{D_CPTu} .

Figure 5.39: Comparison of parameters I_{D_DMT} and I_{D_CPTu} .

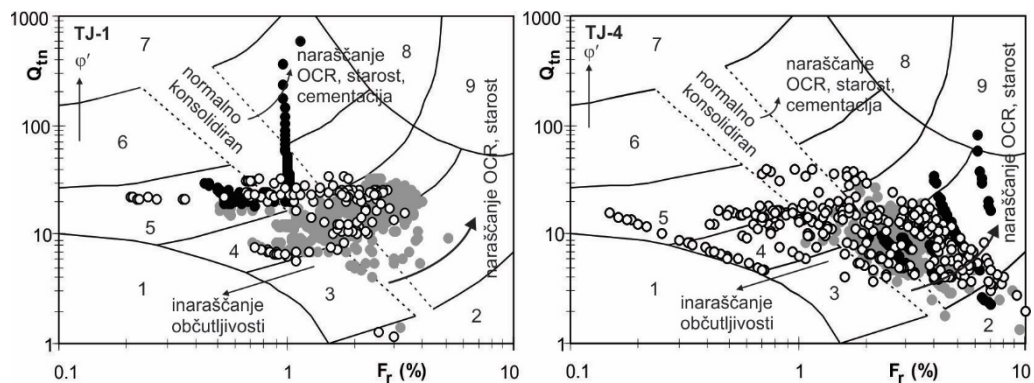
Slika 5.40: Primerjava parametra K_{D_DMT} in K_{D_CPTu} .Figure 5.40: Comparison of parameters K_{D_DMT} and K_{D_CPTu} .Slika 5.41: Primerjava parametra E_{D_DMT} in E_{D_CPTu} .Figure 5.41: Comparison of parameters E_{D_DMT} and E_{D_CPTu} .

S Slik 5.39 do 5.41 lahko vidimo, da je ujemanje osnovnih dilatometrijskih količin in ustreznih količin, izračunanih iz CPTu, boljše na lokaciji TJ-4, kjer je zrnavostna sestava mulja bolj homogena kot na lokaciji TJ-1 (glej Sliki 5.10 in 5.11).

5.11.3 Terenska klasifikacija mulja sadre

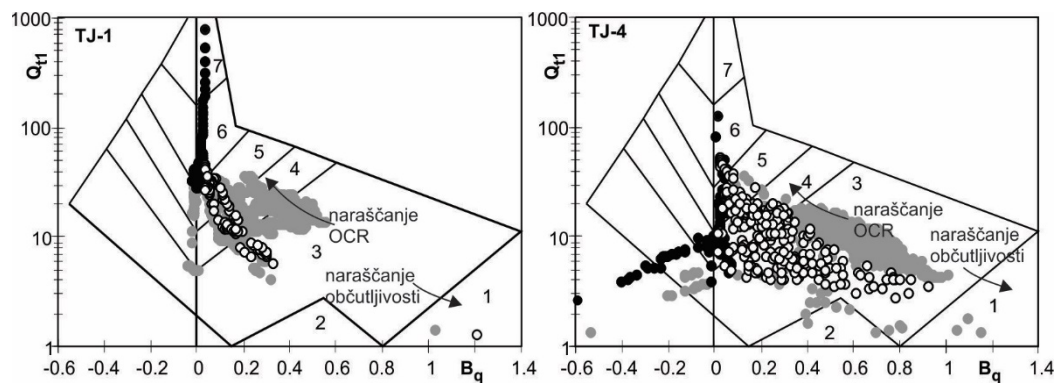
Na Sliki 5.42 je prikazan klasifikacijski diagram mulja sadre v odvisnosti $Q_{tn}-F_r$ (Robertson, 2009b), na Sliki 5.43 pa v odvisnosti $Q_{t1}-B_q$ (Robertson, 1990). Oba diagrama sta izvedena iz CPTu preiskav. Črni simboli na Slikah 5.42 in 5.43 opisujejo lastnosti mulja sadre na globini 0-2 m, beli simboli na globini med 4.5 in 7.5 m v TJ-1 in med 4.5 in 11.0 m v TJ-4, sivi simboli klasificirajo mulj na ostalih globinah. Klasifikacija mulja sadre iz DMT (Marchetti et al., 2001) je podana na Sliki 5.39. Klasifikacijo iz DMT smo, z izjemo mulja, klasificiranega kot blato/šota (angl. *mud/peat*), ustrezno uskladili s klasifikacijo po CPTu, v t.i. tipe glede na lastnosti mulja (angl. *soil behaviour type; SBT*) (Slika 5.44).

Ključ za klasifikacijo mulja sadre preko vrednosti 1 – 9 na Slikah 5.42 in 5.43 je skladno z razredi tipa zemljin; SBT (Slika 5.44), podan v Preglednici 5.6.



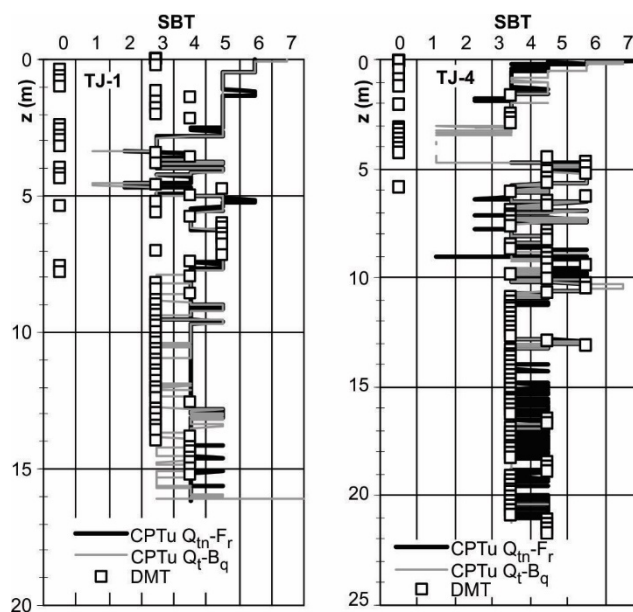
Slika 5.42: Klasifikacijski diagram; soodvisnost $Q_{tn}-F_r$ (Robertson, 2009b).

Figure 5.42: Classification chart; link between $Q_{tn}-F_r$ (Robertson, 2009b).



Slika 5.43: Klasifikacijski diagram; soodvisnost $Q_{tn}-B_q$ (Robertson, 1990).

Figure 5.43: Classification chart; link between $Q_{tn}-B_q$ (Robertson, 1990).



Slika 5.44: Klasifikacija mulja sadre iz CPTu in DMT.

Figure 5.44: Classification of red gypsum mud based on CPTu and DMT.

Preglednica 5.6: Ključ za klasifikacijo mulja sadre po CPTu in DMT (Slike 5.42 do 5.44).

Table 5.6: Explanation of numbers and values on classification charts (Figures 5.42 to 5.44).

Številka	SBT	DMT $I_{D, DMT}$
0	blato – šota (samo DMT)	< 0.1
1	občutljive, drobno zrnate zemljine	/
2	organske zemljine - gline	/
3	nizkoplastične gline, gline	0.1-0.6
4	visokoplastični melji, nizkoplastične gline	0.6-1.2
5	peščeni melji, meljasti peski	1.2-3.3
6	čisti peski, meljasti peski	> 3.3
7	pesek z gramozom, gosti peski (samo CPTu)	/
8	zelo togi peski do zaglinjeni peski (vezani ali visok OCR) (samo CPTu)	/
9	zelo toge drobno zrnate zemljine (vezane ali visok OCR) (samo CPTu)	/

S podatki CPTu in DMT smo zaznali razlike v lastnostih mulja sadre po globini, kar so potrdile tudi analize zrnivosti, vendar ne na primerljiv način. Po DMT ima mulj, odložen v zgornjih 5 m, lastnosti blata (angl. *mud – peat*). Od globine 4.5 m do 7.5 m v TJ-1 in do 11.0 m v TJ-4 ima mulj lastnosti meljev do meljastih peskov. Globlje od 10 m lahko mulj sadre po terenskih raziskavah klasificiramo kot nizkoplastično glino.

Razlike med terensko in laboratorijsko klasifikacijo je na zemljinah identificiral tudi Ku et al. (2010). Jung et al. (2008) je ugotovil, da so trenutni klasifikacijski diagrami iz CPTu premalo natančni in niso ustrezna podlaga za zanesljivo napoved lastnosti preiskanih materialov.

5.11.4 Prostorninska teža

Prostorninska teža mulja sadre po globini, izmerjena v laboratoriju, izračunana iz CPTu (enačba 5.13) (Robertson in Cabal, 2010) in določena iz DMT (Slika 5.45) (Marchetti, 1999), je prikazana na Sliki 5.46.

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 \cdot \log\left(\frac{f_s}{q_t} \cdot 100\right) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \quad 1.4 \leq \frac{\gamma}{\gamma_w} \leq 2.2 \quad (5.13)$$

kjer je γ_w prostorninska teža vode in p_a zračni tlak.

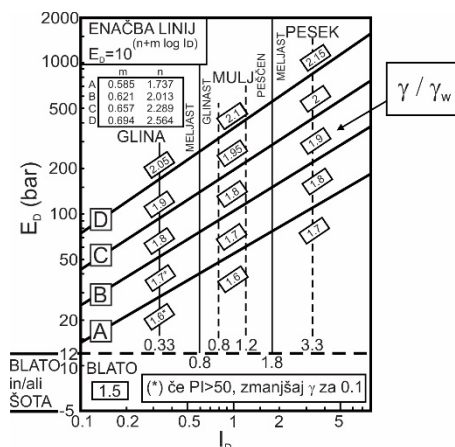
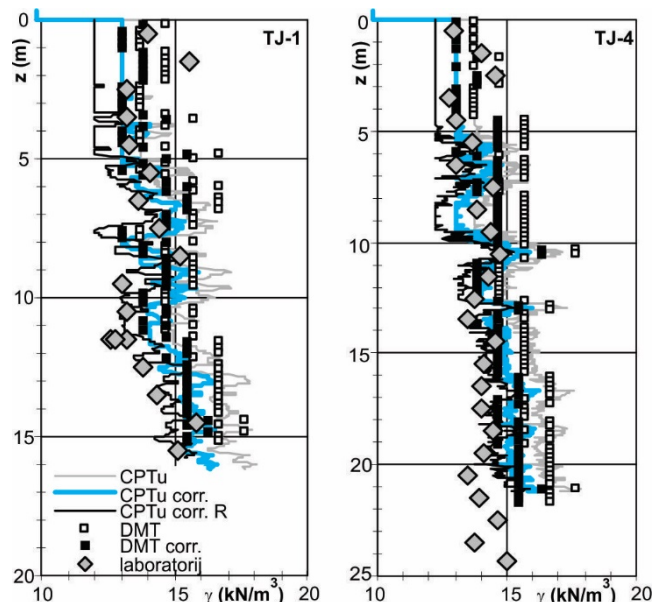
Slika 5.45: Diagram za določitev razmerja γ / γ_w iz DMT (Marchetti, 1999).

Figure 5.45: Diagram for determination of the ratio γ / γ_w from DMT (Marchetti, 1999).

Po Marchetti (1999) in Robertson in Cabal (2010) (enačba 5.13 in Slika 5.45), je za zemljine pričakovano odstopanje v prostorninski teži 1 kN/m^3 . Prostorninske teže mulja sadre, določene iz CPTu in DMT, so za ca. 8% oz. 1.25 kN/m^3 višje od izmerjenih v laboratoriju. Odstopanje je v velikostnem redu, pričakovanem za zemljine.



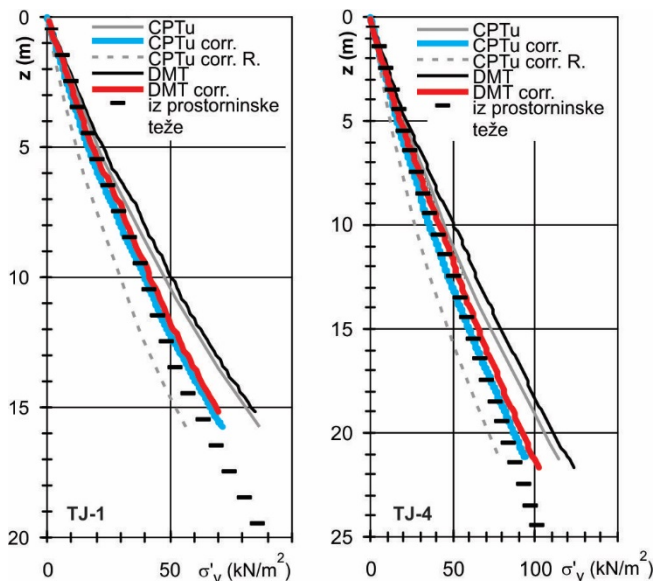
Slika 5.46: Primerjava prostorninske teže izvedenote iz CPTu in DMT in merjene v laboratoriju. Legenda: CPTu – izračun iz enačbe 5.13, CPTu corr. in DMT corr. – korekcija KMTAL, CPTu corr. R – korekcija po Robertson in Cabal (2010), DMT – določeno po Sliki 5.45, laboratorij – vrednosti, merjene v laboratoriju.

Figure 5.46: Comparison of unit weight, determined from CPTu and DMT and measured in the laboratory. Legend: CPTu – calculated from equation 5.13, CPTu corr. in DMT corr. – correction KMTAL, CPTu corr. R – correction after Robertson and Cabal (2010), DMT – determined from Figure 5.45, laboratorij – measured in the laboratory.

Večje razlike se pokažejo v izračunu efektivne vertikalne napetosti (σ'_v) (Slika 5.47). Efektivne vertikalne napetosti, izračunane iz prostorninskih tež, dobljenih iz DMT in CPTu, so do 20% višje od izračunanih iz v laboratoriju izmerjenih prostorninskih tež.

Možni razlog za razliko v prostorninskih težah in posledično v efektivnih vertikalnih napetostih je prostorninska teža zrnja. Zveze, ki smo jih uporabili za izračun γ in σ'_v , so razvite za zemljine s prostorninsko težo zrn med 25.5 in 26.5 kN/m^3 . Prostorninska teža zrn sadre je približno 23.1 kN/m^3 . Korekcijo, s katero upoštevamo dejansko prostorninsko težo zrn materiala, ki ga preiskujemo, sta v izračunu prostorninske teže podala Robertson in Cabal (2010). Enačbi (5.13) sta dodala člen, ki predstavlja razmerje dejanske merjene prostorninske teže zrnja (γ_s) oz. dejanske gostote zrnja (γ_s/γ_w) in gostote zrnja, upoštevane v empiričnih relacijah (2.65 t/m^3) (5.14).

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = \left[0.27 \cdot \log \left(\frac{f_s}{q_t} \cdot 100 \right) + 0.36 \cdot \log \left(\frac{q_t}{p_a} \right) + 1.236 \right] \cdot \frac{\gamma_s/\gamma_w}{2.65} \quad (5.14)$$



Slika 5.47: Primerjava efektivne vertikalne napetosti iz vrednotene iz prostorninske teže po CPTu in DMT in merjene v laboratoriju. Legenda – glej Sliko 5.46.

Figure 5.47: Comparison of effective vertical stress, determined from unit weight from CPTu and DMT and measured in the laboratory. Legend – see Figure 5.46.

Prostorninske teže in efektivne vertikalne napetosti, izračunane po enačbi (5.14), so na Slikah 5.46 in 5.47 prikazane kot niz CPTu corr. R. Vidimo, da so efektivne vertikalne napetosti, izračunane iz korigiranih prostorninskih tež, prenizke. Ugotovili smo, da korekcija, ki sta jo za izračun prostorninske teže podala Robertson in Cabal (2010), ni primerna za identifikacijo lastnosti mulja sadre v ojezeritvi.

Sodelavci KMTAL, pod vodstvom Mačka (še neobjavljeno delo), predlagamo za mulj sadre izračun prostorninske teže po zvezi (5.15), z upoštevanjem izmerjene prostorninske teže zrn mulja sadre (γ_s).

$$\gamma = \frac{\gamma_s + \gamma_w \cdot S_r \cdot e}{1 + e} \quad (5.15)$$

kjer je S_r stopnja zasičenja (v našem primeru 1) in e količnik por izračunan iz zveze (5.16).

$$e = \frac{\gamma_{s,soil} - \gamma_{est.}}{\gamma_{est.} - \gamma_w \cdot S_r} \quad (5.16)$$

kjer je $\gamma_{s,soil}$ prostorninska teža zrn zemljine (26.5 kN/m^3), $\gamma_{est.}$ prostorninska teža določena iz CPTu ali DMT.

Prostorninske teže, izračunane po zvezi, predlagani na KMTAL, so na Sliki 5.46 prikazane kot niz CPTu corr. (modra krivulja) in DMT corr. (črni simboli). Efektivne vertikalne napetosti, izračunane iz prostorninskih tež, določenih po enačbi (5.15), so enakega velikostnega reda, kot efektivne vertikalne napetosti, izračunane iz v laboratoriju izmerjenih prostorninskih tež (Slika 5.47, CPTu corr., modra krivulja in DMT corr., rdeča krivulja).

Splošno veljavnost predlagane zveze, bo potrebno preveriti še na drugih materialih.

5.11.5 Stisljivost

Module stisljivosti (angl. *constrained modulus*, M) mulja sadre smo po enačbi (5.17) iz vrednotili iz CPTu (Robertson, 2009b; Robertson in Cabal, 2015), po enačbi (5.18) iz DMT (Marchetti, 1980) in iz edometrijskih testov. Rezultati so prikazani na Sliki 5.48.

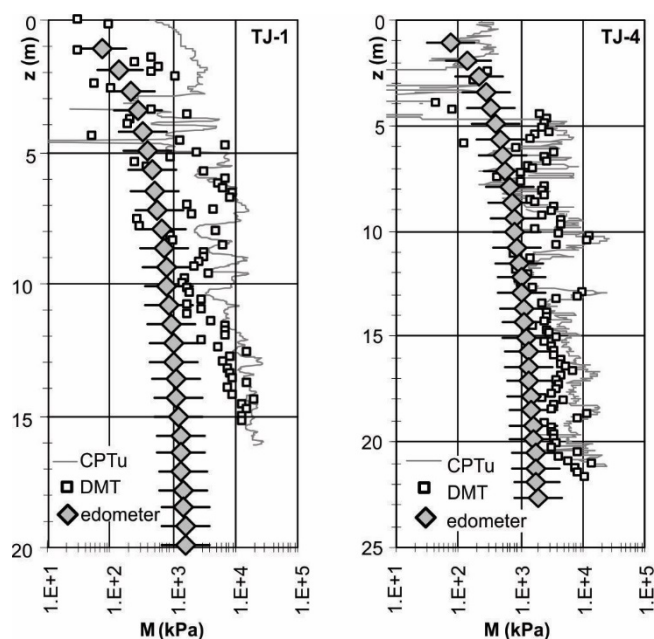
$$M_{CPTu} = \begin{cases} q_n \cdot \max(Q_{tn}, 14); & I_{cn} \geq 2.2 \\ 0.0188 \cdot q_n \cdot 10^{0.55 \cdot I_{cn} + 1.68}; & I_{cn} < 2.2 \end{cases} \quad (5.17)$$

$$M_{DMT} = R_M \cdot E_D \quad (5.18)$$

kjer R_M izračunamo po (5.19).

$$R_M = \begin{cases} 0.14 + 2.36 \cdot \log K_D; & \text{če je } I_D \leq 0.6 \\ R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \cdot \log K_D; & \text{če je } 0.6 < I_D < 3 \\ 0.5 + 2 \cdot \log K_D; & \text{če je } I_D \geq 3 \\ 0.32 + 2.18 \cdot \log K_D; & \text{če je } K_D > 10 \\ & \text{vedno } \geq 0.85 \end{cases} \quad (5.19)$$

$$R_{M,0} = 0.14 + 0.15 \cdot (I_D - 0.6) \quad (5.20)$$



Slika 5.48: Moduli stisljivosti iz vrednoteni iz CPTu in DMT in napoved na podlagi laboratorijskih preiskav. Črtica levo in desno od simbola (sivega diamanta) označuje verjetno zgornjo in spodnjo mejo modula stisljivosti, ocenjenega iz laboratorijskih preiskav.

Figure 5.48: Constrained modulus, calculated from CPTu and DMT and prediction based on laboratory tests. Short lines from the diamond (left and right) shows probable upper and lower limit of the constrained modulus estimated from the laboratory tests.

Moduli, določeni iz meritev na terenu, so višji od merjenih v laboratoriju (Slika 5.48). Razliko lahko pripišemo izvedbi in času trajanja testa. S CPTu in DMT, ki potekata hitro, v nedreniranih pogojih, ne

identificiramo lezenja mulja sadre, ki smo ga izmerili v laboratoriju v edometru. Iz previsokih modulov stisljivosti, izračunanih iz terenskih preiskav, ki ne upoštevajo bistvenih posebnosti mulja sadre (lezenja), bi izračunali veliko premajhne posedke.

5.11.6 Nedrenirana strižna trdnost

Primerjava nedrenirane strižne trdnosti mulja sadre, iz vrednotene iz laboratorijskih in terenskih preiskav, je prikazana na Sliki 5.49. Iz CPTu smo nedrenirano strižno trdnost izračunali po zvezah (5.4) in (5.5) (poglavje 5.10), v kateri smo privzeli vrednost faktorja N_{kt} 13 (Slika 5.49, CPTu q_n) in iz presežnih pornih tlakov po (5.6) in (5.7) (Slika 5.49, CPTu Δu) (Robertson in Cabal, 2015). Na vrednostih c_u , izračunanih iz CPTu, je lepo viden vpliv izvajanja disipacijskih testov (Slika 5.49, horizontalne puščice).

Iz DMT smo c_u izračunali po Marchetti (1980).

$$c_u = \left(\frac{c_u}{\sigma'_v}\right)_{NC} \cdot \sigma'_v \cdot OCR^\Lambda \quad (5.21)$$

kjer je $\Lambda = 1 - C_s/C_c = 0.8$ (Ladd et al., 1977) in $OCR = (0.5 \cdot K_D)^{1.56}$

$$c_u = \left(\frac{c_u}{\sigma'_v}\right)_{NC} \cdot \sigma'_v \cdot (0.5 \cdot K_D)^{1.25} \quad (5.22)$$

kjer je $(c_u/\sigma'_v)_{NC} = 0.22$. Predpostavka ustreza normalno konsolidiranim glinam (Mesri, 1975).

Iz zveze (5.22), ki jo za vrednotenje nedrenirane strižne trdnosti iz DMT podaja Marchetti (1980), dobimo v splošnem nižje vrednosti kot iz CPTu. Eden izmed razlogov je v empiričnem faktorju, ki predstavlja razmerje med nedrenirano strižno trdnostjo in efektivno vertikalno napetostjo normalno konsolidiranih glin $(c_u/\sigma'_v)_{NC} = 0.22$ (Mesri, 1975).

Wroth (1984) preko mehanike kritičnega stanja podaja zvezo za izračun nedrenirane strižne trdnosti (enačba 5.23). Če v zvezo (5.23) vstavimo razmerje $(c_u/\sigma'_v)_{NC} = 0.22$ in upoštevamo koeficient prekonsolidacije $OCR = 1$, ugotovimo, da empirični faktor, ki ga je predlagal Mesri (1975) za normalno konsolidirane gline, ustreza strižnemu kotu $\varphi' = 26^\circ$.

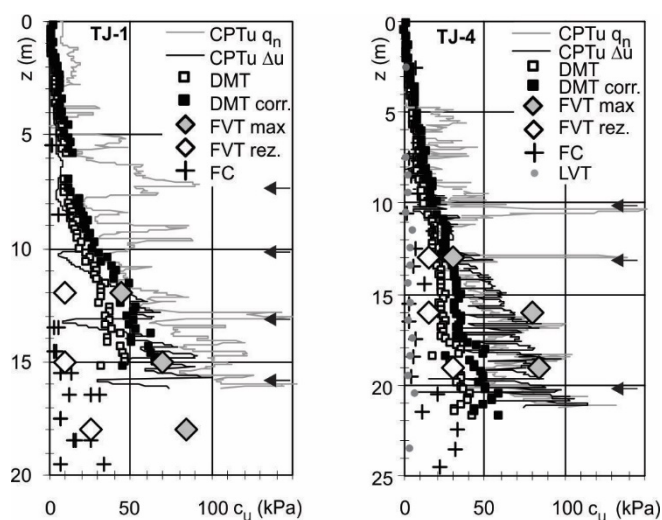
$$c_u = 0.5 \cdot \sin\varphi' \cdot \sigma'_v \cdot OCR^\Lambda \quad (5.23)$$

Za mulj sadre je strižni kot 26° prenizek, saj so vrednosti izmerjene v laboratoriju med 32° in 36° . Ob upoštevanju realnega strižnega kota, je empirični faktor $(c_u/\sigma'_v)_{NC} = 0.264$ in je za približno 1.2 krat višji od predpostavljenega za gline. Glede na izmerjene karakteristike mulja sadre, je potrebno ustrezno korigirati tudi parameter Λ , ki se mu vrednost poveša za 0.1; t.j. iz 0.8 na 0.9 in koeficient prekonsolidacije (OCR), katerega povprečna izmerjena vrednost za mulj sadre je 2.

Nedrenirane strižne trdnosti, vrednotene z upoštevanjem lastnosti mulja sadre, t.j. višjega strižnega kota in višje vrednosti Λ , so za približno 30% višje od izračunanih z upoštevanjem faktorjev za

normalno konsolidirane gline. Tako izračunane vrednosti c_u (Slika 5.49, DMT corr.) so bolj primerljive z vrednostmi izračunanimi iz CPTu.

Tudi Kamei in Iwasaki (1995) sta ugotovila, da so faktorji Λ in $(c_u/\sigma'_v)_{NC}$ za normalno konsolidirane gline neustrezni za zemljine na Japonskem (t.i. Japanese soils) in za vrednotenje uporabila korigirano vrednost Λ in razmerje $(c_u/\sigma'_v)_{NC} = 0.35$.



Slika 5.49: Primerjava nedrenirane strižne trdnosti, iz vrednotene iz CPTu, DMT, merjene s terensko krilno sondo (FVT) in v laboratoriju s konusom (FC) in z laboratorijsko krilno sondo (LVT).

Figure 5.49: Comparison of undrained shear strength, calculated from CPTu, DMT, measured with field vane (FVT) and determined in the laboratory with the fall cone (FC) and laboratory vane (LVT).

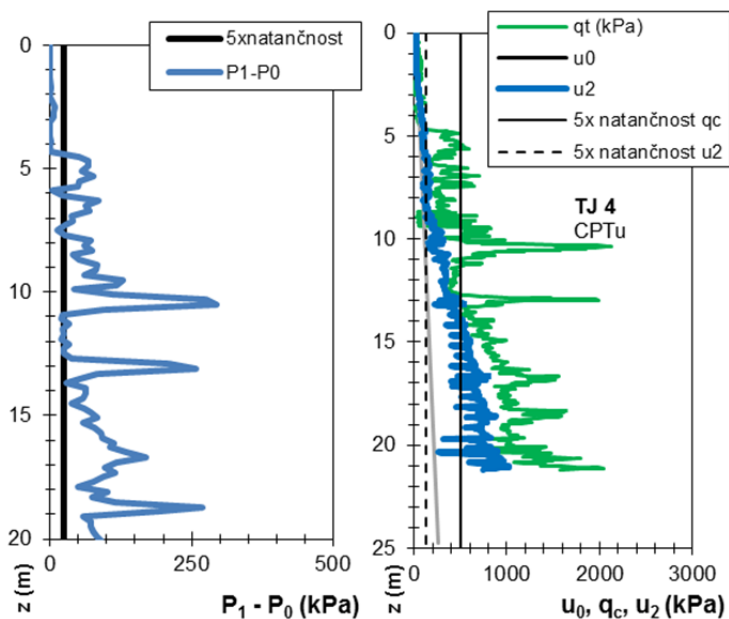
Meritve nedrenirane strižne trdnosti s krilno sondo (FVT) so bile izvedene na večjih globinah, saj je v bolj plitvih plasteh, zaradi rahlega značaja mulja sadre, krilna sonda med preiskavo tonila. Izmerjene vrhunske vrednosti c_u (Slika 5.49, FVT max.) so primerljive izračunanim iz CPTu in DMT. Reziidualna c_u , izmerjena s terensko krilno sondo (Slika 5.49, FVT rez.) je enakega velikostnega reda, kot rezultati meritev v laboratoriju s krilno sondo in konusom. Rezultat je pričakovan, saj je bila rahla struktura mulja sadre že ob dostavi v laboratorij porušena, meritve pa smo izvajali na pregnetenih in deloma poškodovanih vzorcih.

5.11.7 Omejitve uporabljene merske opreme za izvedbo terenskih raziskav

Pri vrednotenju rezultatov terenskih meritev smo ugotovili, da iz merjenih vrednosti ne moremo ustrezno identificirati parametrov mulja v pripovršinskih plasteh.

Natančnost meritve tlaka z DMT je 5 kPa. Ker večina DMT zvez izhaja iz razlike med tlakoma P_1 in P_0 , je natančnost meritev odvisna od razlike teh dveh tlakov in ne od njune direktne meritve. K napaki meritve prispeva tudi napaka zaradi ocene efektivnih napetosti in prvotnih pornih tlakov. Na sliki 5.50 levo je prikazan rezultat meritve z DMT v mulju sadre z izbranim 5 krat povečanim območjem napake naprave (maksimalno 20% napaka). Vidimo, da je DMT sonda pričela »dobro« delovati šele na globini 5 m.

Pri meritvah CPT, s standardno konico, je napaka odvisna od natančnosti meritve odpora pod konico (q_c), odpora po plašču (f_s) in meritve pornega tlaka (u_2). Za sondo Icone CPTu (standardna sonda, 2. razred kakovosti meritev) je napaka meritve q_c 100 kPa, f_s 15 kPa in u_2 25 kPa, ne vemo pa, ali je to skupna napaka merske metode, ali samo napaka merskega senzorja. Območje »dobrega« delovanja naprave smo, podobno kot za DMT, iz vrednotili za 5 kratnik napake (Slika 5.50, desno). Vidimo lahko, da je pri CPT, za standardno konico, globina na kateri prične sonda »dobro« delovati, med 5 m in 10 m.



Slika 5.50: Območje delovanja DMT (levo) in CPTu (desno) in merjena vrednost v mulju sadre.

Figure 5.50: Precision of DMT (left) and CPTu (right) with values measured in red gypsum mud.

Da bi lahko ustrezno izmerili lastnosti rahlih, pripovršinskih plasti, bi morali pri DMT:

- izboljšati natančnost meritev tlaka P_1 in P_0 , vendar je natančnost odvisna tudi od natančnosti/ponovljivosti določitve popravkov membrane.
- povečati površino membrane. V tem primeru pa je vprašljivo delovanje vseh empiričnih zvez za vrednotenje preiskave.

Pri CPT bi lahko spremenili:

- natančnost meritev q_c , f_s in u_2 z uporabo drugačne merske opreme.
- površino konusa ali plašča. Površino konusa lahko dokaj enostavno povečamo z uporabo konice v obliki krogle ali z uporabo t.i. T-bar konice. Pri uporabi nestandardne konice je potrebno upoštevati tudi ustrezne prilagoditve za vrednotenje rezultatov preiskav.

Pri meritvah na refulu smo preverili rabo krogle pri CPT in s tem močno izboljšali zanesljivost podatkov.

5.12 Zaključki

Z analizo rezultatov laboratorijskih in terenskih raziskav, izvedenih v dveh vrstah mulja, smo pokazali na nezanesljivosti, ki se lahko pojavijo pri določanju indeksnih in mehanskih lastnosti mulja z uporabo metod, ki so bile razvite za delo v zemljinah. Glavne ugotovitve laboratorijskih in terenskih raziskav so:

- Odvzem intaktnih vzorcev sedimentov iz vodnih okolij je izjemno zahteven.
- Zaradi visoke vlage se struktura vzorcev muljev med transportom v laboratorij bolj ali manj poruši.
- Nedrenirana trdnost, določena v laboratoriju, je ne glede na tip odvzetega vzorca mulja v območju, ki ustreza rezidualni trdnosti, določeni na terenu.
- Krivulje zrnivosti mulja sadre so obremenjene z napako, ki izvira iz lomljivosti prisotnih igličastih zrn in predpostavke kroglastih zrn v preiskavi sedimentacije. Topnost mulja sadre v vodi smo izločili z uporabo zasičene vode iz ojezeritve.
- Sol v porni vodi nima bistvenega vpliva na indeksne lastnosti refula. Nasprotno je vpliv soli na indeksne lastnosti montmorillonitnih glin (npr. bentonita) velik. Rezultati se dobro ujemajo s podatki iz literature, ki navaja, da se vpliv soli odraža pri meji židkosti višji od 110%, določeni z uporabo čiste vode.
- Drenirane strižne karakteristike refula pričakovano ustrezajo morskim glinam, mulja sadre pa meljem. Hitrost striženja refula, določena iz krivulje konsolidacije, je izjemno nizka (0.001 mm/min). Povečanje hitrosti za dekada (na 0.01 mm/min) ne vpliva na izmerjen strižni kot in kohezijo, pri višjih hitrostih striga pa izmerjene strižne karakteristike močno upadejo.
- Stisljivost refula je primerljiva stisljivosti morskih glin iz območja Luke Koper. Razlike so v začetnem količniku por, ki je odvisen od lokacije in globine odvzema vzorca. Količnik por pri t.i. nični efektivni vertikalni napetosti, določen iz sedimentacije suspenzije refula v umerjenih valjih in iz obremenilnega dela krivulje konsolidacije je primerljiv. Merjenim vrednostim obremenilnega dela krivulje stisljivosti se najbolje prilega navadna potenčna funkcija, kar je skladno z navedbami v literaturi.
- Mulj sadre izkazuje izrazito lezenje, zato v edometru primarne faze konsolidacije nismo mogli identificirati. Lezenje je močno odvisno od vrste porne tekočine.
- Vodoprepustnost refula je enakega velikostnega reda ne glede na metodo določanja (meritev v edometru, ocena iz linije konsolidacije, izračun iz meritev sukcije v Hypropu). Razlike, ki smo jih v mulju sadre identificirali s preiskavo določanja zrnovostne sestave, se odražajo tudi v vodoprepustnosti. Rastrosi merjenih vrednosti so v mulju iz ojezeritve bistveno manjši kot v mulju pod suhim nasipom. V mulju iz ojezeritve se vodoprepustnosti, merjene v edometru lepo ujamejo s tistimi, določenimi iz meritev sukcije v Hypropu.

- Nedrenirana strižna trdnost refula, iz vrednotena iz presežnih pornih tlakov, merjenih s standardno CPTu konico in iz meritev s piezokroglo, je primerljiva. Vrednosti so pričakovano višje od izmerjenih v laboratoriju, kjer smo preiskovali pregnetene vzorce.
- Semiempirične korelacije za vrednotenje geomehanskih lastnosti iz meritev na terenu (CPTu in DMT) so razvite za zemljine. Mulj sadre je različen od zemljin. Ugotovili smo, da je potrebno empirične faktorje korigirati z upoštevanjem specifičnih lastnosti mulja sadre. S hitrimi terenskimi raziskavami, ki potekajo v nedreniranih pogojih, ne moremo ustrezno zajeti lezenja mulja sadre, ki smo ga identificirali v laboratoriju. To se odraža v modulih stisljivosti, ki so neprimerljivo višji, od iz vrednotenih iz edometriških preiskav.

Z laboratorijskimi in terenskimi raziskavami smo identificirali parametre, ki pomembno vplivajo na vrednotenje rezultatov meritev, izvajanih po standardnih postopkih za zemljine. Ugotovili smo, da je treba pri raziskovanju muljev, posebno pozornost nameniti kemični sestavi porne vode in s tem povezani osmotski sukciji, saj le ta močno vpliva na potek sušenja in krčenja in druge lastnosti, npr. potek konsolidacije.

Pri izvajanju in vrednotenju terenskih preiskav je treba paziti zlasti pri vrednotenju deformabilnosti muljev, ki so podvrženi lezenju ter muljev, katerih gostota zrn se zelo razlikuje od standardne gostote zemljin $2.65\text{-}2.75\text{ t/m}^3$.

Za preiskovanje muljev v akumulacijskih bazenih je potrebno uporabljati opremo (CPT, DMT) z natančno opredeljeno natančnostjo meritev. Konuse in DMT sonde bi morali za identifikacijo lastnosti najbolj rahlih plasti muljev prilagoditi na način povečanja površine merilne sonde.

6 REOLOŠKE LASTNOSTI

6.1 Uvod

S terminom reološke lastnosti običajno opisujemo:

- lezenje (angl. *creep*), ki opisuje počasno premikanje mase pod stalno obremenitvijo, zaradi različnih vplivov (vertikalna obremenitev, horizontalna obremenitev,...)
- napetost na meji tečenja (angl. *yield stress*), τ_y in viskoznost (angl. *viscosity*), η .

V tem poglavju bomo obravnavali rezultate eksperimentov, s katerimi smo raziskovali oba fenomena in sicer: nestandardno preiskavo strižnega lezenja, izvedeno v cikličnem strižnem aparatu (poglavje 6.2) in napetost na meji tečenja in viskoznost, izrednoteno iz meritev v dveh koaksialnih valjastih reometrih (poglavje 6.3). Podane so zveze, ki smo jih uporabili za vrednotenje rezultatov in pojasnjeni fenomeni, ki smo jih identificirali med preiskavami. Širše teoretično ozadje je podano v poglavju 2.8.

6.2 Strižno lezenje mulja sadre

V mulju sadre, ki izkazuje izrazito konsolidacijsko lezenje, lahko zaradi različnih vplivov, ki predstavljajo strižno obremenitev (npr. narivanje in gradnja suhega nasipa), pride tudi do strižnega lezenja, ki poteka v območju napetosti, manjših od napetosti na meji tečenja (t.j. počasno lezenje v stanju neporušene ali delno preoblikovane strukture). Sekundarne konsolidacije oz. konsolidacijskega lezenja v edometru ne moremo primerjati z lezenjem strižno obremenjenih vzorcev, zato ju obravnavamo ločeno.

Strižno lezenje mulja sadre smo raziskali s preiskavami v cikličnem enostavnem strižnem aparatu. Preizkušance smo po končani konsolidaciji pri različnih efektivnih vertikalnih napetostih (50 in 100 kPa) hipno strižno obremenili s horizontalno napetostjo (τ), ki je predstavljala 60% oz. 30% efektivne vertikalne napetosti (σ_v') na preizkušancu. Med preiskavo lezenja, ki je podobna direktni strižni preiskavi, smo namesto konstantnega prirasta deformacij, vzorcu vsilili konstantno horizontalno silo in spremljali časovni razvoj deformacij.

Identifikacijski parametri vzorcev pred in po preiskavi in vplivi na vzorec med preiskavo so podani v Preglednici 6.1. Strižno napetost, ki smo jo približno v 12-15 sekundah nanegli na vzorec, smo podali v obliki razmerja z efektivno vertikalno napetostjo (τ/σ_v'), ki je po koncu konsolidacije že bila na vzorcu. Tak način podajanja smo izbrali, ker gre za razmerje dejanskih merjenih količin.

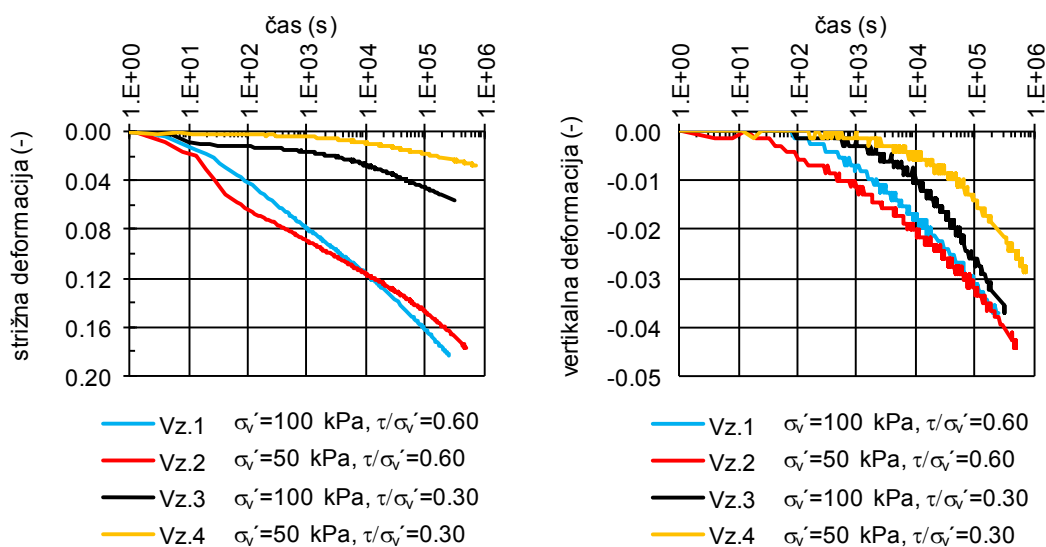
Iz povprečja strižnih karakteristik mulja sadre, izmerjenih v direktnem strižnem aparatu (drenirano stanje), smo ocenili maksimalno strižno napetost, ki bi jo preizkušanec še lahko prenesel (τ_{max}). Izkoriščenost strižne napetosti med strižnim obremenjevanjem v cikličnem enostavnem strižnem aparatu podajamo v Preglednici 6.1 kot razmerje med strižno napetostjo na preizkušancu in maksimalno možno strižno trdnostjo (τ/τ_{max}).

Preglednica 6.1: Vlaga vzorcev mulja sadre pred in po preiskavi in pogoji med preiskavo strižnega lezenja.

Table 6.1: Water content of red gypsum mud specimens before and after the investigation and conditions during the test of shear creep.

Preizkušavec	vlaga ob vgradnji	vlaga po preiskavi	efektivna vertikalna napetost	razmerje horizontalna napetost / efektivna vertikalna napetost	maksimalna strižna trdnost ob upoštevanju $c'=24$ kPa, $\varphi'=31^\circ$ (Slika 5.26, desno)	razmerje τ/τ_{max} ob upoštevanju $c'=24$ kPa, $\varphi'=31^\circ$ (Slika 5.26, desno)
	w_i (%)	w_f (%)	σ_v' (kPa)	τ/σ_v'	τ_{max} (kPa)	τ/τ_{max}
Vz.1	87.0	49.5	100	0.60	84	0.71
Vz.2	103	53.3	50	0.60	54	0.56
Vz.3	106	52.0	100	0.30	84	0.36
Vz.4	101	52.9	50	0.30	54	0.28

Na Sliki 6.1 (levo) je prikazan časovni prirast strižne deformacije preizkušancev mulja sadre, na Sliki 6.1 (desno) pa osna deformacija (stiskanje) vzorca med preiskavo strižnega lezenja. Vrednotenje smo izvedli po klasičnih metodah za tovrstne preiskave. Strižno deformacijo obravnavamo kot razmerje horizontalnega pomika in višine vzorca. Pri vrednotenju preiskave smo zanemarili deformacijo prereza preizkušancev, ki se je kljub žični membrani zgodila, zaradi rahle narave mulja sadre.



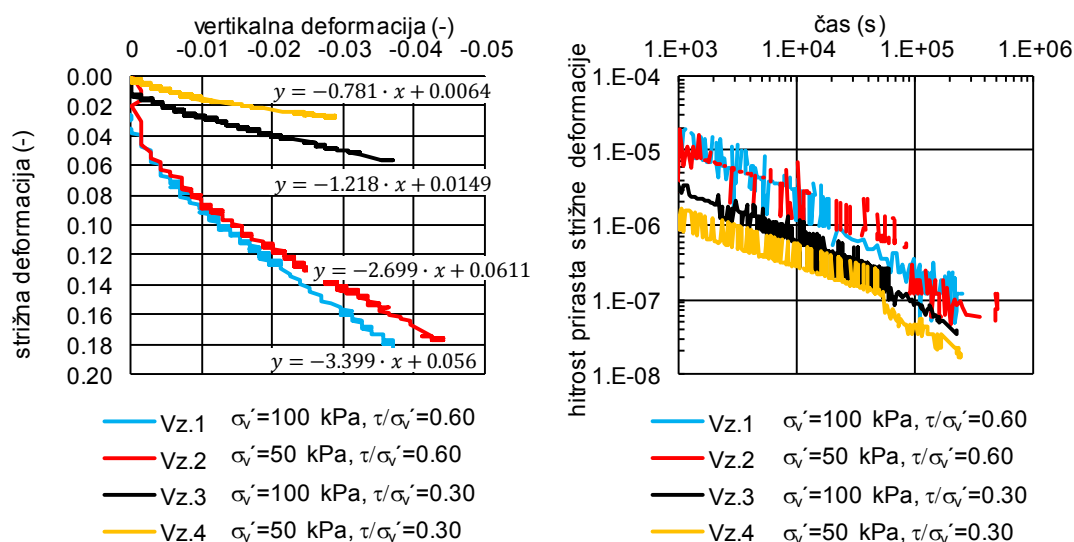
Slika 6.1: Časovni prirast strižne deformacije preizkušancev mulja sadre (levo) in osne (vertikalne) deformacije (desno).

Figure 6.1: Time dependent increase of shear strain (left) and vertical strain (right) of red gypsum mud specimens.

S slike Sliki 6.1 (levo) vidimo, da na velikost strižne deformacije vpliva predvsem velikost vsiljene strižne napetosti. Strižno manj obremenjeni preizkušanci mulja sadre so pričakovano izkazovali nižje strižne deformacije. Končna vertikalna deformacija v času strižne obremenitve (Slika 6.1, desno) je za vse preizkušance primerljiva, ne glede na razmerje τ/σ_v' .

Zveze, ki najbolj opišejo merjene vrednosti strižnih in osnih deformacij v linearnem območju so, skupaj z merjenimi vrednostmi, podane na Sliki 6.2 (levo). Vidimo, da je v primerjavi z osno deformacijo med strigom, strižna deformacija v večini primerov večja.

Hitrost prirasta strižne deformacije je prikazana na Sliki 6.2, desno. Pričakovano je naraščanje strižne deformacije počasnejše na preizkušancih, pri katerih je bilo razmerje τ/σ_v' manjše. Pari preizkušancev z enakim razmerjem τ/σ_v' imajo isti velikostni red hitrosti prirasta strižnih deformacij.



Slika 6.2: Soodvisnost strižne in osne (vertikalne) deformacije preizkušancev mulja sadre (levo) in hitrost prirasta strižne deformacije (desno).

Figure 6.2: Red gypsum mud specimens; shear strain versus vertical strain during shearing (left) and time increase of shear strain rate (right).

6.3 Meritve v koaksialnih valjastih reometrih, τ_y in η_p

Določanje reoloških lastnosti zemljin v geomehanskih laboratorijih z reometri je šele v povojih, čeprav je, nasprotno, vse več numeričnih modelov, ki za računanje plazov - tokov potrebujejo vhodne podatke, ki jih je moč določiti samo z reometri.

V tej nalogi smo raziskali uporabnost, zanesljivost in ponovljivost rezultatov, merjenih z dvema različnima koaksialnima valjastima reometroma (DV3T HB in ConTec Viscometer 5).

Reometer DV3T HB (Brookfield) je bil na UL FGG vpeljan v letu 2012 izključno za namene raziskovanja reoloških lastnosti zelo mehkih zemljin iz blatnih tokov in sedimentov iz vodnih okolij. Omogoča merjenje tokovnih krivulj in neposredno določanje napetosti na meji tečenja s krilno sondo. Zaradi razločevanja med vrednostmi napetosti na meji tečenja, določenimi iz tokovnih krivulj (Binghamov model) in iz meritev s krilno sondo, bomo v tem razdelku z enotnim geotehničnim izrazom nedrenirana strižna trdnost pregnetenih vzorcev (c_{ur}) označevali vrednosti določene iz meritev s krilno sondo in s τ_y , vrednosti, določene iz tokovnih krivulj. Dobavitelj je pred predajo naprave v uporabo, izvedel umeritev s standardnim silikonskim oljem.

ConTec Viscometer 5 je v prvi vrsti namenjen raziskavam reoloških lastnosti malt in betonov. V sklopu te naloge smo ga prvič uporabili tudi za meritve reoloških lastnosti sedimentov iz vodnih okolij. Umeritev naprave se periodično izvaja s standardnim silikonskim oljem.

Zvez in izpeljav, ki smo jih uporabili za vrednotenje rezultatov raziskav v tem poglavju, nismo navajali v splošnem pregledu literature, saj so veljavne izključno za koaksialne valjaste reometre (6.3.1 in 6.3.2).

6.3.1 Newtonska tekočina – vrednotenje reoloških parametrov

Najprej smo preiskave opravili na medu, ki je idealna Newtonska tekočina. Strižno hitrost ($\dot{\gamma}$) in strižno napetost (τ) smo iz merjenih vrednosti izračunali po enačbah (6.1) in (6.2) (Brookfield Engineering Labs., Inc., 2014).

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{2 \cdot R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) \cdot \omega_0 \quad (6.1)$$

$$\tau = \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot h} \quad (6.2)$$

kjer je ω_0 kotna hitrost, izračunana kot $(2 \cdot \pi / 60) \cdot N$, N – število obratov na minuto (RPM); R_o – zunanji radij (cilindra), R_i – notranji radij (vretena oz. krilne sonde), T – merjeni navor, h – efektivna dolžina vretena oz. krilne sonde (Brookfield Engineering Labs., Inc., 2014).

Navidezno viskoznost (angl. *apparent viscosity*) oz. viskoznost Newtonske tekočine (angl. *Newtonian viscosity of the fluid*) (η), smo izračunali iz naklona premice $\tau - \dot{\gamma}$ (Slika 6.3) oz. po (6.3).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6.3)$$



Slika 6.3: Reološko obnašanje Newtonskih tekočin.

Figure 6.3: Rheological behavior of Newtonian fluid.

6.3.2 Ne-Newtonska tekočina – vrednotenje reoloških parametrov

Rahli (mehki) sedimenti in suspenzije imajo lastnosti Ne-Newtonskih tekočin, ki so odvisne od hitrosti strižne deformacije in časa. Za prikaz tokovnih krivulj se, podobno kot pri Newtonskih tekočinah (6.3.1), uporablja soodvisnost strižne napetosti (τ) in strižne hitrosti ($\dot{\gamma}$).

Reološke lastnosti bentonita, refula in mulja sadre bomo opisali z Binghamovim modelom (enačba 6.4 in Slika 6.4, levo), ki se najpogosteje uporablja za psevdoplastične materiale (Jeong, 2006, 2013; Jeong et al., 2010). Strižno napetost (τ) sestavljata dve komponenti: Binghamova strižna napetost na meji tečenja (τ_y) in prirast strižne napetosti zaradi strižne hitrosti ($\dot{\gamma}$) in Binghamove plastične viskoznosti (η_p).

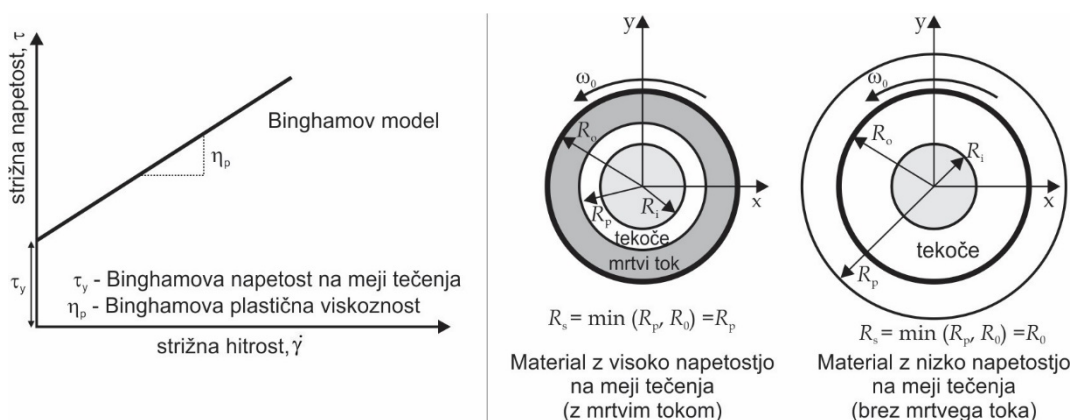
$$\tau = \tau_y + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (6.4)$$

V koaksialnih valjastih reometrih lahko pride med preiskavami materialov z visoko napetostjo na meji tečenja do pojava t.i. mrtvega toka (angl. *plug flow*). To pomeni, da celotna masa materiala med zunanjim in notranjim cilindrom ne teče (ni strižena). Mejo med materialom, ki teče in tistim, ki ne teče, lahko določimo kot t.i. prehodni radij (R_p) (angl. *plug radius*) (Slika 6.4, desno).

Prehodni radij izračunamo iz pogoja strižne napetosti. Formira se, ko je strižna trdnost enaka napetosti na meji tečenja in ga lahko izračunamo iz enačbe (6.5).

$$R_p = \sqrt{\frac{T}{\tau_y \cdot 2 \cdot \pi \cdot h}} \quad (6.5)$$

kjer je T merjeni navor in h efektivna dolžina vretena oz. višina notranjega cilindra, do katere je potopljen v preizkušaneec.



Slika 6.4: Binghamov model (levo) in pogled na koaksialni cilindar s preizkušancem (desno) (Feys et al., 2013).

Figure 6.4: Bingham rheological model (left) and top view on the coaxial cylinder with specimen (right) (Feys et al., 2013).

Osnovno enačbo Binghamovega modela (6.4) moramo, če želimo v vrednotenju reoloških parametrov upoštevati mrtvi tok, nekoliko preoblikovati (Feys et al., 2013). Namesto strižne napetosti in strižne hitrosti, lahko vpeljemo osnovna izraza za izračun teh dveh količin (6.6) in (6.7) (Malvern, 1969; Malkin et al., 2006).

$$\tau = \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (6.6)$$

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega(r)}{dr} \quad (6.7)$$

kjer je r radialna koordinata, $\omega(r)$ razporeditev kotne hitrosti po striženem radiju. Na mejah R_i in R_s (Slika 6.4, desno) je $\omega(r)$ enaka nič oz. ω_0 (Feys et al., 2013).

Iz enačbe (6.7) vidimo, da je strižna hitrost ($\dot{\gamma}$) močno odvisna od radija (R_s) (Slika 6.4, desno).

Binghamov model lahko po vpeljavi (6.6) in (6.7) zapišemo kot (6.8):

$$\frac{T}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h} = \tau_y + \eta_p \cdot \frac{d\omega(r) \cdot r}{dr} \quad (6.8)$$

Z matematičnimi transformacijami izpeljemo izraz (6.9) in ga integriramo (6.10).

$$\left(\frac{T}{2\pi r^3 h} - \frac{\tau_y}{r} \right) dr = \eta_p d\omega \quad (6.9)$$

$$\int_{R_i}^{R_s} \left(\frac{T}{2\pi r^3 h} - \frac{\tau_y}{r} \right) dr = \int_0^{\omega_0} \eta_p d\omega \quad (6.10)$$

Rezultat integracije je enačba (6.11).

$$\frac{T}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2} \right) - \tau_y \ln \left(\frac{R_s}{R_i} \right) = \eta_p \omega_0 \quad (6.11)$$

Iz zveze (6.11) izrazimo navor (T), kotno hitrost (ω_0) pa nadomestimo s hitrostjo vrtenja ($N = \omega_0/2\pi$, N v obratih/sekundo). V zvezi (6.12) imamo dve neznanki; τ_y in η_p , ki ju določimo po metodi najmanjših kvadratov.

$$T = \frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \ln \left(\frac{R_s}{R_i} \right)}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2} \right)} \cdot \tau_y + \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot h}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2} \right)} \cdot \eta_p \cdot N \quad (6.12)$$

Za grafični prikaz soodvisnosti $\tau - \dot{\gamma}$, moramo izračunati $\dot{\gamma}$. Izrazimo jo kot (6.13), pri čemer v izračunu upoštevamo iz enačbe (6.12) določen η_p .

$$\dot{\gamma} = \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot h \cdot \eta_p} - \frac{\frac{T}{4 \cdot \pi \cdot h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_s^2} \right)}{\eta_p \cdot \ln \left(\frac{R_s}{R_i} \right)} + \frac{2\pi N}{\ln \left(\frac{R_s}{R_i} \right)} \quad (6.13)$$

6.3.3 τ_y in η_p medu in bentonita

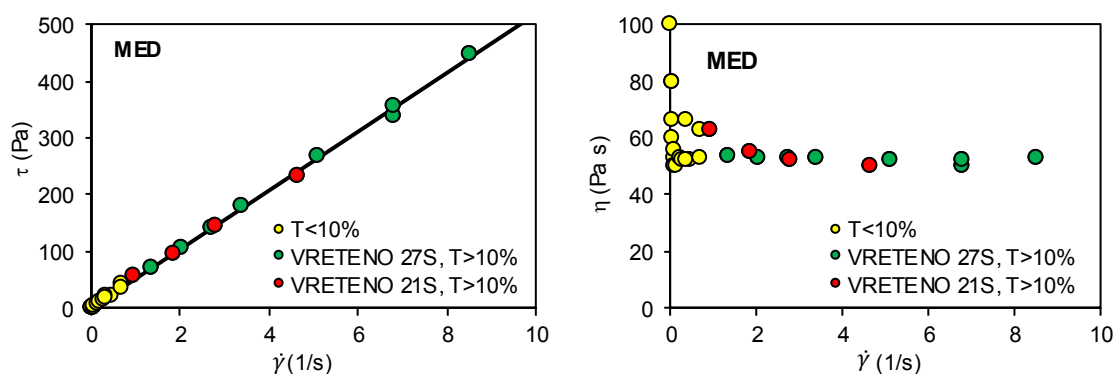
Referenčne raziskave na izbranih reometrih smo izvedli na »standardnih« materialih: medu in bentonitu. Meritve na medu smo zaradi velikosti vzorca izvajali samo z reometrom DV3T HB.

Med

Med je Newtonska tekočina, zato je $\tau_y = 0$. Reološke parametre smo iz vrednotili po enačbah, podanih v poglavju 6.3.1. Rezultat meritev podajamo kot soodvisnost $\tau - \dot{\gamma}$ (Slika 6.5, levo). Za vsak par τ , $\dot{\gamma}$

smo izračunali viskoznost. S Slike 6.5, desno (rumeni simboli) vidimo, da je v območju merjene izkoriščenosti vretena $< 10\%$, raztros izračunanih viskoznosti η velik. Pri višjih strižnih hitrostih, kjer je izkoriščenost vretena večja, se vrednosti η ustalijo na približno 50 Pa s. Na Sliki 6.5 smo z rumenimi simboli zato posebej označili meritve, kjer je izkoriščenost vretena nižja od 10%, kar je vrednost, ki jo kot mejno za zanesljivo vrednotenje reoloških parametrov podaja proizvajalec naprave.

Ugotovili smo, da so rezultati meritev neodvisni od velikosti uporabljenega vretena. Ker pa je viskoznost medu odvisna od temperature, vsebnosti vode in drugih parametrov, ki jih nismo določali, natančne primerjave izvedenih parametrov s podatki v literaturi nismo izvedli. Generalno so bile izmerjene viskoznosti primerljive s tistimi, ki jih za različne vrste medu, pridobljenega na Poljskem, navajata Juszczak in Fortuna (2006).



Slika 6.5: Soodvisnosti $\tau - \dot{\gamma}$ (levo) in $\eta - \dot{\gamma}$ (desno) za med.

Figure 6.5: $\tau - \dot{\gamma}$ diagram (left) and $\eta - \dot{\gamma}$ diagram (right) for honey.

Bentonit

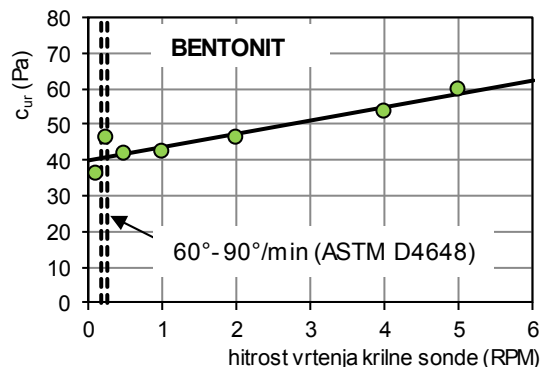
Bentonitno suspenzijo smo pripravili v razmerju 60 kg suhega bentonita / m³ vode. Izmerjena vlaga suspenzije je bila 1667%, indeks tečenja (angl. *liquidity index*), ki ga izvednotimo po (6.14), $I_L=3.68$ in volumska koncentracija približno 2.17%.

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (6.14)$$

Nedrenirano strižno trdnost pregnetenega vzorca (c_{ur}), ki je v neobčutljivih materialih enakovredna napetosti na meji tečenja (τ_y), smo ločeno izmerili s krilno sondo. V nadaljevanju bomo uporabljali simbol c_{ur} , ki je v geotehnikih v splošni rabi. Preverili smo vpliv hitrosti na izmerjeno vrednost. Iz rezultatov meritev, prikazanih na Sliki 6.6, vidimo, da z večanjem hitrosti vrtenja krilne sonde nedrenirana strižna trdnost narašča. S črtkanima vertikalnima črtama smo na Sliki 6.6 označili območje hitrosti, ki jih za meritve nedrenirane strižne trdnosti navaja ASTM D4648 (ASTM, 2016).

Za merjenje tokovnih krivulj bentonita v reometru DV3T HB in ConTec 5 Viscometru smo uporabili več različnih kombinacij vreten in cilindrov (Preglednica 6.2). Za vsako izbrano kombinacijo smo izračunali razdaljo med zunanjim cilindrom in vretenom (angl. *gap*). Radija, ki ju podajamo v Preglednici 6.2, sta ustrezna za vrednotenje reoloških parametrov samo v primeru, da med preiskavo v vzorcu ni prišlo do mrtvega toka. Pri vrednotenju Binghamovih parametrov τ_y in η_p , ki ju kot rezultat,

primerjalno za vse izmerjene tokovne krivulje, podajamo v Preglednici 6.2 (osenčena stolpca), smo upoštevali radij $R_s = \min(R_p, R_o)$ (Slika 6.4, desno).



Slika 6.6: Odvisnost c_{ur} v bentonitni suspenziji, od hitrosti vrtenja krilne sonde.

Figure 6.6: c_{ur} versus vane rotational speed for bentonite suspension.

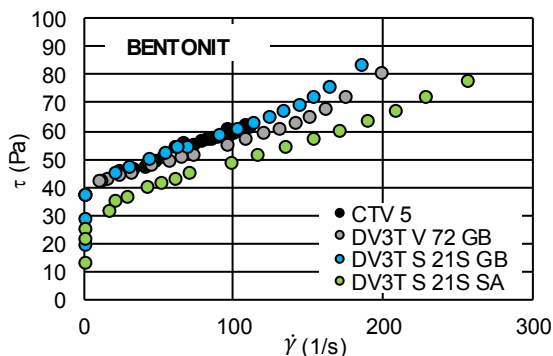
Preglednica 6.2: Kombinacije reometra, vretena in valja, uporabljene v raziskavi bentonitne suspenzije in rezultati preiskav (Binghamov model).

Table 6.2: Combinations of rheometers, spindles and chambers used in the investigations of rheological properties of bentonite suspension and tests results (Bingham model).

Reometer	krilna sonda ali vreteno / posoda	R_i	R_o	Gap ($R_o - R_i$)	τ_y	η_p
		(mm)	(mm)	(mm)	(Pa)	(mPa s)
CTV 5	standardni	100	145	45	40.2	198
DV3T HB	krilna sonda V72 / GB*	10.835	40	29.165	38.7	182
	vreteno SC4-21 / GB*	8.385	40	31.615	39.7	212
	vreteno SC4-21 / SA**	8.385	9.525	1.14	30.6	178

*GB – steklena čaša, **SA – mali cilindar (angl. *small sample adapter*), R_i – radij vretena oz. notranji radij, R_o – zunanji radij oz. radij čaše ali cilindra.

Na Sliki 6.7 so prikazane tokovne krivulje, v obliki soodvisnosti strižne napetosti in strižne hitrosti, ki smo jo z upoštevanjem η_p izračunali po (6.13). Iz Preglednice 6.2 in Slike 6.7 vidimo, da so Binghamovi reološki parametri, izvrednoteni z upoštevanjem mrtvega toka, primerljivi, ne glede na reometer in izbrano kombinacijo vretena in valja.



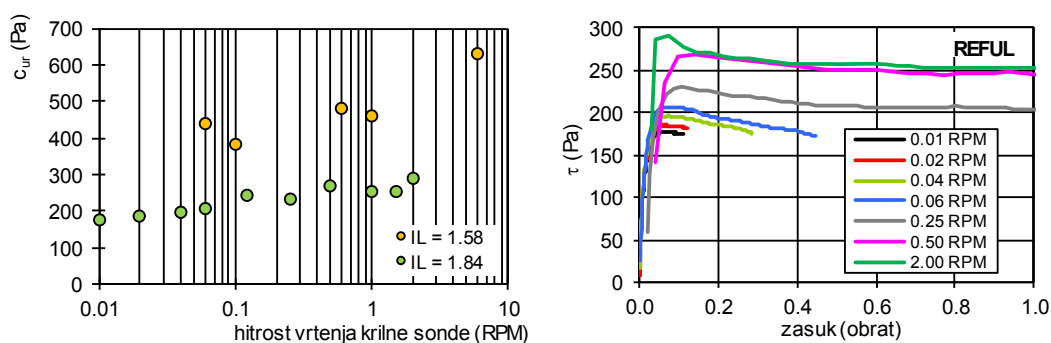
Slika 6.7: Tokovne krivulje bentonitne suspenzije, izmerjene z dvema različnima koaksialnima valjastima reometroma.

Figure 6.7: Flow curves of bentonite suspension, determined with two different coaxial cylinder rheometers.

6.3.4 Reološki parametri refula

Nedrenirana strižna trdnost pregnetenega refula

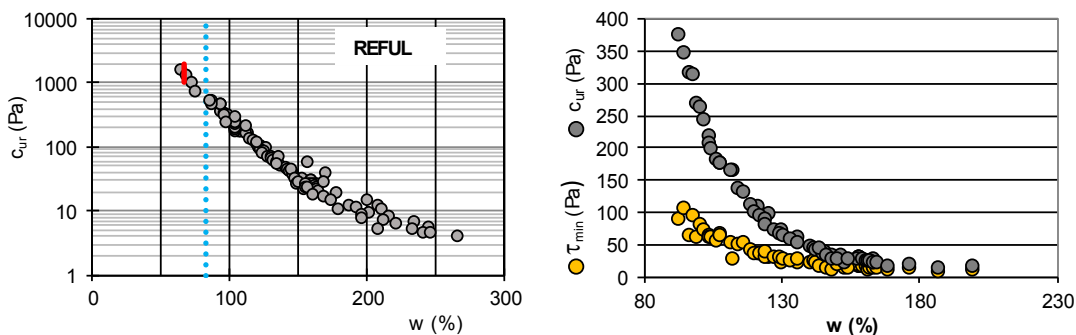
Raziskave reoloških lastnosti refula smo zasnovali podobno kot raziskave bentonita, le da je bil obseg raziskav večji. Pred izvedbo preiskav smo vsem vzorcem odprali sol. Pri dveh različnih vlagah smo na refulu najprej določili vpliv hitrosti vrtenja krilne sonde na c_{ur} (Slika 6.8). Vidimo, da c_{ur} z višanjem hitrosti vrtenja sonde narašča. Višji prirast izkazuje preizkušavec z nižjim indeksom tečenja (I_L) (Slika 6.8, levo). Potek krivulj strižne napetosti, iz katerih smo določili c_{ur} , je za različne hitrosti vrtenja krilne sonde, v odvisnosti od zasuka, prikazan na Sliki 6.8, desno.



Slika 6.8: Odvisnost c_{ur} od hitrosti vrtenja krilne sonde (levo) in prirast strižne napetosti v odvisnosti od zasuka, za različne hitrosti vrtenja sonde (desno).

Figure 6.8: c_{ur} versus vane rotational speed (left) and increase of shear stress in relation with the revolution of spindle and its rotational speed (right).

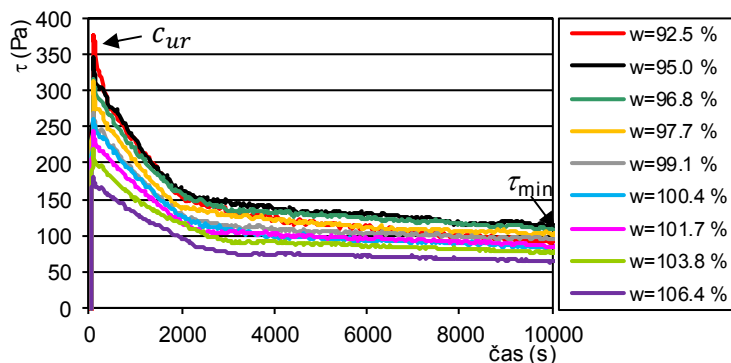
Nedrenirano strižno trdnost pregnetenega refula oz. napetost na meji tečenja smo merili s krilno sondo, pri hitrosti vrtenja 0.25 obr/min in na različno vlažnih pregnetenih preizkušancih (Slika 6.9). Naravno vlažni reful (Slika 6.9 levo, modra vertikalna črta) smo počasi sušili na zraku oz. vlažili. Pri vlagi, ki ustreza meji židkosti, je nedrenirana strižna trdnost med 1000 in 2000 Pa (Slika 6.9 levo, rdeča črtica) in je primerljiva z rezultati raziskav drugih avtorjev (Sharma in Bora, 2003, in drugi).



Slika 6.9: Odvisnost c_{ur} v refulu od vlage (levo) in soodvisnost c_{ur} in τ_{min} različno vlažnega refula (desno).

Figure 6.9: c_{ur} versus water content (left) and c_{ur} and τ_{min} , determined on dredged marine sediment at different water content (right).

Občutljivost zemljin (angl. *sensitivity*) je opredeljena kot razmerje med strižno trdnostjo intaktnega in pregnetenega preizkušanca. Časovni upad strižne napetosti (trdnosti) smo zabeležili tudi med preiskavami pregnetenih preizkušancev, ki smo jim izmerili c_{ur} in minimalno strižno napetost τ_{min} (Slika 6.10). Po ca. 3 urah se je vrednost τ_{min} ustalila pri vrednosti, ki je odvisna od vlage preizkušanca (Slika 6.9 desno in Slika 6.10). Pri manj vlažnih preizkušancih je razmerje c_{ur} / τ_{min} med 3 in 4, z višanjem vlage pa upade na 1. Po Abuhajar et al. (2010) sodi reful med malo do srednje občutljive gline.



Slika 6.10: Časovni upad τ različno vlažnih pregnetenih preizkušancev refula.

Figure 6.10: Decrease of τ of remolded dredged marine sediments at different water contents.

Tokovne krivulje in Binghamovi reološki parametri

Kombinacije reometrov, vreten in cilindrov, uporabljene v raziskavi reoloških lastnosti refula, so prikazane v Preglednici 6.3, fizikalne lastnosti preizkušancev, ki smo jim izmerili tokovne krivulje, pa v Preglednici 6.4.

Preglednica 6.3: Kombinacije reometra, vretena in valja, uporabljene v raziskavi refula.

Table 6.3: Combinations of rheometers, spindles and chambers, used in the investigation of rheological properties of dredged marine sediment.

Reometer	krilna sonda ali vreteno / cilinder	Ri (mm)	Ro (mm)	Gap (mm)
CTV5	standardni	100	145	45
DV3T HB	krilna sonda V71 / GB*	17.195	40	22.805
	krilna sonda V72 / GB*	10.835	40	29.165
	krilna sonda V73 / GB*	6.335	40	33.665
	vreteno SC4-21 / GB*	8.385	40	31.615
	vreteno SC4-27 / GB*	5.88	40	34.12
	vreteno SC4-21 / SA**	8.385	9.525	1.14
vreteno SC4-27 / SA**	5.88	9.525	3.645	

*GB – steklena čaša, **SA – mali cilinder (angl. *small sample adapter*), Ri – radij vretena oz. notranji radij, Ro – zunanji radij oz. radij čaše ali cilindra. Gap, podan v Preglednici je ustrezen za vrednotenje samo v primeru, če ni mrtvega toka.

Preglednica 6.4: Lastnosti preizkušancev refula, ki smo jim izmerili reološke parametre.

Table 6.4: Properties of dredged marine sediment specimens for rheological investigations.

Preizkušanec	vlaga, w (%)	indeks tečenja, I_L	volumska koncentracija, C_v (%)
S1	79.5	1.34	32.2
S2	92.3	1.62	29.0
S3	103	1.86	26.7

S4	113	2.06	25.1
S5	130	2.44	22.4
S6	142	2.70	21.0

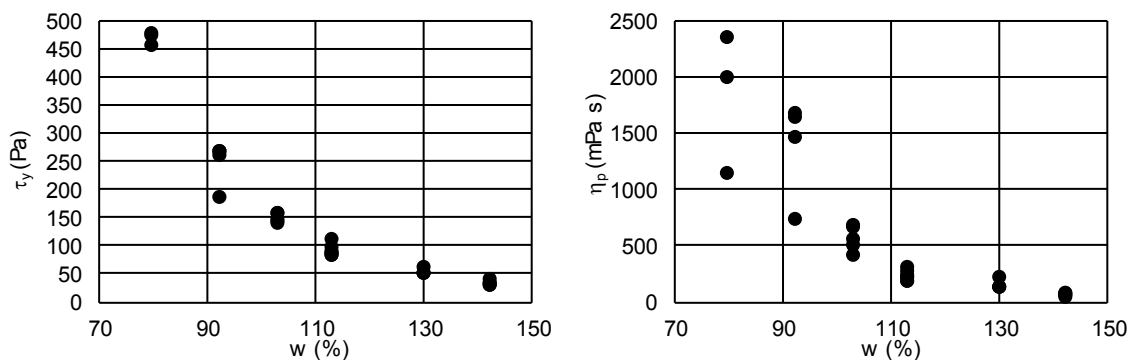
Iz izmerjenih podatkov smo po enačbi 6.12 izračunali Binghamova parametra τ_y in η_p . Iz zveze 6.13 smo ob upoštevanju η_p izvednotili $\dot{\gamma}$, ki se uporablja za grafični prikaz tokovnih krivulj (soodvisnost $\tau - \dot{\gamma}$). Binghamovi reološki parametri preizkušancev refula za vse kombinacije reometrov, vreten in cilindrov so prikazani v Preglednici 6.4 in v odvisnosti od vlage preizkušanca na Sliki 6.11. Tokovne krivulje, določene iz meritev z obema reometroma, z različnimi merskimi sondami, so ločeno za posamezne preizkušance prikazane na Sliki 6.12. Na Sliki 6.13 so zbrane vse tokovne krivulje, določene iz meritev na isti napravi, na različno vlažnih preizkušancih.

V preizkušancu S1, ki ima najnižjo vlago, se je med preiskavo z reometrom DV3T HB, z vretenom, formirala stabilna luknja (Slika 6.14). Tok refula ni sledil vsiljenim deformacijam, zato tokovne krivulje in reoloških parametrov iz meritev z gladkim vretenom nismo uspeli izvednotiti. τ_y , izvednoten iz meritev tokovnih krivulj na vzorcu S1 z reometrom CTV5 in z DV3T HB (s krilno sondo), je primerljiv, η_p , pa je približno za faktor 2 večji pri meritvah z reometrom DV3T HB. Podobno razliko v η_p smo, v odvisnosti od uporabljenega reometra, zabeležili na vzorcu S2. Generalno gledano pa analiza rezultatov, prikazanih v Preglednici 6.5 in na Sliki 6.12 kaže, da tip reometra in izbira vreten in cilindrov, ne vplivajo na rezultat preiskave.

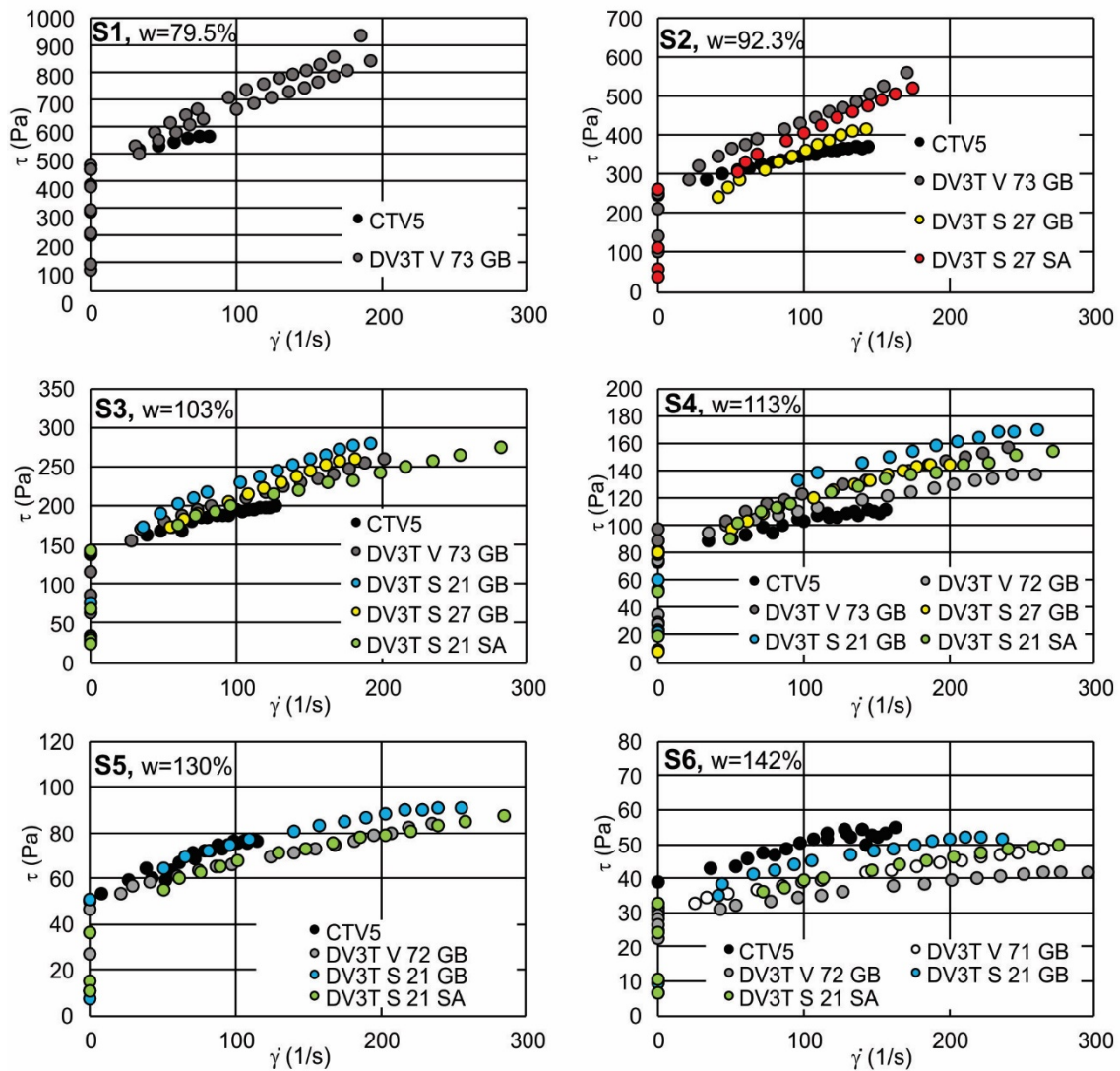
Preglednica 6.5: Reološki parametri refula, τ_y (Pa), η_p (mPa·s) (Binghamov model).

Table 6.5: Rheological parameters of dredged marine sediment, τ_y (Pa), η_p (mPa·s) (Bingham model).

Preizkušavec	S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p
vlaga, w (%)	79.5		92.3		103		113		130		142	
Parameter	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p
CTV5	476	1151	270	731	143	504	83.4	186	51.9	231	40.6	86
DV3T V71 GB	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	32.2	63
DV3T V72 GB	/	/	/	/	/	/	86.6-91.3	188-219	52.0	137	29.7	45
DV3T V73 GB	456-474	1998-2350	269	1637	149	561	97.1	247	/	/	/	/
DV3T 21S GB	/	/	/	/	159	660	113	229	61.2	128	34.1	85
DV3T 27S GB	/	/	186	1686	140	679	84.9	320	/	/	/	/
DV3T 21S SA	/	/	/	/	158	422	86.3	272	52.3	129	33.1	62
DV3T 27S SA	/	/	260	1457	/	/	/	/	/	/	/	/

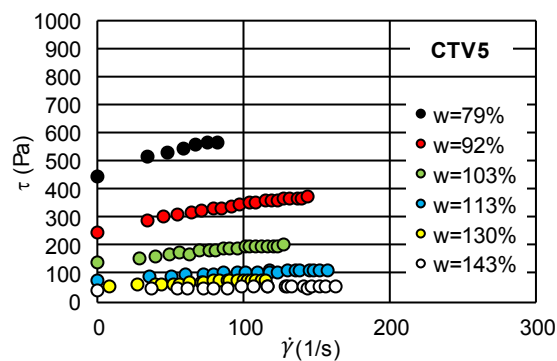


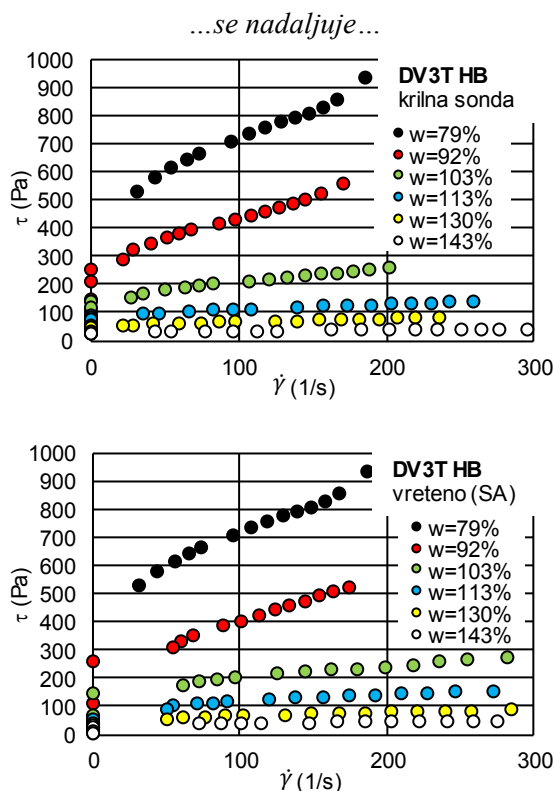
Slika 6.11: Binghamovi reološki parametri refula; τ_y (Pa), η_p (mPa·s) v odvisnosti od vlage preizkušanca.

Figure 6.11: Bingham rheological parameters of dredged marine sediment; τ_y (Pa), η_p (mPa·s), versus water content.

Slika 6.12: Tokovne krivulje različno vlažnega refula (S1 do S6), izmerjene z različnimi kombinacijami reometrov, vreten in valjev (Preglednica 6.3).

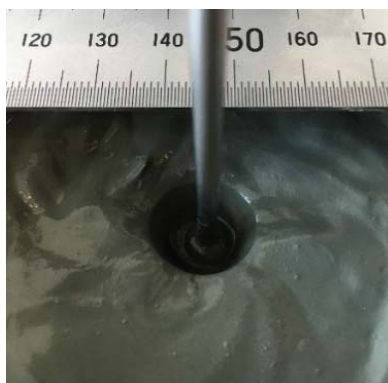
Figure 6.12: Flow curves of dredged marine sediment at different water content (S1 to S6), measured with different combinations of rheometers, spindles and chambers (Table 6.3).





Slika 6.13: Tokovne krivulje različno vlažnega refula (S1 do S6), izmerjene s CTV5 (zgoraj) in DV3T HB reometrom, z uporabo krilne sonde in gladkega vretena (v sredini in spodaj).

Figure 6.13: Flow curves of dredged marine sediment at different water content (S1 to S6), measured with CTV5 (upper) and DV3T HB rheometer, by using vane and smooth spindles (middle and bottom).



Slika 6.14: Stabilna luknja, ki se je formirala v preizkušancu S1 med preiskavo z vretenom.

Figure 6.14: Stable hollow formed in specimen S1, during the investigation with smooth spindle.

6.3.5 Primerjava reoloških parametrov refula s podatki iz literature

Reološke parametre refula smo primerjali s podatki iz literature (Locat in Demers, 1988; Phillips in Davies, 1991; Major in Pierson, 1992; Whipple in Dunne, 1992; Coussot in Piau, 1998; Parsons et al., 2001; Schatzmann et al., 2003; Ilstad et al., 2004; Jeong, 2006) in z vrednostmi, izračunanimi iz

empiričnih zvez (6.15 do 6.17) (Locat, 1997). Empirične zveze povezujejo τ_y in η_p z indeksom tečenja (I_L) (enačba 6.14).

$$\eta_p = \left(\frac{9.27}{I_L}\right)^{3.3} \quad (6.15)$$

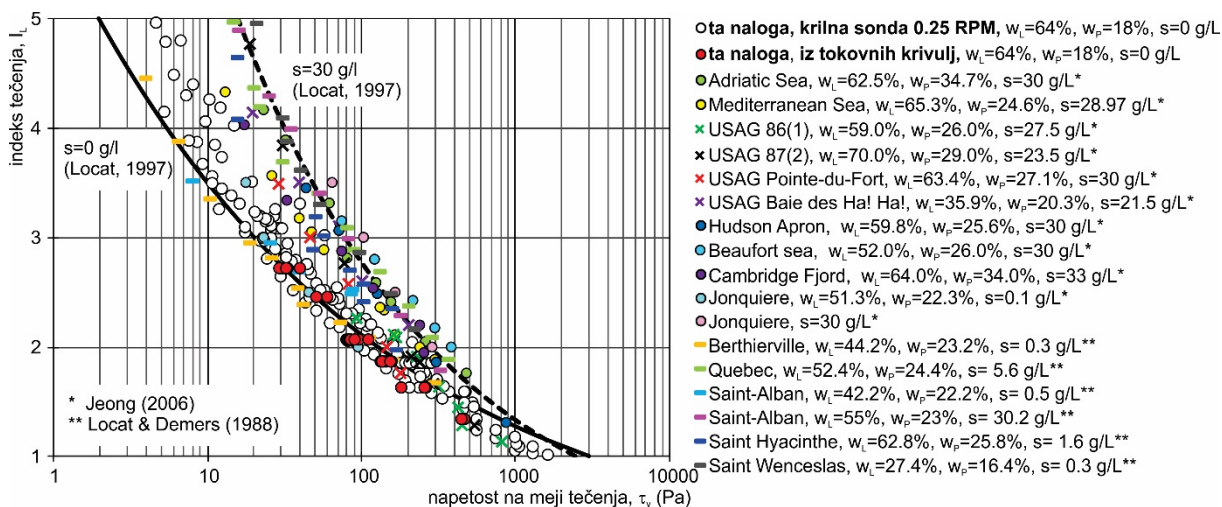
$$\tau_y = \left(\frac{5.81}{I_L}\right)^{4.55} \quad (6.16)$$

$$\tau_y = \left(\frac{12.05}{I_L}\right)^{3.13} \quad (6.17)$$

Zveza (6.15) velja za naravne mehke glinice z I_L med 1 in 6, zveza (6.16) je veljavna za zemljine z nizko vsebnostjo soli ($s=0$ g/L) in zveza (6.17) za zemljine z vsebnostjo soli približno 30 g/L.

Empirične zveze (6.15) do (6.17) so uporabne za preliminarno oceno reoloških parametrov (Gauer et al., 2005). Za natančno določitev τ_y in η_p materialov so potrebne reološke preiskave.

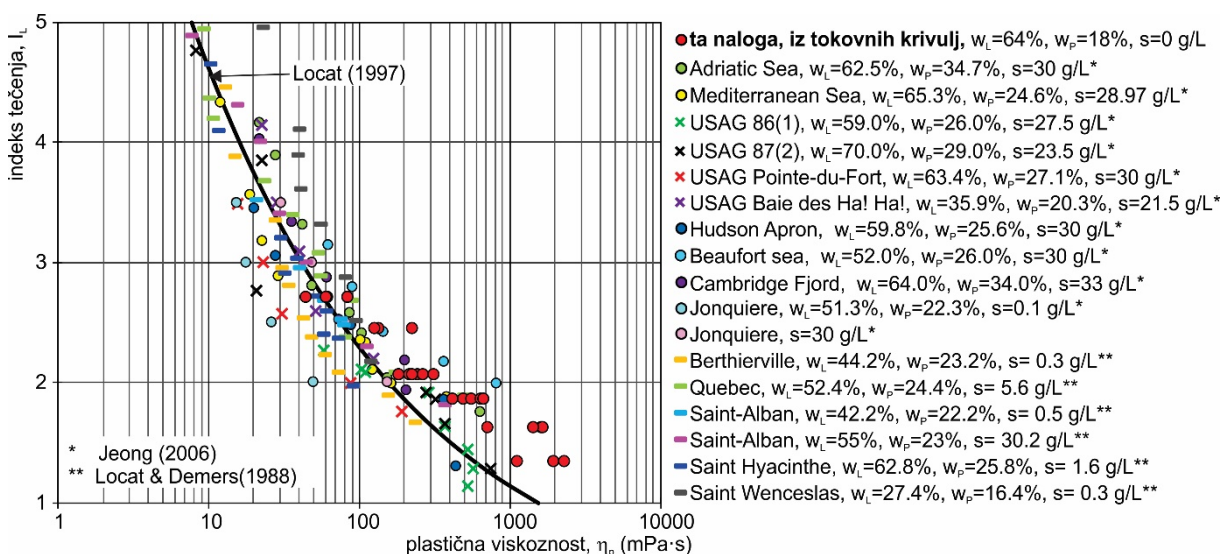
Na Sliki 6.15 je prikazana napetost na meji tečenja (τ_y), na Sliki 6.16 pa plastična viskoznost (η_p), v odvisnosti od I_L . Za materiale, katerih reološke parametre smo povzeli iz literature, so indeksni parametri w_L , w_p in podatek o slanosti, prikazani v legendi na slikah. Črne linije (polna in prekinjena) na Slikah 6.15 in 6.16 so soodvisnosti, izračunane iz empiričnih relacij (6.15) do (6.17).



Slika 6.15: Soodvisnost $I_L - \tau_y$. Vrednosti, določene na refulu in literaturni podatki.

Figure 6.15: $I_L - \tau_y$ relationship, determined on dredged marine sediment and literature data.

Iz primerjalne analize vidimo, da sta τ_y in η_p refula primerljiva s podatki iz literature za podobne zemljine. Rezultati τ_y sovpadajo z linijo, ki smo jo izvednotili iz zveze (6.16), za zemljine z nizko vsebnostjo soli. Nedrenirana strižna trdnost, določena na pregnetenem refulu (c_{ur}), in τ_y , izvednotene iz tokovnih krivulj, so enakega velikostnega reda (Slika 6.15, beli in rdeči krogi). Da sta c_{ur} in τ_y enakega velikostnega reda in je za neobčutljive zemljine njuna zveza na log-log diagramu, linearna sta ugotovila tudi Locat in Demers (1988). Na refulu izmerjena c_{ur} in τ_y sta neodvisna od merske opreme, vreten in metode merjenja.

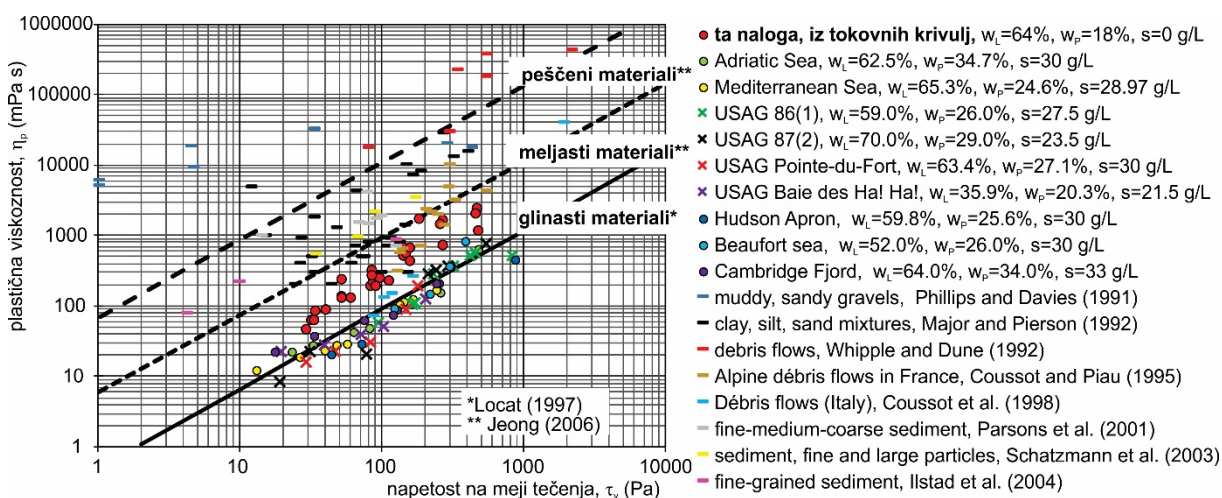


Slika 6.16: Soodvisnost $I_L - \eta_p$. Vrednosti, določene na refulu in literaturni podatki.

Figure 6.16: $I_L - \eta_p$ relationship, determined on dredged marine sediment and literature data.

Plastična viskoznost je pri nizkih I_L tudi do 4 krat višja od izračunane po enačbi (6.15). S Slike 6.16 vidimo, da so primerljivega velikostnega reda tudi raztrosi rezultatov, povzeti za različne zemljine iz literature. V primerjavi s τ_y , za η_p s Slike 6.16 iz literaturnih podatkov ne moremo razbrati vpliva slanosti porne tekočine na rezultat. Od tod tudi verjetno neupoštevanje vplivov porne vode v empirični relaciji (6.15), ki velja za vse glinene materiale, ne glede na vsebnost soli (Locat in Demers, 1988).

Na reološke parametre pomembno vpliva struktura materiala. V soodvisnost $\eta_p - \tau_y$, določeno na refulu in podatkih iz literature (Slika 6.17), smo zato umestili linije $\eta_p - \tau_y$ (črne vzporedne črte), ki po Locat (1997) in Jeong (2006) opisujejo reološke lastnosti glinenih, meljastih in peščenih materialov. Reološki parametri refula ležijo blizu linije, ki pripada glinenim materialom, kar sovпада z rezultati indeksnih preiskav in analiz zrnivosti.



Slika 6.17: Soodvisnost $\eta_p - \tau_y$. Vrednosti, določene na refulu in literaturni podatki. Črne linije so zveze $\eta_p - \tau_y$ za glinene, meljaste in peščene materiale.

Figure 6.17: $\eta_p - \tau_y$ relationship. Values determined on dredged marine sediment and literature data. Black lines show $\eta_p - \tau_y$ relationships for clay rich, silt rich and sand rich materials.

6.3.6 c_{ur} in τ_{min} mulja sadre – meritve s krilno sondo

Pri interpretaciji rezultatov meritev na mulju sadre bomo namesto indeksa tečenja (I_L), uporabljali vlago (w (%)), zato ker Atterbergove meje plastičnosti za sadro niso karakteristične.

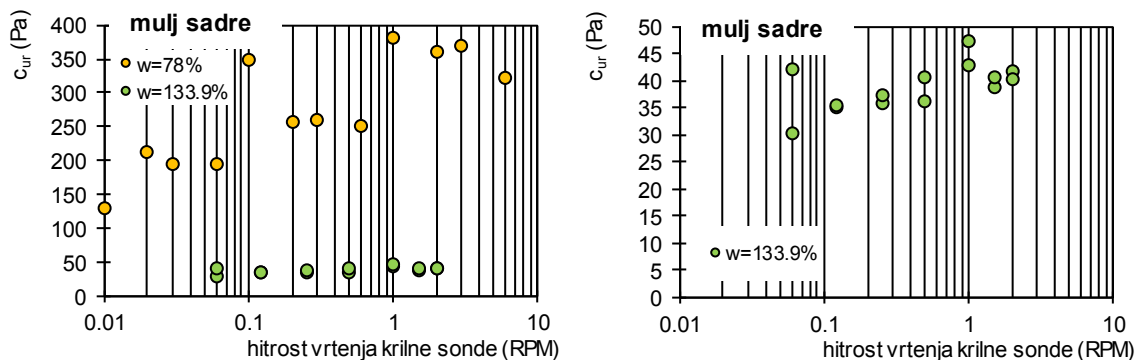
Pri določanju c_{ur} in τ_{min} mulja sadre smo preverili tri dejavnike, ki bi lahko vplivali na rezultat:

- hitrost vrtenja krilne sonde,
- spreminjanje vlage,
- čas mirovanja in konsolidacije zaradi lastne teže.

Prva dva dejavnika smo analizirali na svežih, pregnetenih (premešanih) preizkušancih, zadnjega pa na različno starih, negovanih preizkušancih.

Vpliv hitrosti vrtenja krilne sonde

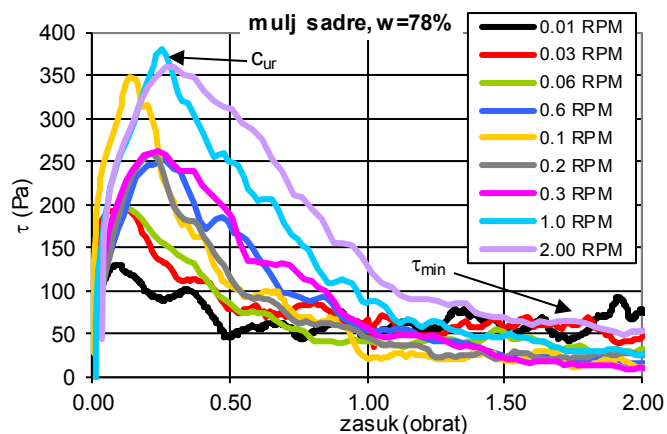
Vpliv hitrosti vrtenja krilne sonde na c_{ur} smo analizirali na dveh različno vlažnih preizkušancih (Slika 6.18). Raztrosi merjenih vrednosti so večji kot pri refulu, kljub temu se, v preizkušancu z nižjo vlago, kaže trend naraščanja c_{ur} z višanjem hitrosti. Pri vlagi 133.9% o prirastu trdnosti, kot posledici višanja hitrosti vrtenja krilne sonde, ne moremo govoriti. Zaradi velikega raztrosa rezultatov smo meritve na bolj vlažnem preizkušancu izvedli pri vsaki hitrosti v dveh ponovitvah. S Slike 6.18, desno vidimo, da je pri hitrosti vrtenja krilne sonde 0.06 obr/min, izmerjena vrednost 30 Pa in 42 Pa, kar je več kot pri hitrosti 2 obr/min (40.5 Pa).



Slika 6.18: Odvisnost c_{ur} mulja sadre od hitrosti vrtenja krilne sonde.

Figure 6.18: c_{ur} of red gypsum mud as a function of the vane rotational speed.

Potem ko je dosežena c_{ur} , prične strižna napetost mulja sadre s časom upadati. Iz časovnega poteka upada τ , smo ocenili τ_{min} (Slika 6.19). Pri zasuku krilne sonde za ca. 2 obrata pride do popolne porušitve strukture mulja sadre; τ upade iz vrednosti več kot 350 Pa na vrednost približno 25 - 50 Pa (τ_{min}), neodvisno od hitrosti vrtenja krilne sonde. Občutljivost mulja sadre pri vlagi 78% je odvisna od hitrosti vrtenja krilne sonde in je med 15 in 30.



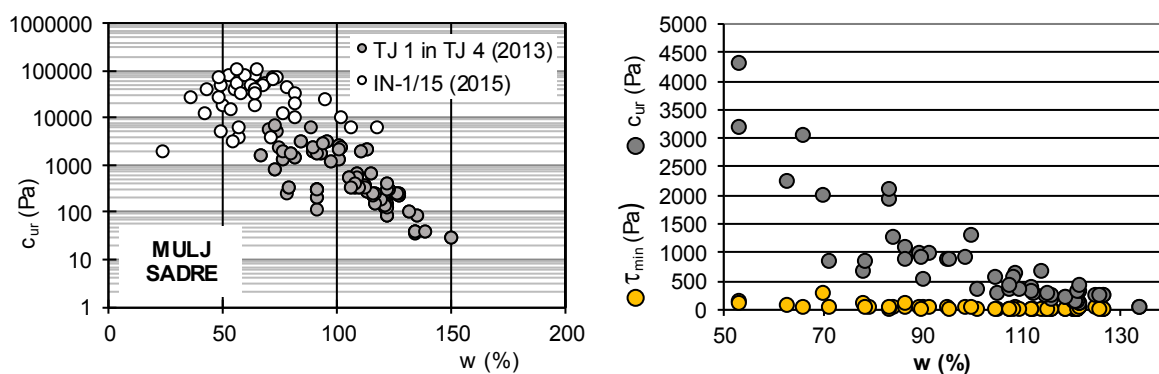
Slika 6.19: Krivulje poteka strižne napetosti mulja sadre za različne hitrosti vrtenja krilne sonde.

Figure 6.19: Shear stress curves of red gypsum mud as the function of revolutions and rotational speed.

Vpliv vlage preizkušanca

Meritve c_{ur} smo izvedli na različno vlažnih preizkušancih. Pri nizkih vlagah, kjer je bilo preseženo mersko območje reometra DV3T HB, smo meritve izvedli s krilno sondo proizvajalca ELE.

Kot smo že ugotovili v interpretaciji vlage in nedrenirane strižne trdnosti v odvisnosti od globine (Sliki 5.6 in 5.8), ima mulj pod suhim nasipom nižjo vlago in višji c_{ur} kot mulj v ojezeritvi (Slika 6.20). V primerjavi z refulom je raztros merjenih vrednosti velik. Merjeni c_{ur} je pri isti vlagi tudi za več kot dekado različen. Nedrenirane strižne trdnosti pregnetenega mulja sadre pri vlagi, ki ustreza meji židkosti, ne moremo enolično določiti, kot tudi ne moremo enolično izmeriti njegove meje židkosti.

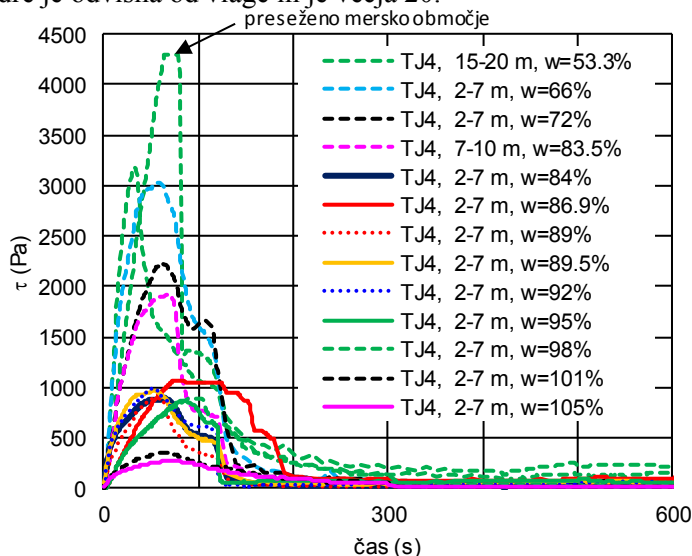


Slika 6.20: Odvisnost c_{ur} od vlage (levo) in c_{ur} in τ_{min} v odvisnosti od vlage (desno) za mulj sadre.

Figure 6.20: c_{ur} versus water content (left) and c_{ur} and τ_{min} versus water content (right) for red gypsum mud.

Zaradi upada τ , ki smo ga identificirali pri meritvah z različnimi hitrostmi vrtenja krilne sonde, smo preverili vpliv vlage na τ_{min} . Krivulje časovnega poteka strižne napetosti vzorcev mulja sadre iz različnih globin v akumulaciji, ki smo jih po potrebi dovlačevali s porno vodo iz mulja, so za območje vlag ca. 50% do 105%, prikazane na Sliki 6.21. Po pričakovanjih je c_{ur} močno odvisen od vlage preizkušanca, τ_{min} pa je ne glede na vlago preizkušanca izjemno nizek. Pri najmanj vlažnih

preizkušancih ($w = 53.3\%$) se ustali pri vrednosti ca. 200 Pa, pri ostalih pa pade pod 50 Pa. Občutljivost mulja sadre je odvisna od vlage in je večja 20.



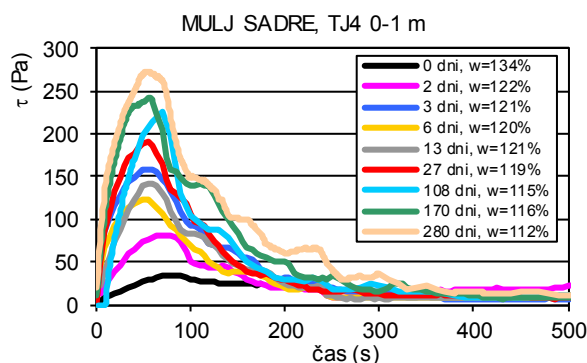
Slika 6.21: Časovni potek τ različno vlažnih preizkušancev (hitrost 0.25 obr/min).

Figure 6.21: Time development of shear stress in red gypsum mud at different water content (constant rotational speed 0.25 RPM).

Vpliv mirovanja in konsolidacije pod lastno težo

Preverili smo prirast c_{ur} zaradi mirovanja in konsolidacije pod lastno težo (angl. *self weight consolidation*). Hkrati smo identificirali tudi obnašanje po doseženem c_{ur} . Preiskavo smo zasnovali tako, da smo tri različne vzorce mulja sadre; TJ-4 0-1 m, TJ-4 4-5 m in TJ-4 5-7 m; vgradili v približno 200 ml lončke, višine ca. 10 cm. Za vsak vzorec smo pripravili serijo 10 preizkušancev, ki smo jih hranili na sobni temperaturi, tesno zaprte s parafilmom in postavljene v vlažno komoro. Meritve smo izvajali pri hitrosti vrtenja krilne sonde 0.25 obr/min, v različnih časovnih intervalih, v obdobju 0 - 280 dni. Pred izvedbo meritve smo vodo, ki se je med mirovanjem izločila iz preizkušanca, previdno odpipetirali.

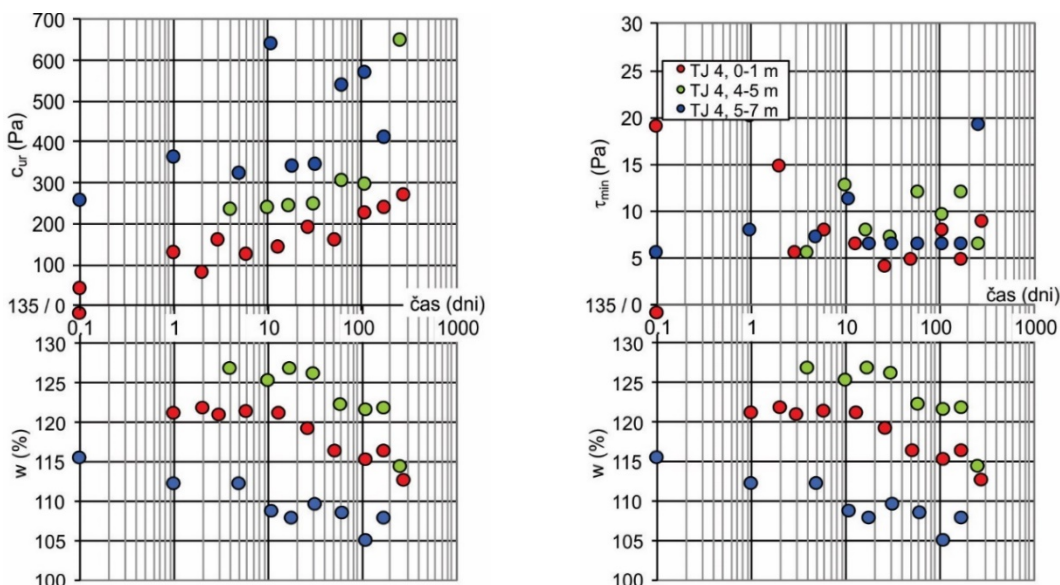
Za vzorec TJ-4 0-1 m so na Sliki 6.22 prikazane krivulje strižne napetosti (τ) v odvisnosti od časa trajanja preiskave za različno stare preizkušance. S časom c_{ur} narašča tako zaradi znižanja vlage kot tudi zaradi ustvarjanja strukture v mulju.



Slika 6.22: Časovni potek τ različno starih (različno dolgo sedimentiranih) preizkušancev (hitrost 0.25 obr/min).

Figure 6.22: Time development of shear stress in specimens of red gypsum mud, consolidated for different period of time (constant rotational speed 0.25 RPM).

Podobno kot pri že opisanih vplivnih dejavnikih, smo tudi za dejavnik vpliva mirovanja ugotovili, da ne glede na starost preizkušanca in c_{ur} , po približno 1 obratu krilne sonde (ca. 240 s), τ upade na vrednost nižjo od 25 Pa (τ_{min}). Primerjalna analiza rezultatov c_{ur} in τ_{min} , različno starih preizkušancev iz vseh treh vzorcev je, skupaj z vlago preizkušanca na dan preiskave, prikazana na Sliki 6.23.



Slika 6.23: c_{ur} (levo zgoraj) in τ_{min} (desno zgoraj) različno dolgo konsolidiranih preizkušancev mulja sadre in vlaga na dan meritve (spodaj).

Figure 6.23: c_{ur} (left upper) and τ_{min} (right upper) of red gypsum mud specimens, consolidated for different period of time and water content at the same time (lower).

Iz rezultatov meritev c_{ur} in τ_{min} s krilno sondo lahko zaključimo:

- c_{ur} je pri vlagah ca. 80% odvisna od hitrosti vrtenja krilne sonde. Pri vlagi 130% neodvisnosti nismo identificirali.
- Raztros c_{ur} je velik. Pri enaki vlagi je interval rezultatov v razponu večjem od dekade.
- Z mirovanjem (več mesecev) pregneten mulj sadre pridobiva c_{ur} , tako zaradi ustvarjanja strukture, kot tudi zaradi izcejene vode.
- τ_{min} je neodvisna od hitrosti vrtenja vretena in od časa mirovanja in le malo odvisna od vlage preizkušanca. Izmerjene vrednosti so nižje od 10 Pa, pa vse do 200 Pa. To kaže na popolno porušitev »navidezne« strukture pregnetenega mulja sadre in njegovo visoko občutljivost.

6.3.7 Tokovne krivulje mulja sadre

τ_y in η_p (parametra Binghamovega modela), ki smo ju določili iz meritev reoloških lastnosti s programom upada hitrosti z reometrom DV3T HB, sta skupaj z vlago preizkušancev prikazana v

Preglednici 6.6, tokovne krivulje pa na Slikah 6.24 in 6.25. Tako iz tokovnih krivulj, kot tudi iz rezultatov, podanih v Preglednici 6.6, vidimo, da z uporabljenimi metodami zanesljivih reoloških parametrov ne moremo izmeriti.

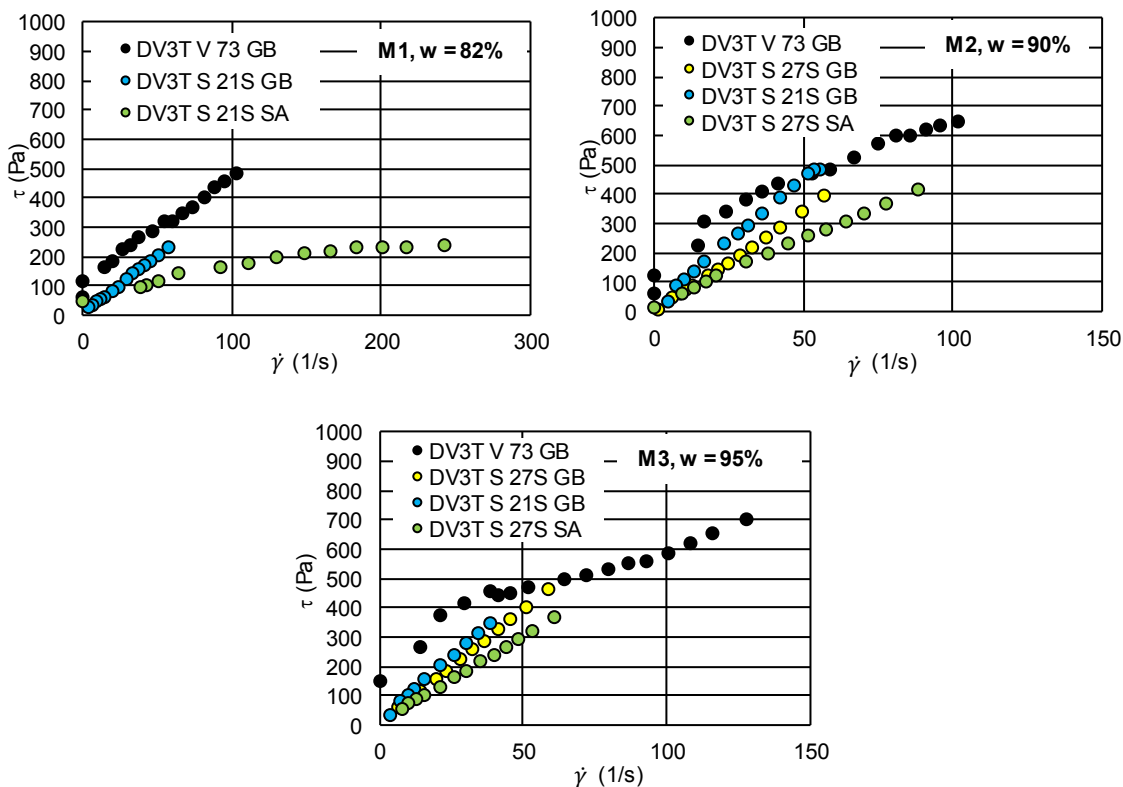
S programom upada hitrosti v reometru namreč merimo na vsaki stopnji (t.j. pri določeni hitrosti) tako dolgo, da vreteno opiše najmanj en obrat, nato z zmanjšano hitrostjo nadaljujemo meritev v različnih dolgih stopnjah do hitrosti, pri kateri je izkoriščenost vretena še zadostna (nad 10%).

Pri interpretaciji rezultatov meritev c_{ur} (poglavje 6.3.6) smo ugotovili, da pri približno enem do dveh obratih vretena strižna napetost upade iz c_{ur} na τ_{min} . Iz tega lahko sklepamo, da pri določitvi tokovnih krivulj, strukturo preizkušanca porušimo že pri najvišji hitrosti vrtenja vretena. V nadaljnjih stopnjah (upad hitrosti) se meritve izvajajo na preizkušancu s porušeno strukturo, kar sovпада z izjemno nizkimi τ_y , določenimi iz tokovnih krivulj, ki pri nekaterih meritvah ustrezajo τ_{min} , določeni iz meritev s krilno sondo (Preglednica 6.6 in Sliki 6.24 in 6.25).

Preglednica 6.6: Reološki parametri mulja sadre (Binghamov model); τ_y (Pa), η_p (mPa·s).

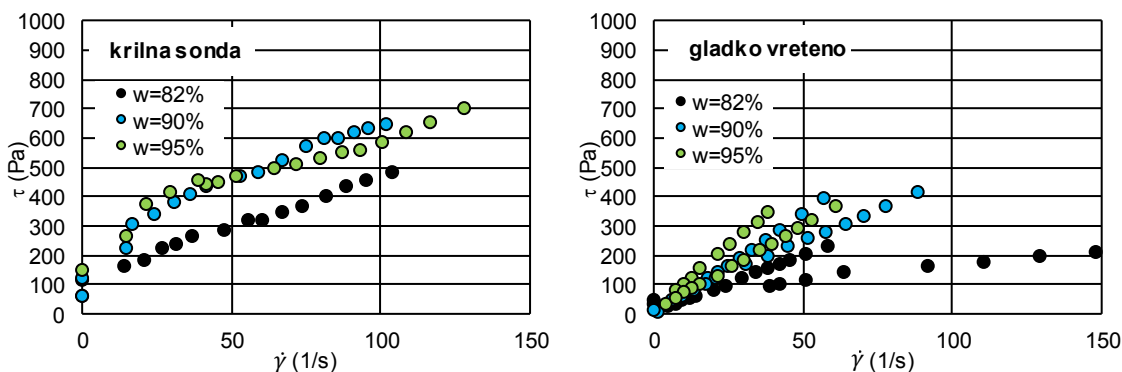
Table 6.6: Rheological parameters of red gypsum mud (Bingham model); τ_y (Pa), η_p (mPa·s).

Preizkušavec	M1		M2		M3	
Vlaga (%)	82		90		95	
Parameter	τ_y	η_p	τ_y	η_p	τ_y	η_p
DV3T V73 GB	130	3373	207	4632	259	3412
DV3T 21S GB	4.6	3963	21.6	8600	15.2	8742
DV3T 27S GB	/	/	2.1	6764	8.9	7680
DV3T 21S SA	83.8	747	/	/	/	/
DV3T 27S SA	/	/	27.9	4400	12.6	5795



Slika 6.24: Tokovne krivulje različno vlažnega mulja sadre (M1 do M3), določene iz meritev z različnimi kombinacijami reometrov, vreten in cilindrov.

Figure 6.24: Flow curves of red gypsum mud at different water content (M1 to M3), determined with different combinations of rheometers, spindles and chambers.



Slika 6.25: Tokovne krivulje različno vlažnega mulja sadre (M1 do M3), izmerjene s krilnimi sondami (levo) in z glatkimi vreteni (desno).

Figure 6.25: Flow curves of red gypsum mud at different water content (M1 to M3), measured with vanes (left) and smooth spindles (right).

Za mulj sadre smo ugotovili, da Binghamova napetost na meji tečenja ni primerljiva z nedrenirano strižno trdnostjo pregnetenega materiala. Napetost na meji tečenja, določeno iz tokovnih krivulj, ocenjujemo kot prenizko za oceno dejanskega začetka tečenja, saj je bila izmerjena na porušeni »navidezni« strukturi. Do porušitve »navidezne« strukture je prišlo v prvi stopnji (pri prvi hitrosti). Po naših ocenah je c_{ur} , določen iz meritev s krilno sondo v laboratoriju na pregnetenih vzorcih (poglavje 6.3.6), bolj ustrezen za opis dejanske napetosti na meji tečenja. Po upadu c_{ur} t.j. v stanju porušene »navidezne« strukture, pa obnašanje mulja sadre najverjetneje lahko približno opišemo z Binghamovimi reološkimi parametri, podanimi v Preglednici 6.6. Po upadu strižne trdnosti mulja sadre je njegovo obnašanje odvisno predvsem od plastične viskoznosti.

Parameter η_p , določen v sklopu teh raziskav, je informativne narave. Literarnih podatkov za podobne materiale ni, zato ustreznosti velikostnega reda reoloških parametrov ne moremo primerjalno ovrednotiti, kot smo to storili za reful.

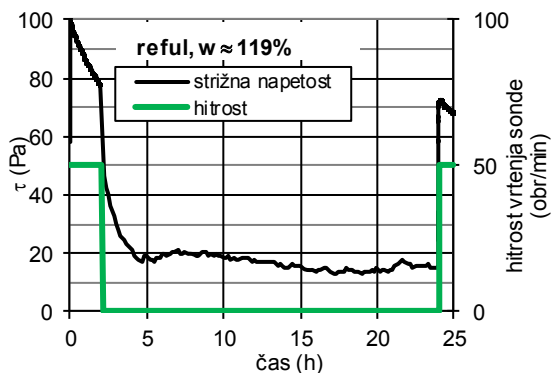
6.4 Tiksotropija

V refulu kazalnikov, ki bi nakazovali na tiksotropijo nismo prepoznali. Porušitev »navidezne« strukture mulja sadre med preiskavami s krilno sondo, ki se kaže v izjemno nizkih vrednostih τ_{min} in v veliki občutljivosti, pa bi lahko nakazovala na tiksotropno obnašanje.

Tiksotropijo obeh muljev smo raziskali s spremljanjem časovnega spreminjanja strižne napetosti kot posledice vsiljevanja strižne deformacije in mirovanja. Preiskavo smo izvedli v treh fazah: (1) konstantna vsiljena deformacija (40-50 obr/min), (2) mirovanje (0.01 obr/min), (3) konstantna vsiljena deformacija (40-50 obr/min). Med mirovanjem smo bili primorani vsiljevati minimalno strižno deformacijo (0.01 obr/min), saj v popolnem mirovanju naprava ne beleži odziva preizkušanca.

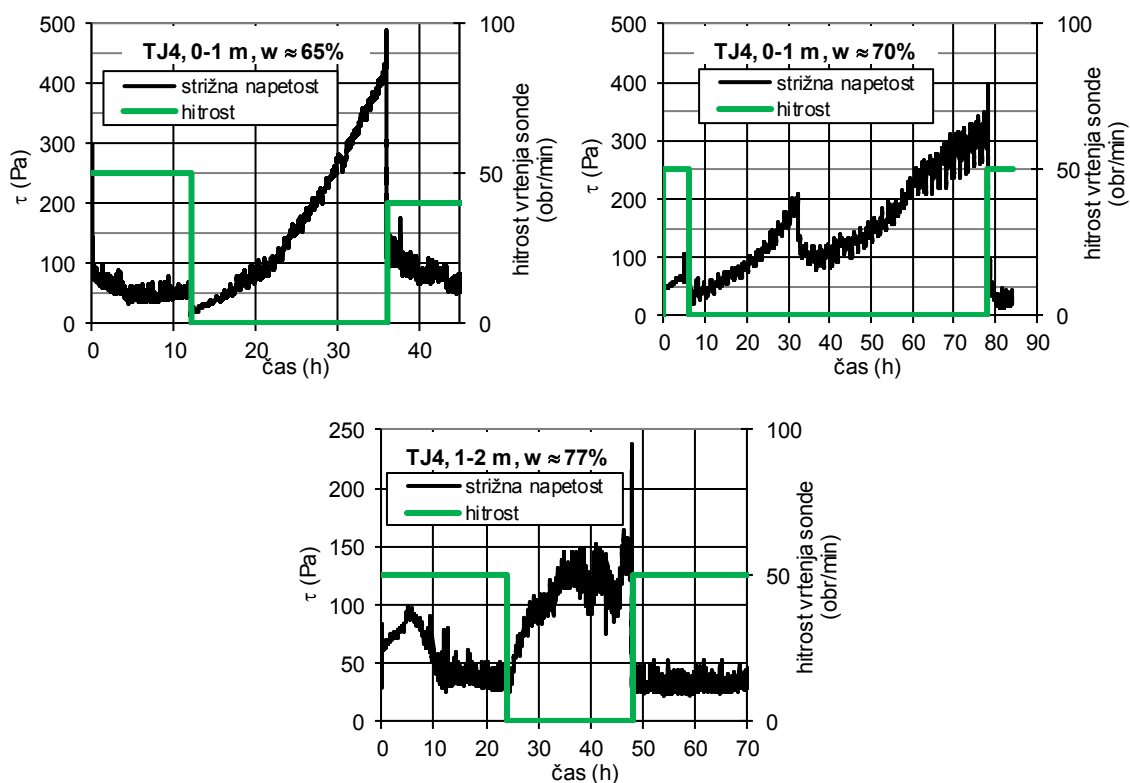
Rezultati so za reful prikazani na Sliki 6.26, za mulj sadre pa na Sliki 6.27.

Obnašanje mulja sadre sledi v teoretičnih izhodiščih predstavljenemu modelu tiksotropnih materialov (poglavje 2.5.5). S konstantno vsiljeno deformacijo porušimo strukturo mulja sadre, ki pa se po daljšem mirovanju obnovi, kar se odraža kot časovni prirast strižne napetosti. Ob ponovnem vsiljevanju konstantne strižne deformacije se »obnovljena« struktura ponovno poruši. Velikost prirasta strižne napetosti med mirovanjem je odvisna od vlage preizkušanca.



Slika 6.26: Rezultat preiskave tiksotropije refula.

Figure 6.26: Results of the investigation of thixotropy of dredged marine sediment.



Slika 6.27: Tiksotropno obnašanje mulja sadre.

Figure 6.27: Thixotropy of red gypsum mud.

6.5 Zaključki

6.5.1 Reful

Iz rezultatov reoloških preiskav refula lahko zaključimo:

- Nedrenirana strižna trdnost pregnetenega refula (c_{ur}) pri vlagi, ki ustreza meji židkosti, je med 1 in 2 kPa, kar je skladno s podatki iz literature.
- Po daljšem času vrtenja krilne sonde c_{ur} upade na vrednost τ_{min} , pri čemer je slednja odvisna od vlage preizkušanca. Razmerje med c_{ur} in τ_{min} je za preizkušance pri vlagi ca. 80% med 3 in 4, z višanjem vlage upada in je v suspenziji z vlago višjo od 150% 1, kar uvršča reful med malo do srednje občutljive materiale.
- Reološke lastnosti refula, v območju preiskovanih vlag, lahko opišemo z Binghamovim modelom, s parametri τ_y in η_p .
- Binghamovi reološki parametri τ_y in η_p , izvednoteni iz meritev po programu upada hitrosti, so z upoštevanjem mrtvega toka, enakega velikostnega reda ne glede na tip uporabljenega reometra.
- Na isti način izvednotene tokovne krivulje so primerljive, ne glede na uporabljen koaksialni valjast reometer (DV3T HB ali ConTec Viscometer 5) in so neodvisne od izbire vretena oz. krilne sonde pri reometru DV3T HB.
- Pri prenizkih vlagah (v refulu ca. 79%) se med vrtenjem gladkega vretena (reometer DV3T HB) formira stabilna luknja, tok materiala pa ne sledi vsiljeni deformaciji.
- Reološki parametri, določeni na refulu, so primerljivi s podatki iz literature, dobro jih opišejo tudi razvite empirične relacije.

6.5.2 Mulj sadre

Mulj sadre izkazuje izrazito strižno lezenje, ki je odvisno predvsem od vsiljene strižne napetosti. Velikostni red hitrosti prirasta strižne deformacije je primerljiv za preizkušance z enakim razmerjem τ/σ_v' .

Merodajnosti izmerjenih reoloških parametrov mulja sadre ne moremo potrditi, saj literaturnih podatkov za primerjavo ni.

Ugotovili pa smo naslednje:

- Nedrenirana strižna trdnost pregnetenih vzorcev je pri isti vlagi za dekada različna. To kaže na močan vpliv naključne strukture v preizkušancu.
- Minimalna strižna napetost τ_{min} je, ne glede na vlago preizkušanca, hitrost vrtenja krilne sonde in čas mirovanja preizkušanca, nizka. Po poružitvi »navidezne« strukture pregnetenih preizkušancev trdnost upade na manj kot 50 Pa. Razmerje med c_{ur} in τ_{min} je npr. na

pregnetenih preizkušancih mulja sadre, pri vlagi med 53% in 98% približno 45 (Slika 6.21), kar pomeni, da lahko mulje sadre uvrstimo med visoko občutljive materiale oz. po reoloških lastnostih v skupino materialov, ki se približuje glinam tipa »quick clay«.

- Tokovne krivulje smo izvednotili za pregnete preizkušance v stanju porušene »navidezne« strukture, ki se je zgodila pri prvi hitrosti (stopnji) vrtenja vretena. Binghamova napetost na meji tečenja ne odraža dejanske napetosti na meji tečenja. Ocenili smo, da je c_{ur} , izmerjena s krilno sondo, ustrežnejša za oceno napetosti na meji tečenja. S tokovnimi krivuljami in izvednotenimi parametri pa opisujemo obnašanje materiala v stanju porušene navidezne strukture.
- Vpliva izbire vretena oz. krilne sonde in cilindra na reološke parametre mulja sadre iz meritev ne moremo oceniti, saj so raztrosi veliki, nekatere vrednosti pa neprimerljive.
- Mulj sadre je tiksotropen. V fazi mirovanja oz. vsiljene nizke strižne deformacije se struktura obnovi, pri ponovnem vsiljevanju strižne deformacije pa se zopet poruši.
- Na refulu smo pokazali dobro sledljivost in ponovljivost rezultatov meritev z uporabo različnih metod. Nasprotno so v mulju sadre odstopanja v rezultatih velika in kažejo na močan vpliv naključne strukture v preizkušancu.
- Z raziskavami smo potrdili, da so bile ocenjene vrednosti, upoštevane v računih hidravličnih posledic morebitne porušitve pregrade Bukovžlak (Četina et al., 2012) (primer P 2), pravilne in so sedaj potrjene tudi z eksperimentalnimi podatki.

7 IZBOLJŠANJE REFULA Z VEZIVI

7.1 Uvod

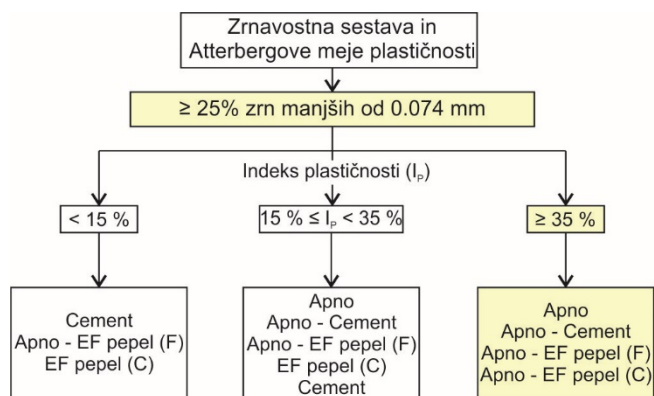
Zaradi visoke vlage refula ni možno vgrajevati v nasipe. Dolgoletne izkušnje v Luki Koper kažejo, da je nadgrajevanje kaset z ustrojem cest in povoznih platojev možno po 5-7 letnem mirovanju in sušenju mulja v kasetah.

Preverili smo, kakšni dodatki veziv so potrebni, da bi z vezivi izboljšane zmesi refula dosegale tlačne trdnosti ca. 350 kPa do 400 kPa po 4-7 dneh vezanja, kar je uveljavljen kriterij pri gradnji cest v Sloveniji.

V tem razdelku so podani rezultati laboratorijskih raziskav izboljšanja refula z dodajanjem veziv. Kot vezivo smo uporabili EF pepel, EF pepel v kombinaciji s cementom in apnom in papirniški pepel. Izboljšanje smo vrednotili na makro nivoju, na podlagi časovnega prirasta tlačne trdnosti in na mikro nivoju, s SEM, XRD in EDS analizami.

7.2 Veziva

Veziva smo izbrali glede na indeksne lastnosti refula, skladno z diagramom po Navodilih za modifikacijo in stabilizacijo zemljin in podlage v cestogradnji (Texas Department of Transportation, 2005; Little in Nair, 2009) (Slika 7.1). Polja diagrama z indeksnimi lastnostmi, ki opisujejo reful in izbrana veziva, so obarvana.



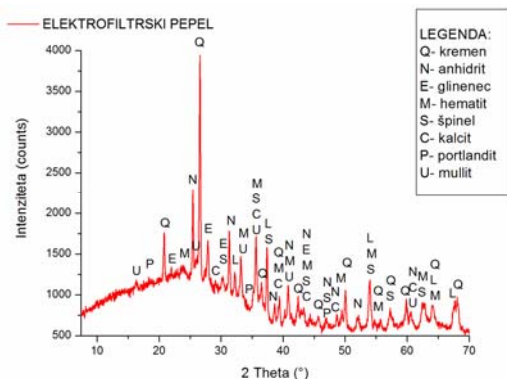
Slika 7.1: Izbira veziv na podlagi indeksnih lastnosti zemljine (Texas Department of Transportation, 2005).

Figure 7.1: Selection of binders based on the index properties of soil (Texas Department of Transportation, 2005).

7.2.1 Elektrofitrski pepel (EFP)

Uporabili smo kalcijski EF pepel (EN 14227-4:2013) iz TE Trbovlje. XRD spekter je na Sliki 7.2, SEM mikro posnetek pa na Sliki 7.3. Rezultati fazne sestave kažejo, da je vzorec EFP sestavljen iz naslednjih kristaliničnih faz: kremena, anhidrita, glinenca, železovih oksidov (hematit, špinel), kalcita,

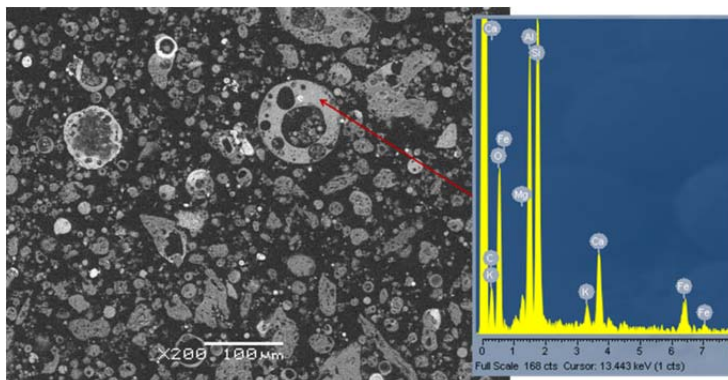
portlandita in mullita. Dvignjeno ozadje difraktograma v območju od 20 do 40 °2θ, ki se odraža v obliki izrazite izbokline oz. rame, kaže na prisotnost amorfne (steklaste) faze.



Slika 7.2: XRD spekter vzorca kalcijskega EF pepela (TET).

Figure 7.2: XRD pattern of class C fly ash (TET).

S SEM/EDS analizo smo potrdili prisotnost steklaste faze, ki je v obliki sferičnih zrn (Slika 7.3), velikih od 150 do 5 mikrometrov. Po oceni je steklaste faze okoli 65 mas %. Sestavljena je pretežno iz silicija in aluminija, podrejeno se pojavljajo tudi kalij, kalcij, magnezij, železo in natrij.

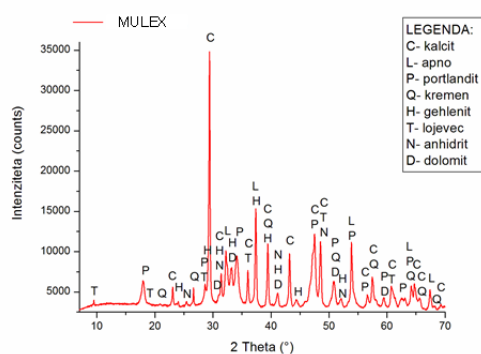


Slika 7.3: SEM mikro posnetek vzorca kalcijskega EF pepela (TET).

Figure 7.3: SEM photomicrograph of class C fly ash (TET).

7.2.2 Papirniški pepel (MULEX)

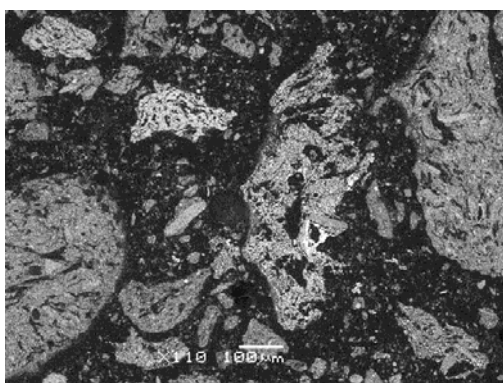
Papirniški pepel je mešanica elektrofiltrskega pepela in pepela z rešetke. Energent je pretežno mulj iz deinking procesa, za uravnavanje kalorične vrednosti občasno dodajajo nekoliko lesne mase (lubja). XRD spekter je na Sliki 7.4, SEM mikro posnetka pa na Slikah 7.5 ter 7.6. Kristalinične faze so kalcit, apno, portlandit, kremen, gehlenit, lojevec, anhidrit, in dolomit. Oblika difraktograma kaže tudi prisotnost steklaste (amorfne) faze.



Slika 7.4: XRD spekter vzorca papirniškega pepela.

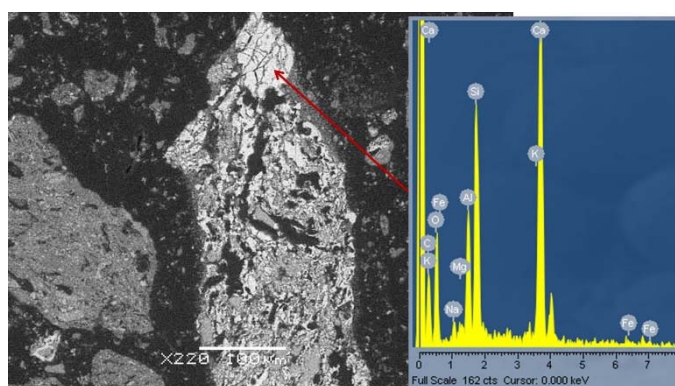
Figure 7.4: XRD pattern of paper sludge ash.

S SEM/EDS analizo smo potrdili prisotnost steklaste faze, ki je v obliki podolgovatih in izometričnih zrn, ter zrn nepravilnih oblik (Slika 7.6). Steklasta zrna so velika od 200 do 10 mikrometrov. Po oceni je steklasta faza okoli 40 mas %, sestavljena je pretežno iz kalcija, z nekoliko silicija in aluminija. Podrejeno se pojavljajo tudi magnezij, kalij, natrij, železo in klor.



Slika 7.5: SEM mikro posnetek vzorca papirniškega pepela.

Figure 7.5: SEM photomicrograph of paper sludge ash.



Slika 7.6: SEM mikro posnetek steklastega zrna z rezultati EDS analize – zrno iz kalcija, silicija, aluminija, natrija, kalija, železa in magnezija..

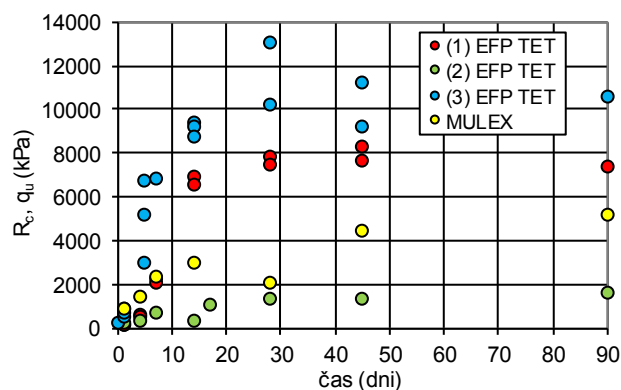
Figure 7.6: SEM photomicrograph of amorphous grain, with results of EDS analysis – grain composed of calcium, silicon, aluminium, sodium, potassium, iron and magnesium.

7.2.3 Časovni prirast tlačne trdnosti

Hidravlične in pucolanske lastnosti EF pepela in MULEXa smo raziskali s spremljanjem časovnega prirasta tlačne trdnosti (R_c, q_u) nabitih preizkušancev. Preizkušance smo zgostili z energijo po Standardnem Proctorjevem postopku (SPP) pri optimalni vlagi.

Na Sliki 7.7 je prikazan časovni prirast tlačne trdnosti preizkušancev EF pepela za tri časovno različne odvzeme in MULEXa.

EF pepel iz (2). odvzema slabo veže, v primerjavi s (1). odvzemom npr. za več kot 70% manj. MULEX izkazuje po 90 dneh tlačne trdnosti nižje od EF pepelov iz (1). in (3). odvzema. Kljub manjši sposobnosti vezanja, smo tudi EF pepel iz (2). odvzema v kombinaciji s cementom in apnom uporabili kot vezivo za pripravo mešanic.



Slika 7.7: Časovni prirast tlačne trdnosti, določen na zgoščenih preizkušancih alternativnih materialov, uporabljenih kot vezivo.

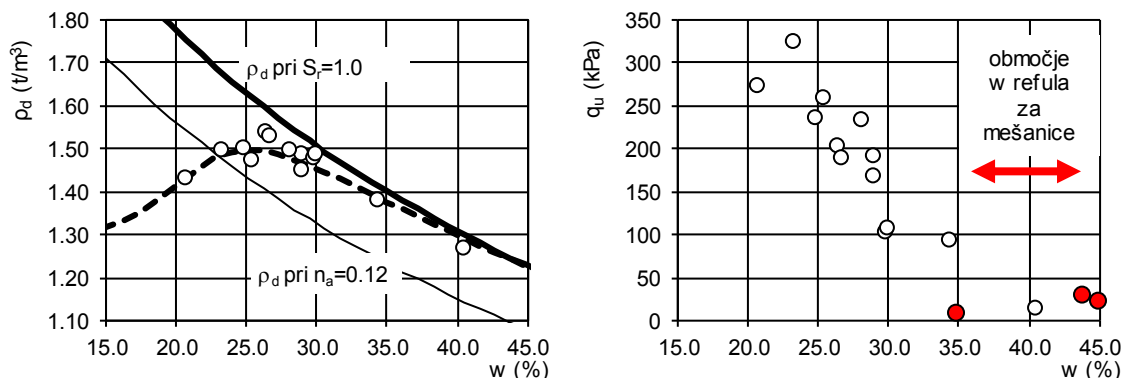
Figure 7.7: The increase of compressive strength with time, determined on compacted specimens from alternative materials, used as binder.

7.3 Priprava refula

Na Sliki 7.8 je prikazana Proctorjeva krivulja, ki kaže, da je optimalna vlaga refula med 25% in 28%, kar je značilna vrednost za mastne gline. Pri vlagah nad 35% refula ni možno zgoščati, ker je stopnja saturacije previsoka. Ker je vlaga refula v kasetah višja od 70%, naravno vlažnega refula iz kaset ni možno izboljšati z vezivi. Potrebno je predhodno dodatno osuševanje.

Znižanje vlage v refulu smo dosegli na dva načina:

- (1) z zračnim sušenjem v laboratoriju. V tem primeru v refulu naraste koncentracija soli v porni vodi.
- (2) z ožemanjem v Rowe celici. V tem primeru ostane koncentracija soli v porni vodi bolj ali manj nespremenjena.



Slika 7.8: Proctorjeva krivulja refula (levo) in tlačna trdnost različno vlažnih zgoščenih preizkušancev refula (desno).

Figure 7.8: Proctor curve of dredged marine sediment (left) and compressive strength of specimens compacted from the same material, at different water content (right).

7.4 Priprava mešanic in preizkušancev

Pred pripravo mešanic smo osušen in ožet reful ločeno, s pomočjo strgala, nastrgali v manjše kosme in ga enakomerno, v debelini ca. 1 cm, razgrnili na večjo površino. Količino veziva smo izračunali kot odstotek mase (m%) glede na suho maso refula. Vezivo smo enakomerno potresli po kosmih refula in po nekaj minutnem gnetenju naredili homogeno maso. Iz sveže mešanice smo z ročnim zgoščanjem v kalup, pripravili preizkušance premera 38 mm in višine ca. 65 -70 mm. Nabite preizkušance smo tesno zavili v folijo in jih postavili v vlažno komoro. Kazalo preiskanih mešanic je v Preglednici 7.1.

Preglednica 7.1: Kazalo mešanic refula z vezivi.

Table 7.1: List of mixtures of dredged marine sediment with binders.

Oznaka mešanice	REFUL		dodatek veziva 1	dodatek veziva 2	
	w _L (%)	priprava	(m%) / odvzem	(m%)	
(1)-1	76	(1) SUŠEN	39.6	8 EFP / 5.7.2012	/
(1)-2	76		39.6	6 EFP / 5.7.2012	3 APNO
(1)-3	76		39.8	5 EFP / 12.4.2012	3 APNO
(1)-4	76		39.8	5 EFP / 5.7.2012	3 APNO
(1)-5	76		39.8	7 EFP / 12.4.2012	3 APNO
(1)-6	76		39.8	7 EFP / 5.7.2012	3 APNO
(1)-7	67		38.1	7 EFP / 12.4.2012	3 APNO
(1)-8	67		38.1	7 EFP / 5.7.2012	3 APNO
(2)-1	39	(2) OŽET	35.0	7 EFP / 12.4.2012	3 APNO
(2)-2	39		35.0	7 EFP / 12.4.2012	3 CEMENT
(2)-3	39		35.0	10 MULEX / februar 2013	/
(2)-4	39		55.0	10 MULEX / februar 2013	/
(2)-5	67		46.2	10 EFP / 12.4.2012	/
(2)-6	67		43.9	7 EFP / 19.3.2014	3 APNO
(2)-7	67		43.9	7 EFP / 19.3.2014	3 CEMENT
(2)-8	67		43.9	10 MULEX / februar 2013	/
(2)-9	67		43.9	10 EFP / 19.3.2014	/

7.5 Rezultati fizikalno mehanskih preiskav

7.5.1 Vpliv veziv na pH mešanice

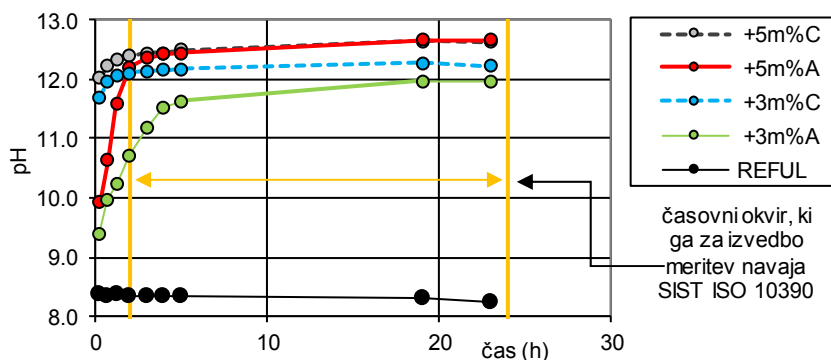
Za izbiro ustrezne količine apna za stabilizacijo zemljin, standard ASTM D 6276 (ASTM, 2006), podaja vrednost suspenzije iz zemljine, apna in vode, pH 12.4. To ustreza vrednosti pH saturirane apnene raztopine. Splošno pa se pri dodatkih veziv (cementa, EF pepela, apna in kombinacij) smatra, da pH 12-13 pri stabilizaciji in izboljšanju zemljin predstavlja območje, v katerem bi naj prišlo do takojšnje reakcije med vezivom in zemljino in do dolgoročnih pucolanskih reakcij (Silitonga et al., 2009).

Meritve smo izvajali po standardu SIST ISO 10390:1996 (SIST, 1996). pH suspenzij smo izmerili z multimetrom HI3512, proizvajalca Hanna instruments, ki smo ga pred merjenjem umerili s standardnimi raztopinami. Za pripravo suspenzij smo uporabili zračno suh reful, zračno suha veziva in destilirano vodo.

Najprej smo izmerili pH suspenzije refula in destilirane vode (pH \approx 8.5). Nato smo izmerili pH mešanic z dodatkom 3m% in 5m% apna (A) ali cementa (C). Nazadnje smo izmerili pH mešanic z izbranimi kombinacijami veziv, ki smo jih dejansko uporabili za pripravo mešanic:

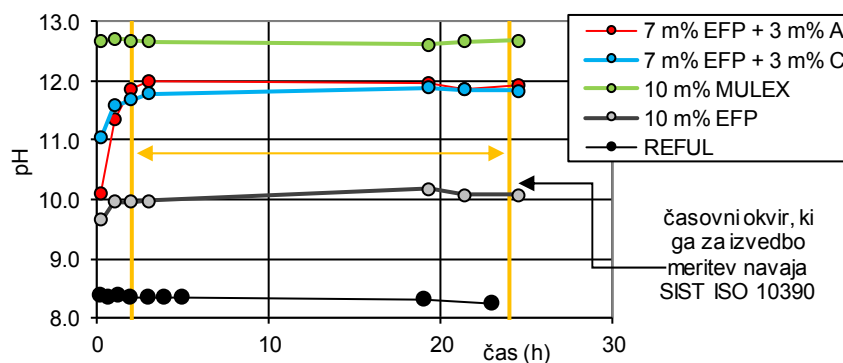
- 7 m% EFP + 3 m% apna (A)
- 7 m% EFP + 3 m% cementa (C)
- 10 m% MULEXa
- 10 m% EFP.

Rezultati meritev pH suspenzij so prikazani na Slikah 7.9 in 7.10. Z dodatki do 5 m% cementa ali apna, kot tudi z dodatki kombinacije 7 m% EF pepela in 3 m% apna oz. cementa smo dosegli vrednost pH 12. Suspenzija, v kateri smo kot vezivo uporabili MULEX, je izkazovala najvišji pH (12.6), suspenzija, pripravljena samo z EF pepelom, pa najnižjega (pH \approx 10).



Slika 7.9: Vpliv dodatka apna (A) in cementa (C) na pH refula.

Figure 7.9: Influence of lime (A) and cement (C) on pH of marine dredged sediment.

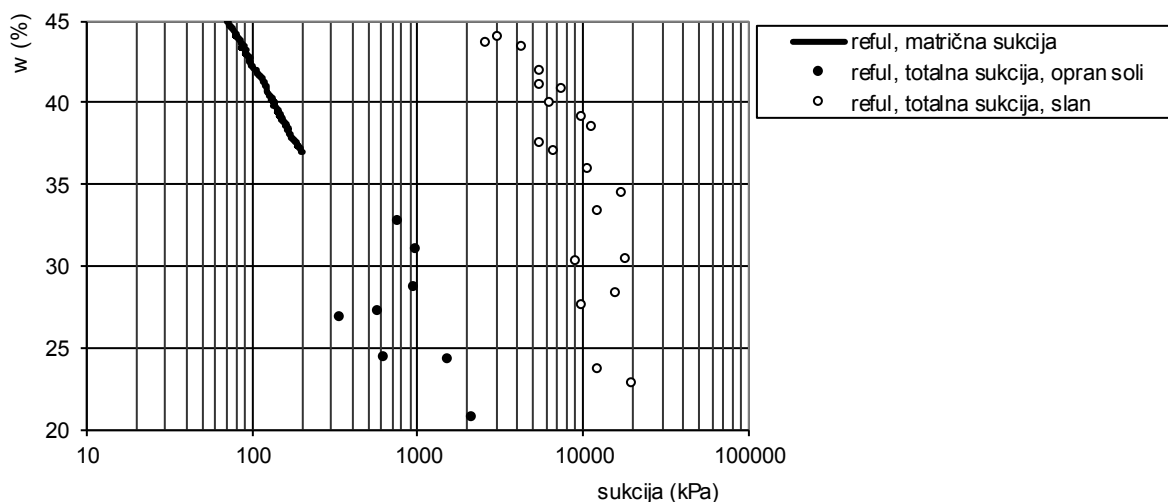


Slika 7.10: Vpliv dodatka kombiniranih veziv (EF pepela (EFP) in cementa (C) ali EF pepela in apna (A)), EF pepela in MULEXa na pH refula.

Figure 7.10: Influence of combined binders (fly ash (EFP) and cement (C) or fly ash and lime (A)), of fly ash and MULEX on pH of marine dredged sediment.

7.5.2 Sukcija z vezivi izboljššanega refula

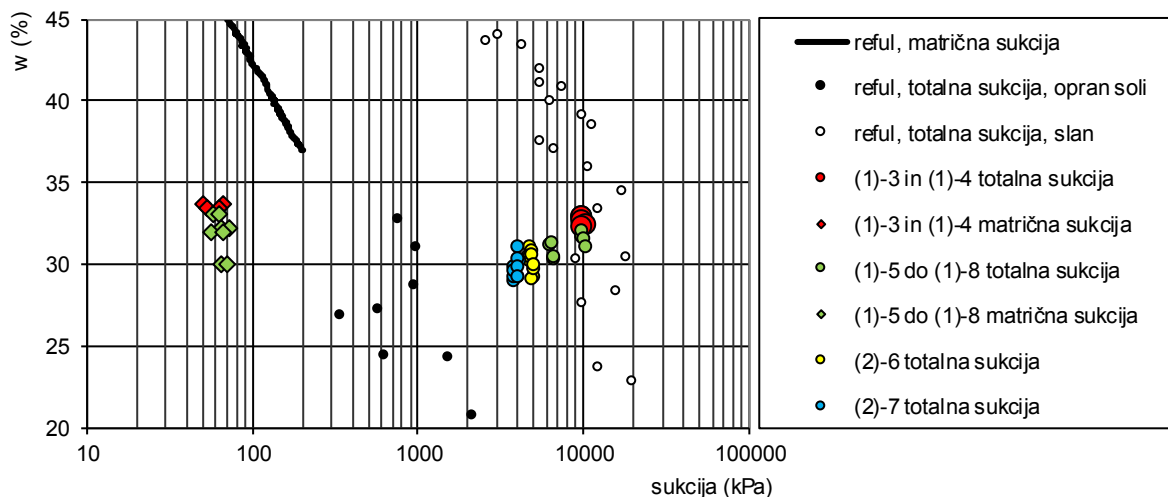
Na Sliki 7.11 sta prikazani retencijski krivulji matrične in totalne sukcije za opran reful (brez soli) in naravno slan reful po znižanju vlage za potrebe izdelave mešanic z vezivi. Meritve kažejo, da je prispevek osmotske sukcije k totalni sukciji v refulu velikostnega reda ca. 4000-5000 kPa. Ker je osmotska sukcija morske vode iz Koprskega zaliva ca. 2400 kPa, podatki na Sliki 7.11 kažejo na močno povečano koncentracijo soli v porni vodi. Izračun pokaže, da je le ta ca. 55 g/L.



Slika 7.11: Totalna in matrična sukcija refula.

Figure 7.11: Total and matric suction of dredged marine sediment.

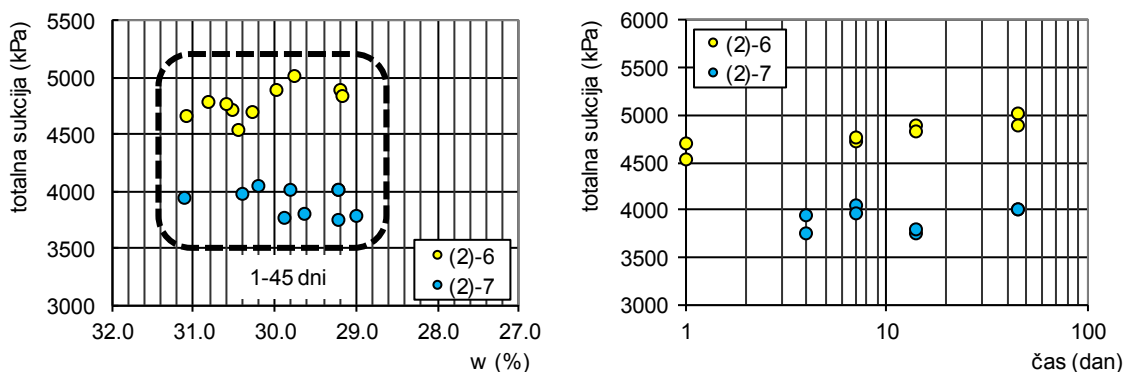
Na Sliki 7.12 so prikazani rezultati meritev totalne in matrične sukcije na mešanicah slanega refula z vezivi. Opazimo lahko, da dodatek veziv zniža matrično in totalno sukcijo. V relativnem smislu je znižanje matrične sukcije bolj opazno od znižanja totalne sukcije, kar je posledica prikaza diagrama v logaritemskem merilu.



Slika 7.12: Totalna in matrična sukcija mešanic.

Figure 7.12: Total and matric suction of mixtures.

Na Sliki 7.13 so prikazani rezultati meritev sukcije po vezanju za dve mešanici (časovna odvisnost). Velikost sukcije mešanice z EFP in cementom je nižja od mešanice z EFP in apnom, kar je pričakovano. Slika 7.13 kaže, da se s časom sukcija vezanih mešanic ne spreminja oz. je velikost spremembe reda velikosti merske napake ali vpliva nekoliko povečane koncentracije soli zaradi dodatnega sušenja.



Slika 7.13: Totalna sukcija starih preizkušancev, pripravljenih iz dveh različnih mešanic.

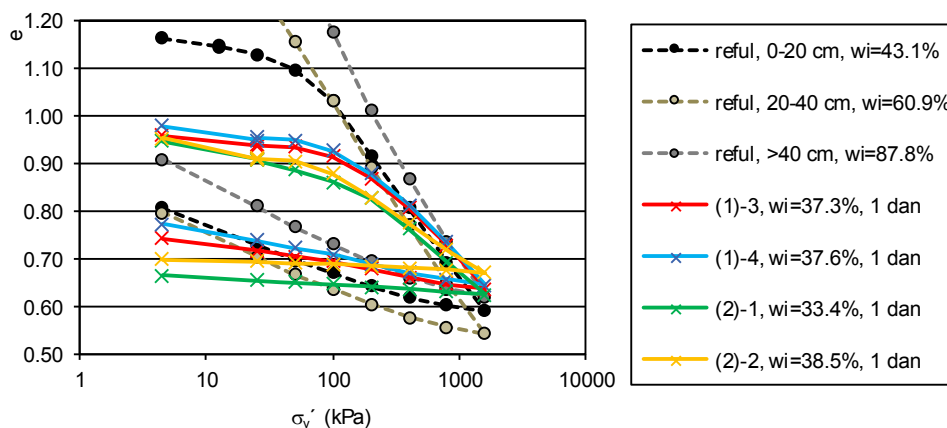
Figure 7.13: Total suction of aged specimens, prepared from two different mixtures.

7.5.3 Stisljivost izboljšanega refula

Krivulje stisljivosti refula brez dodatka veziv in svežih preizkušancev refula, izboljšanega s kombinacijo EF pepela in apna oz. cementa, so prikazane na Sliki 7.14. Krivulje stisljivosti svežih mešanic, ki smo jih pripravili iz refula pri vlagi približno 40%, lahko, z vidika začetne vlage, primerjamo z refulom iz globine 0-20 cm. Vidimo, da smo z dodatkom veziv stisljivost refula zmanjšali.

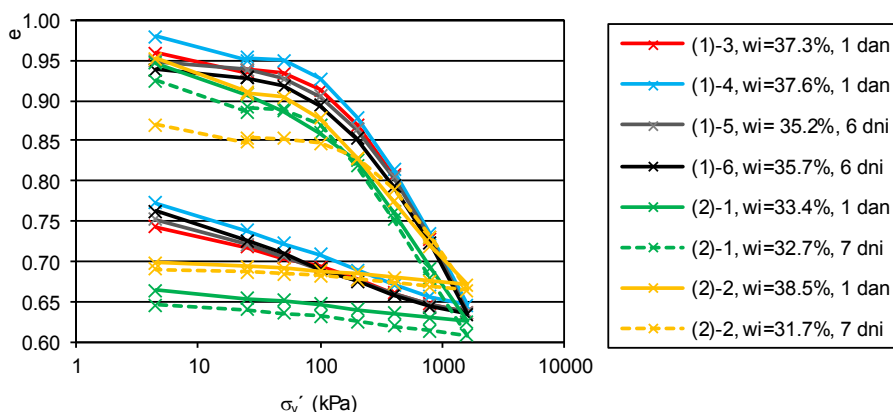
Izboljšani preizkušanci refula, starani 6 oz. 7 dni, izkazujejo nižji začetni količnik por kot sveži preizkušanci, pripravljene z enakimi dodatki veziv. Potek krivulje stisljivosti in količnik por pri

bremenski stopnji 1600 kPa sta primerljiva ne glede na začetno starost preizkušancev (Slika 7.15). Enako stari in enako negovani preizkušanci, pripravljani z dodatkom EF pepela in apna, so bolj stisljivi od tistih, v katerih smo kot vezivo uporabili enako masno razmerje EF pepela in cementa (Slika 7.15, oranžne in zelene linije).



Slika 7.14: Primerjava krivulj stisljivosti svežih preizkušancev izboljšanega in neizboljšanega refula.

Figure 7.14: Comparison of compression curves determined on dredged marine sediment with and without binders (fresh specimens).

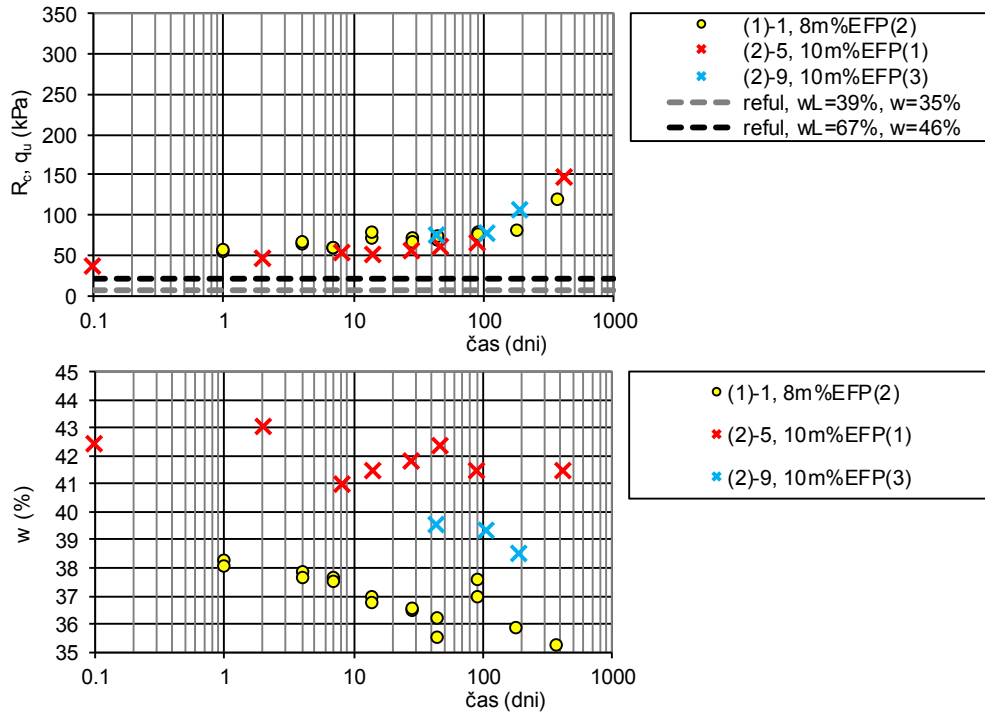


Slika 7.15: Krivulje stisljivosti različno starih preizkušancev izboljšanega refula.

Figure 7.15: Compression curves of improved dredged marine sediment (fresh and aged specimens).

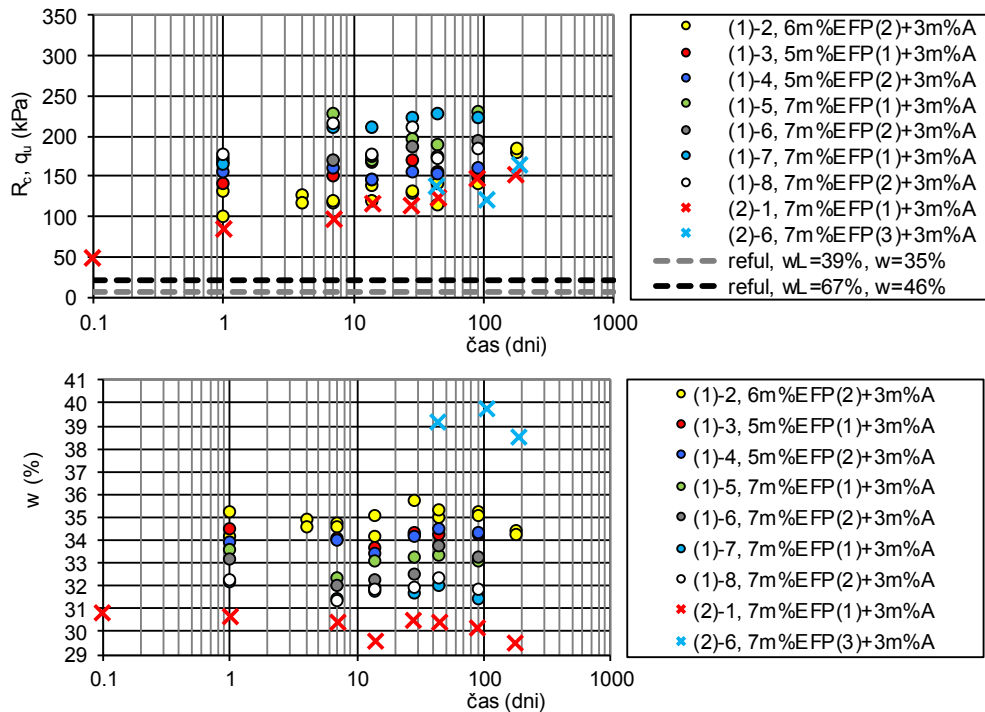
7.5.4 Tlačna trdnost

Rezultati preiskav določanja tlačne trdnosti so prikazani na Slikah 7.16 do 7.19 (zgoraj). Za razvoj tlačne trdnosti je ključnega pomena vlaga pripravljenih zmesi. Pri prenizki vlagi reakcije ne potečejo, po drugi strani pa lahko tlačna trdnost naraste zaradi razsuševanja. Na Slikah 7.16 do 7.19 (spodaj) so zato prikazane tudi vlage preizkušancev na dan preiskave tlačne trdnosti.



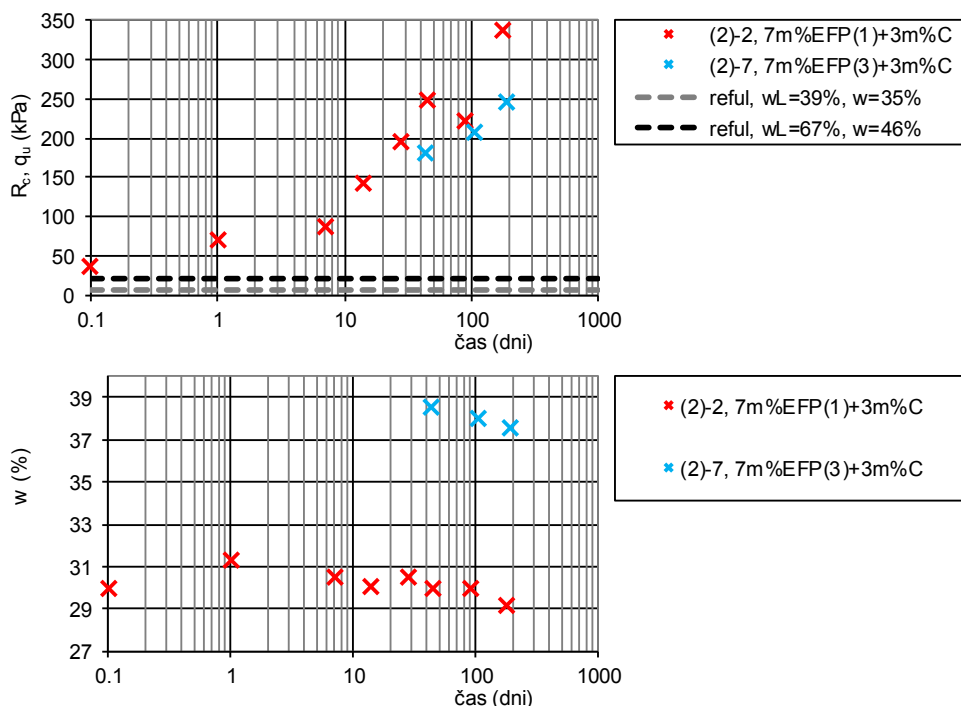
Slika 7.16: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz osušenega (1) ali ožetega (2) refula, z dodatkom EF pepela iz treh odvzemov (po Preglednici 7.1).

Figure 7.16: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from desiccated (1) or filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of fly ash (EFP) (see Table 7.1).



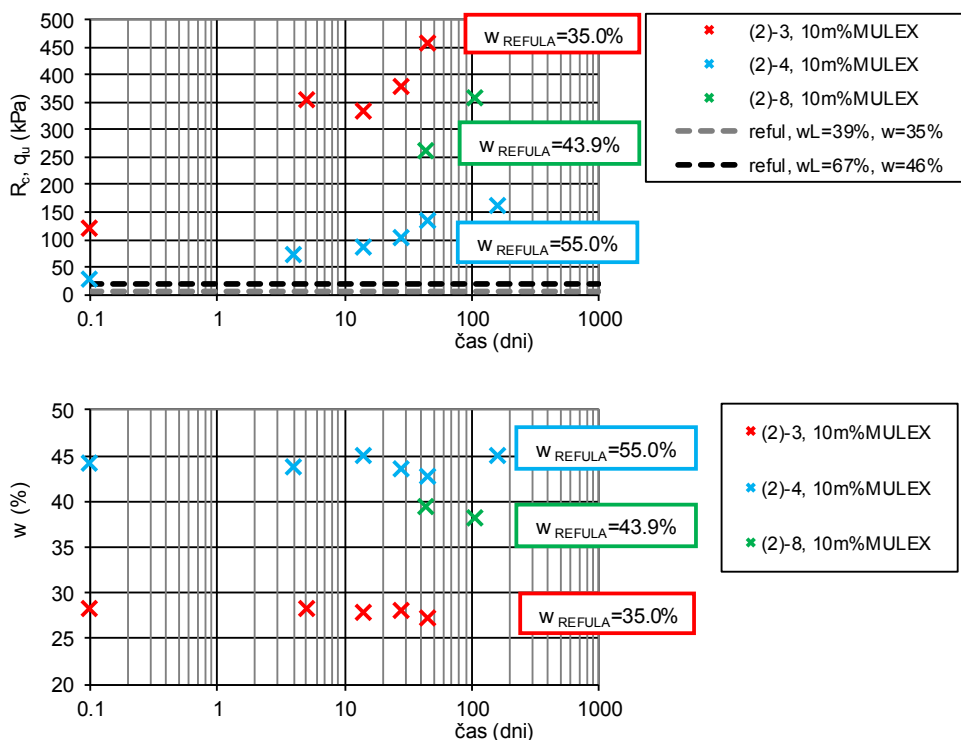
Slika 7.17: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz osušenega (1) ali ožetega (2) refula, z dodatkom EF pepela in apna (A) (po Preglednici 7.1).

Figure 7.17: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from desiccated (1) or filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of fly ash (EFP) and lime (A) (see Table 7.1).



Slika 7.18: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz ožetega (2) refula, z dodatkom EF pepela in cementa (C) (po Preglednici 7.1).

Figure 7.18: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of fly ash (EFP) and cement (C) (see Table 7.1).



Slika 7.19: Časovni prirast tlačne trdnosti (zgoraj) in sprememba vlage (spodaj) mešanic, pripravljenih iz ožetega (2) refula, z dodatkom papirniškega pepela (MULEX) (po Preglednici 7.1).

Figure 7.19: The increase of compressive strength with time (upper) and changes in water content during ageing (lower) of mixtures prepared from filtrated (2) dredged marine sediment with the addition of MULEX (see Table 7.1).

Najnižjo tlačno trdnost so dosegale zmesi z dodanim EF pepelom (Slika 7.16). Način sušenja refula nima posebnega vpliva. Po 4 - 7 dneh vezanja so tlačne trdnosti nižje od 100 kPa in ne upravičujejo dodatkov EF pepela.

Učinkovitost EF pepela se močno izboljša z dodatkom apna (Slika 7.17). Rezultati kažejo, da je trdnost mešanic iz ožetega refula nižja od tistih iz sušenega refula. To je zelo verjetno posledica višje osmotske sukcijske v sušenem refulu. Po 7 dneh vezanja, trdnost skorajda ne narašča več. Dosežene tlačne trdnosti so nizke in ne upravičujejo tako visokega dodatka veziv.

Učinkovitost EF pepela se izboljša tudi z dodatkom cementa (Slika 7.18). Zgodnje trdnosti (4-7 dni), ki so bistvene, so sicer nizke (< 100 kPa), vendar pa tlačna trdnost s časom vezanja narašča. Tudi ta dodatek veziv glede na učinke ni upravičen.

Najvišje tlačne trdnosti so dosegle mešanice s papirniškim pepelom (MULEX). Trdnost teh mešanic se je približala splošno uveljavljenim zahtevam za gradnjo cest.

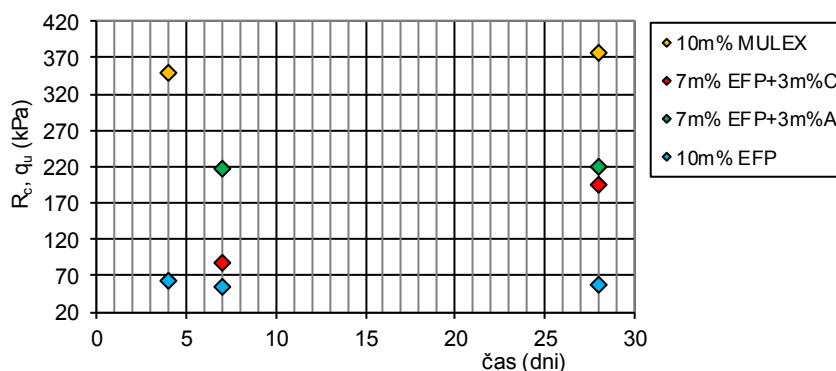
V Preglednici 7.2 smo zbrali podatke o doseženih tlačnih trdnostih preizkušancev iz vseh mešanic po 7 dneh vezanja. Na Sliki 7.20 so prikazane zgodnje trdnosti (4, 7 in 28 dni) mešanic refula s primerljivo začetno vlago ($w=44\%-46\%$), z različnimi dodatki veziv.

Preglednica 7.2: Tlačna trdnost 7 dni starih preizkušancev, pripravljenih iz različnih mešanic.

Table 7.2: Compressive strength of 7 days aged specimens, prepared from different mixtures.

REFUL	dodatek veziva 1	dodatek veziva 2	tlačna trdnost / starost
w (%)	(m%) / odvzem	(m%)	R_c, q_u (kPa) / dni
40-46	/	/	6-20 / svež
40-46	10 EFP	/	54-63 / 7 dni
35-44	7 EFP (dobro vezoč)	3 APNO	100 kPa*, 210 kPa / 7 dni
35-44	7 EFP (dobro vezoč)	3 CEMENT	85 kPa / 7 dni
35	10 MULEX	/	350 kPa / 7 dni
55	10 MULEX	/	70 kPa / 7 dni

*nižje vrednosti dosegajo preizkušanci pripravljeni iz ožetega refula



Slika 7.20: Časovni prirast tlačne trdnosti različnih mešanic, pripravljenih iz primerljivo vlažnega refula ($w=44\%-46\%$).

Figure 7.20: Time dependent increase of compressive strength of different mixtures, prepared from dredged marine sediment at comparable water content ($w=44\%-46\%$).

7.6 Rezultati mineraloških analiz

Z XRD, SEM in EDS analizami z vezivi izboljšanege refula smo poskušali prepoznati faze nastale kot produkt hidratacije. Kazalo preizkušancev, na katerih so bile izvedene mineraloške analize, je podano v Preglednici 7.3. V Preglednici 7.3 je podana tudi starost preizkušancev na dan izvedbe preiskave. Preizkušanci so bili do preiskave hranjeni v vlažni komori. Oznake mešanic so skladne z oznakami v Preglednici 7.1.

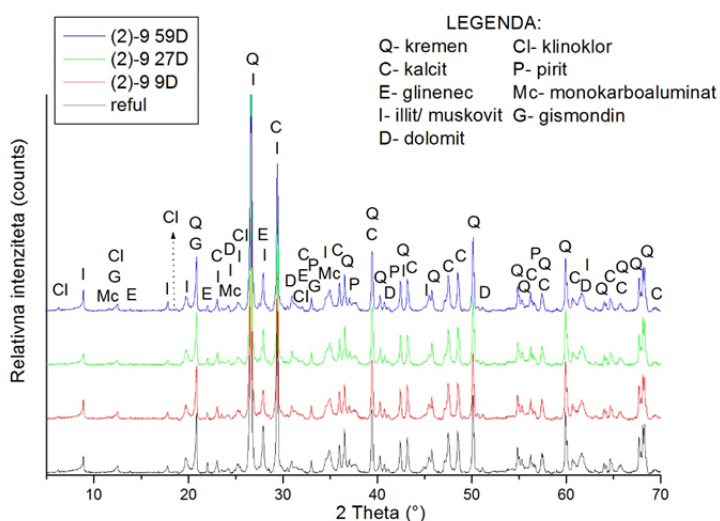
Preglednica 7.3: Kazalo preizkušancev za mineraloške analize.

Table 7.3: List of specimens for mineralogical analysis.

Oznaka mešanice	Dodatek veziva 1	Dodatek veziva 2	Starost na dan preiskave
	(m%) / odvzem	(m%)	(dni)
(2)-6	7 EFP / 19.3.2014	3 APNO	10, 28 in 60
(2)-7	7 EFP / 19.3.2014	3 CEMENT	10, 28 in 60
(2)-8	10 MULEX / februar 2013	/	9, 27 in 59
(2)-9	10 EFP / 19.3.2014	/	9, 27 in 59

7.6.1 Reful izboljšan z dodatkom 10m% EF pepela, mešanica (2)-9

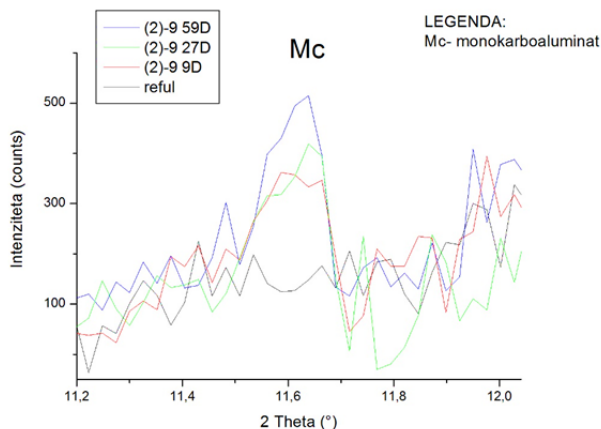
Rezultati fazne sestave različno starih preizkušancev refula, izboljšanih z 10m% EF pepela, so skupaj s fazno sestavo refula grafično prikazani na Sliki 7.21. Difraktogram izboljšanege refula je v glavnih fazah pričakovano enak difraktogramu refula brez dodatkov, saj ta predstavlja glavno sestavino v mešanici. Kot produkta hidratacije sta v majhnih količinah identificirana tudi monokarboaluminat in gosmondin.



Slika 7.21: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-9 in refula.

Figure 7.21: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-9 and of dredged marine sediment.

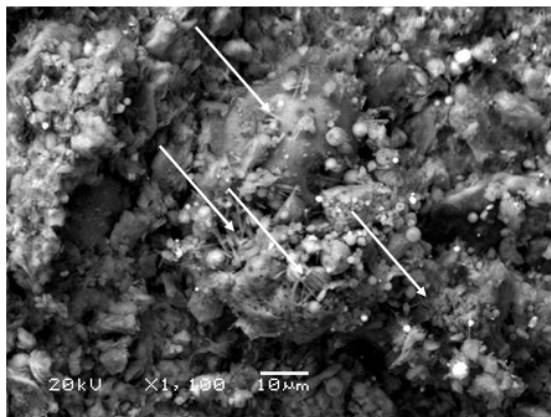
Iz izseka difraktogramov v območju med 11.2° in $12.1^\circ 2\theta$ (Slika 7.22) in s Slike 7.21 vidimo, da sta med staranjem preizkušancev zaradi hidratacije nastala: (1) kalcijev aluminat hidrat (CAH; monokarboaluminat - $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) in (2) kalcijev aluminat silikat hidrat (CASH; gismondin- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Količina monokarboaluminata s starostjo preizkušancev narašča.



Slika 7.22: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-9; produkt hidratacije in refula.

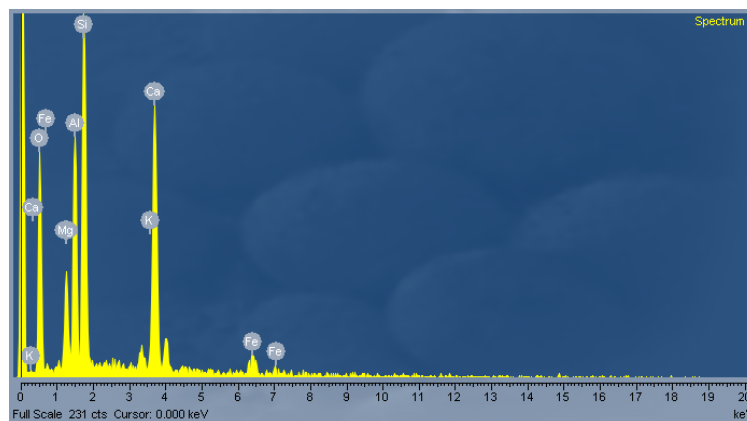
Figure 7.22: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-9; hydration phase and of dredged marine sediment.

Na SEM mikrosnetku (Slika 7.23) so vidne faze, ki so med staranjem nastale kot produkt hidratacije. Rezultat EDS analize kaže, da so na novo nastale faze sestavljene v večini iz silicija, kalcija in aluminija (Slika 7.24).



Slika 7.23: SEM mikrosnetek izboljšane refula, mešanica (2)-9. Puščice označujejo prepletanje različnih struktur (igličaste in ploščaste)

Figure 7.23: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-9. Arrows point on interweaving of different structures (needles and plates)

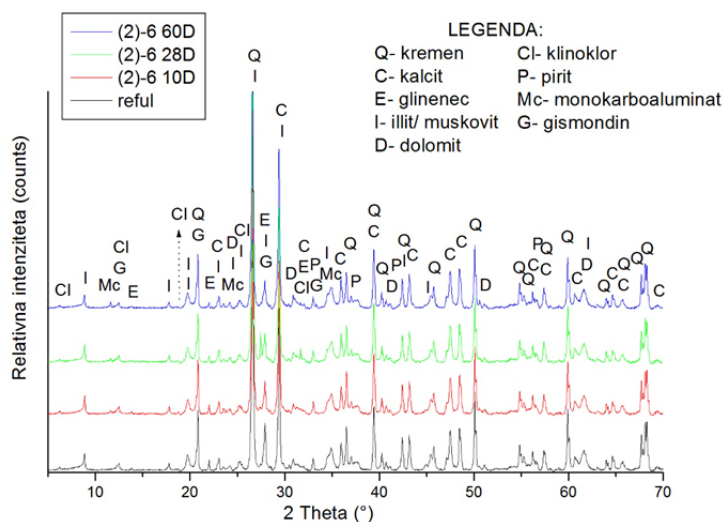


Slika 7.24: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-9.

Figure 7.24: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-9.

7.6.2 Reful izboljššan z dodatkom 7m% EF pepela in 3m% apna, mešanica (2)-6

Rezultati fazne sestave različno starih preizkušancev refula, izboljšanih s 7m% EF pepela in 3m% apna, so skupaj s fazno sestavo refula grafično prikazani na Sliki 7.25. Glavne faze v mešanici (2)-6 predstavljajo kremen, kalcit, glinenec, dolomit, sljuda (muskovit), glineni minerali (illit in klinoklor) ter pirit. V majhnih količinah sta identificirana tudi monokarboaluminat in gosmondin. Podobno kot v refulu z dodatkom EF pepela, so tudi v tej mešanici kot glavne faze prepoznane faze, ki nastopajo v čistem refulu.

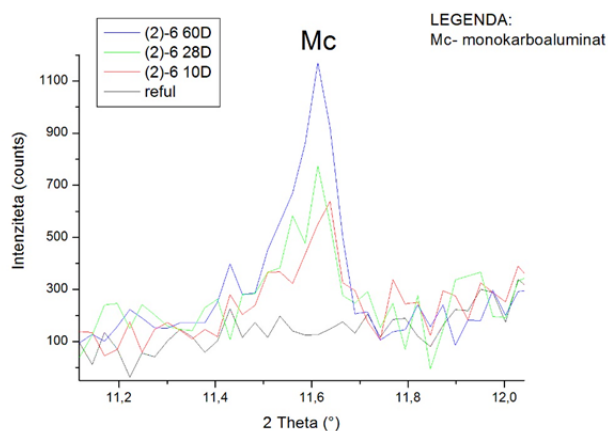


Slika 7.25: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-6 in refula.

Figure 7.25: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-6 and of dredged marine sediment.

Na Sliki 7.26 je prikazan izsek difraktogramov v območju med 11.1° in 12.1° 2θ. Iz difraktogramov na Slikah 7.25 in 7.26 je razvidno, da sta med nego vzorca v komori nastali dve novi fazi: (1) kalcijev aluminat hidrat (CAH; monokarboaluminat- $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) in (2) kalcijev aluminat silikat hidrat (CASH; gismondin- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ki nastaneta pri hidrataciji (latentno) hidravličnih materialov.

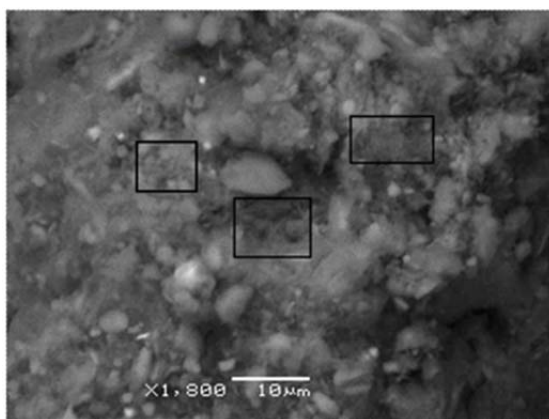
Intenzitete mineralov, ki so nastali kot produkt hidratacije, so nizke. Kljub vsemu pa je s Slike 7.26 lepo vidno, da količina monokarboaluminata s časom narašča.



Slika 7.26: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-6; produkt hidratacije in refula.

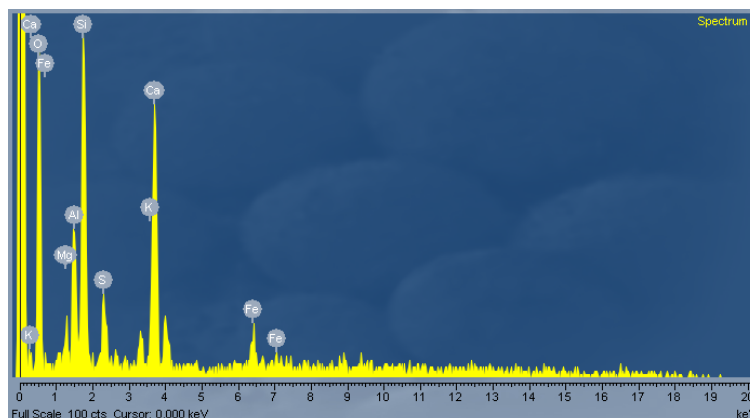
Figure 7.26: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-6; hydration phase and of dredged marine sediment.

Na SEM mikroposnetku, prikazanem na Sliki 7.27, so razvidne mineralne faze, ki so nastale kot produkt hidratacije med staranjem preizkušancev. V mikrostrukturi se kaže prepletanje faz z retikularno, ploščasto in igličasto obliko (Slika 7.27, označeno s pravokotniki). Rezultati EDS analize kažejo, da so na novo nastale faze sestavljene v večini iz silicija, kalcija in aluminija (Slika 7.28).



Slika 7.27: SEM mikroposnetek izboljšane refula, mešanica (2)-6.

Figure 7.27: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-6.



Slika 7.28: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-6.

Figure 7.28: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-6.

7.6.3 Reful izboljššan z dodatkom 7m% EF pepela in 3m% cementa, mešanica (2)-7

Rezultati fazne sestave različno starih preizkušancev refula, izboljšanih s 7m% EF pepela in 3m% cementa, so skupaj s fazno sestavo refula prikazani na Sliki 7.29.

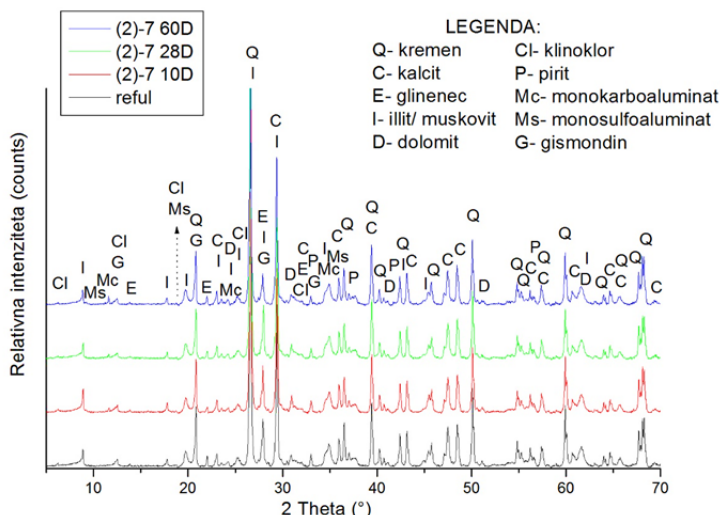
Podobno kot v refulu z dodatkom EF pepela in EF pepela in apna, so tudi v tej mešanici kot glavne faze prepoznane faze, ki nastopajo v čistem refulu. Dodatno so bili v majhnih količinah, v izboljššanem refulu, prepoznani še monokarboaluminat, monosulfoaluminat in gismondin.

Izsek iz difraktogramov v območju med 8.9° in $11.9^\circ 2\theta$, je prikazan na Sliki 7.30. Vidimo, da sta med staranjem preizkušanca v komori tudi v tem primeru nastali dve novi fazi: (1) kalcijev aluminat hidrat (CAH; monokarboaluminat- $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) in (2) kalcijev aluminat silikat hidrat (CASH; gismondin- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ki nastaneta pri hidrataciji (latentno) hidravličnih materialov.

Kljub temu, da so intenzitete nizke, je s Slike 7.30 lepo vidno, da količina monokarboaluminata s časom narašča. Po 60 dneh nege pa je prisoten tudi monosulfoaluminat.

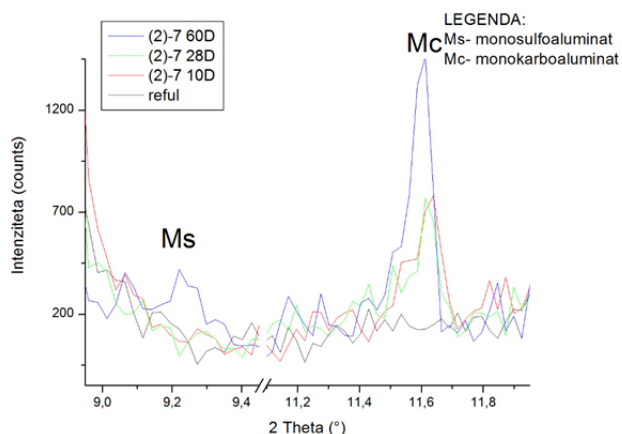
V mikrostrukturi preizkušanca se lepo kaže prepletanje faz s ploščasto in igličasto obliko (Slika 7.31, puščice), ki predstavljajo mineralne faze, nastale kot produkt hidratacije med staranjem preizkušancev.

Rezultati EDS analize kažejo, da so na novo nastale faze sestavljene v večini iz silicija, kalcija in aluminija (Slika 7.32).



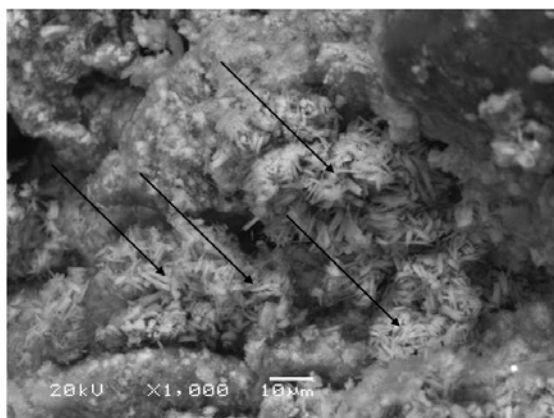
Slika 7.29: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-7 in refula.

Figure 7.29: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-7 and of dredged marine sediment.



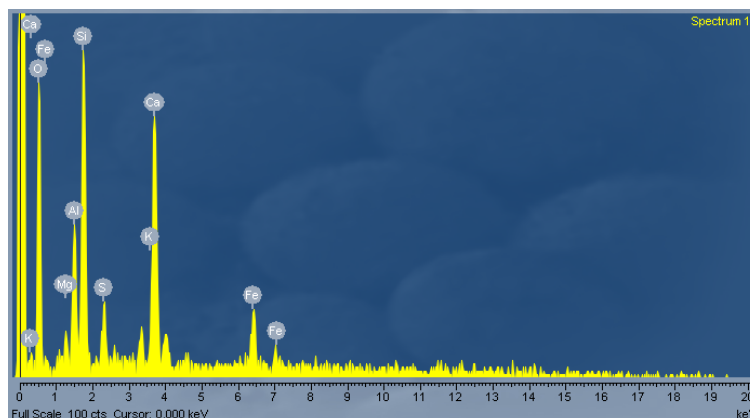
Slika 7.30: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-7; produkt hidratacije in refula.

Figure 7.30: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-7; hydration phase and of dredged marine sediment.



Slika 7.31: SEM mikrosnetek izboljšanega refula, mešanica (2)-7. Puščice označujejo prepletanje različnih struktur (igličaste in ploščaste).

Figure 7.31: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-7. Arrows point on interweaving of different structures (needles and plates).



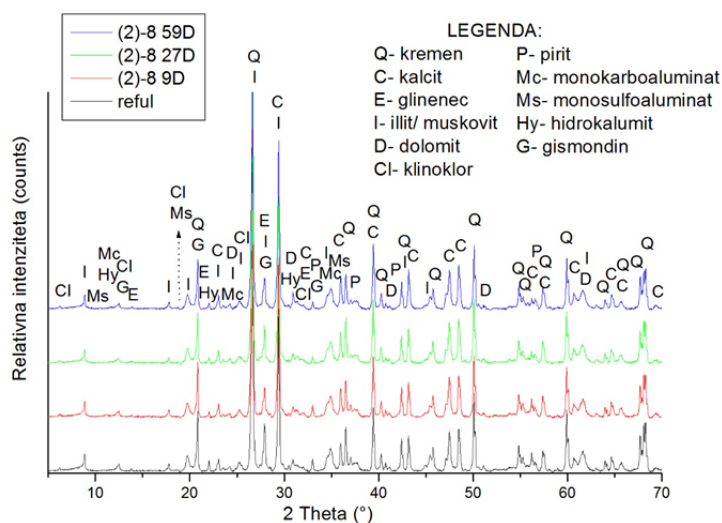
Slika 7.32: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-7.

Figure 7.32: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-7.

7.6.4 Reful izboljšan z dodatkom 10m% MULEXa, mešanica (2)-8

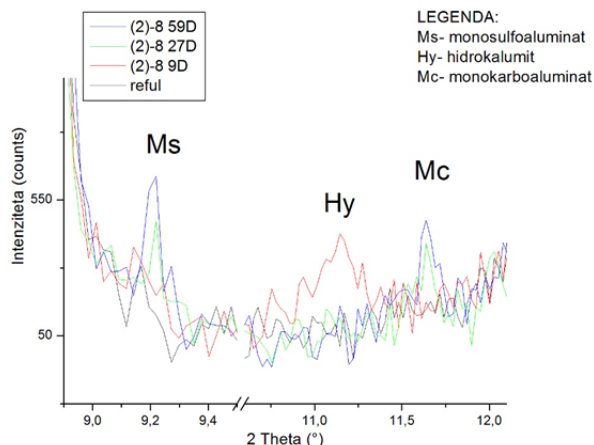
Fazna sestava različno starih preizkušancev refula, izboljšanih z 10m% MULEXa, je skupaj s fazno sestavo refula prikazana na Sliki 7.33. Podobno kot v refulu z ostalimi dodatki, so tudi v tej mešanici kot glavne faze prepoznane faze, ki nastopajo v čistem refulu. V majhnih količinah so bili v izboljšanem refulu identificirani tudi monokarboaluminat, monosulfoaluminat, hidrokalumit in gismondin.

Izsek iz difraktogramov v območju med 8.9° in $12.1^\circ 2\theta$, je prikazan na Sliki 7.34. Vidimo, da so med staranjem nastale nove faze: (1) kalcijev aluminat hidrat (CAH; monokarboaluminat- $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, monosulfoaluminat - $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO})_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ in hidrokalumit - $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in (2) kalcijev aluminat silikat hidrat (CASH; gismondin- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ki nastanejo pri hidrataciji (latentno) hidravličnih materialov. Intenzitete so nizke. Kljub temu pa je lepo vidno, da količina monosulfoaluminata in monokarboaluminata s starostjo preizkušancev narašča. Prisotnost hidrokalumita je bila zaznana samo v preizkušancu starem 9 dni, v starejših preizkušancih pa ne (Slika 7.34).



Slika 7.33: Difraktogrami različno starih preizkušancev mešanice (2)-8 in refula.

Figure 7.33: XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-8 and of dredged marine sediment.

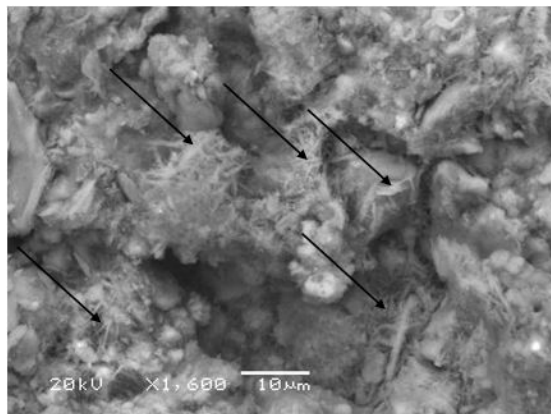


Slika 7.34: Izsek iz difraktograma različno starih preizkušancev mešanice (2)-8; produkt hidratacije in refula.

Figure 7.34: Section from the XRD patterns of aged specimens from mixture (2)-8; hydration phase and of dredged marine sediment.

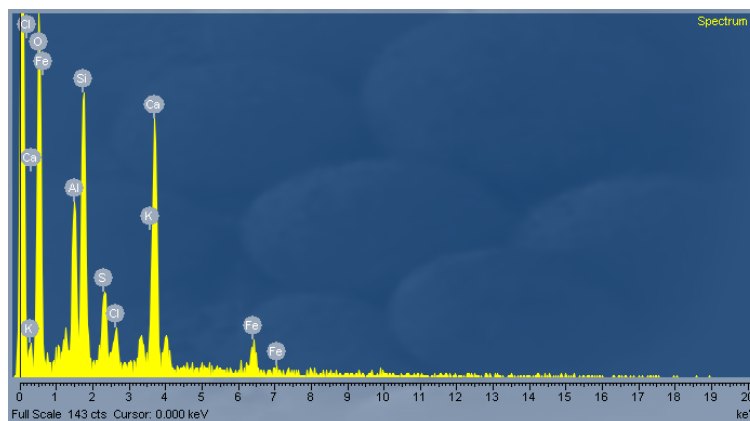
Na SEM mikroposnetku (Slika 7.35) so lepo vidne faze, ki so nastale kot produkt hidratacije med staranjem preizkušancev. V mikrostrukturi je vidno prepletanje faz ploščaste in igličaste oblike (Slika 7.35, puščice).

Rezultati EDS analize kažejo, da so na novo nastale faze, podobno kot v predhodno obravnavanih mešanicah, sestavljene v večini iz silicija, kalcija in aluminija (Slika 7.36).



Slika 7.35: SEM mikroposnetek izboljšanega refula, mešanica (2)-8. Puščice označujejo prepletanje različnih struktur (igličaste in ploščaste).

Figure 7.35: SEM photomicrograph of improved dredged marine sediment, mixture (2)-8. Arrows point on interweaving of different structures (needles and plates).



Slika 7.36: EDS spekter produkta hidratacije nastalega v mešanici (2)-8.

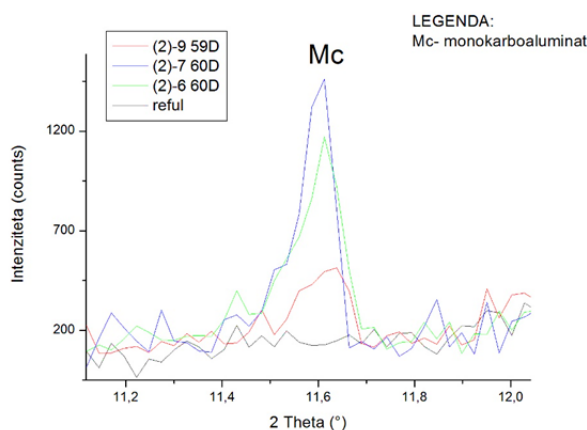
Figure 7.36: EDS pattern of hydration phases formed in mixture (2)-8.

7.6.5 Primerjava monokarboaluminata v mešanicah z glavno komponento veziva EF pepel

Primerjavo količine hidratacijskega produkta monokarboaluminata smo izvedli za najdlje časa negovane preizkušance iz mešanic, v katerih smo kot glavno vezivo uporabili EF pepel: (2)-9 – vezivo: 10m% EF pepela, (2)-6 – vezivo: 7m% EF pepela in 3m% apna in (2)-7 vezivo: 7m% EF pepela in 3m% cementa.

Monokarboaluminat smo za primerjalno analizo izbrali, ker je semikvantitativna primerjava možna. Uklon te faze se ne prekriva z nobenim drugim. Ukloni gismondina se vsaj deloma prekrivajo z ostalimi fazami, prisotnimi v preizkušancih, zato zanj primerjave niso možne.

Iz izseka difraktogramov v območju med 11.1° in 12.1° 2θ (Slika 7.37) vidimo, da je največ monokarboaluminata nastalo v mešanici, v kateri smo kot vezivo uporabili EF pepel in cement, najmanj pa v mešanici, v kateri smo kot edino vezivo uporabili EF pepel.



Slika 7.37: Izsek iz difraktogramov 60 dni starih preizkušancev iz različnih mešanic (2)-9, (2)-6 in (2)-7.

Figure 7.37: Section from the XRD patterns of 60 days aged specimens from mixtures (2)-9, (2)-6 in (2)-7.

7.7 Zaključek

Iz rezultatov raziskav z vezivi izboljšanege refula lahko zaključimo:

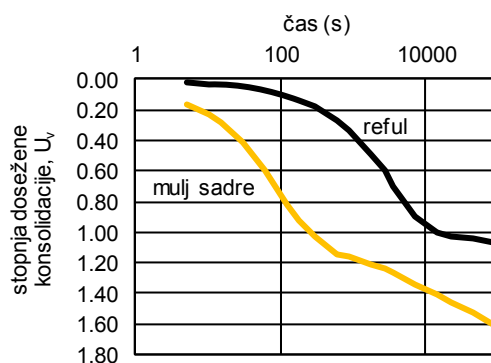
- naravno vlažen reful je prevlažen za učinkovito izboljšanje z vezivi,
- ožet in osušen reful je možno izboljšati z ustreznimi dodatki veziv, vendar so potrebni dodatki veziv visoki,
- pH suspenzije mešanic je odličen kazalnik učinkovitosti veziva. Uporaben je tako za mešanice z dodatkom apna kot tudi za mešanice z dodanimi drugimi vezivi,
- hidravlične in pucolanske lastnosti veziva niso nujno v korelaciji z doseženo tlačno trdnostjo mešanic. Pomembno vlogo ima tudi specifična površina zrn veziva in njegova sposobnost adsorpcije vode. Ker ima MULEX znatno višjo sposobnost adsorpcije vode, so dosežene tlačne trdnosti mešanic z MULEXom višje kot trdnosti mešanic z EF pepelom.
- z mineraloškiimi analizami (XRD, SEM in EDS) smo prepoznali faze, ki nastajajo kot produkt hidratacije veziv, ne pa tudi faz, ki bi nastale kot posledica reakcij med apnom in silikati iz refula,
- količina hidratacijskih produktov s staranjem preizkušancev narašča,
- ne glede na zgoraj podane ugotovitve pa je splošen zaključek ta, da so za izboljšanje refula z vezivi potrebna velika vlaganja v znižanje vlage in razmeroma veliki dodatki veziv, kar sicer ni pravilo pri rabi veziv za stabiliziranje zemljin.

8 MODELIRANJE KONSOLIDACIJSKEGA LEZENJA

8.1 Uvod

Edometrske raziskave so pokazale konsolidacijsko lezenje sadre, ki ga s terenskimi meritvami ne moremo identificirati. Glede na velike višine sadre v akumulaciji, je pravilna napoved posedkov velikega pomena za načrtovanje proizvodnje.

Lezenje refula je v primerjavi z lezenjem sadre majhno in je za bremensko stopnjo 12.5 kPa prikazano na Sliki 8.1. V sedanjem načinu upravljanja z akumulacijami refula, ni zelo pomembno.



Slika 8.1: Konsolidacija refula in mulja sadre pri bremenski stopnji 12.5 kPa (normirane krivulje).

Figure 8.1: Consolidation of dredged marine sediment and red gypsum mud at loading stage 12.5 kPa (normalized lines).

Posedke lahko najpreprosteje izračunamo iz podatkov edometrske krivulje po teoriji za izračun posedkov s ploščino diagrama dodatnih napetosti.

Numerični materialni model, ki ga program Plaxis uporablja za modelne napovedi deformacijskega obnašanja zemljin z izrazitim lezenjem, je Soft Soil Creep (SSC) model.

V tem razdelku bomo za reful in mulj sadre podali potrebne vhodne parametre za numerične izračune posedkov z uporabo SSC modela. Parametre, s katerimi opišemo strižno trdnost, prostorninsko težo in vodoprepustnost, bomo povzeli iz rezultatov laboratorijskih raziskav. Določitev parametrov za opis deformacijskega obnašanja pa je bolj kompleksna in jo bomo v nadaljevanju podrobneje obravnavali. Veljavnost določenih parametrov bomo preverili z modelno analizo in z numeričnim izračunom s SSC modelom v programu Plaxis. Rezultate izračuna bomo primerjali z rezultati laboratorijskih edometrskih testov.

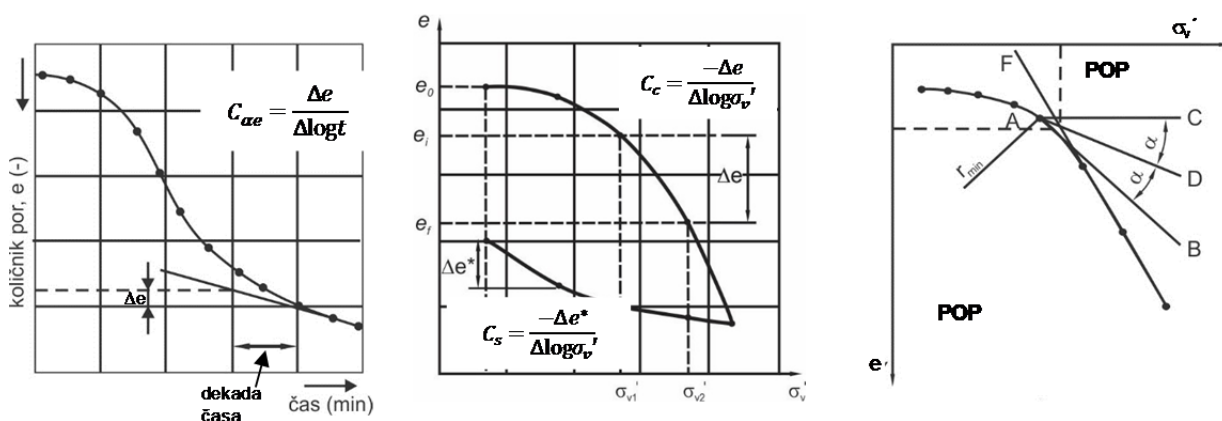
8.2 Metoda določanja materialnih parametrov SSC modela

Za izračune deformacijskega obnašanja s SSC modelom v Plaxisu je potrebno podati naslednje materialne parametre:

- začetni količnik por (angl. *initial void ratio*), e_{init}

- obremenilni indeks (angl. *compression index*), C_c
- razbremenilni indeks (angl. *swelling index*), C_s
- koeficient sekundarne konsolidacije (zaradi lezenja) (angl. *creep index for secondary compression*), $C_{\alpha e}$, izražen s količnikom por
- koeficient prekonsolidacije (angl. *over-consolidation ratio*), OCR ali
- prekonsolidacijski tlak (angl. *pre-overburden pressure*), POP .

Parametre C_c , C_s , $C_{\alpha e}$ in POP smo izvednotili iz edometriških preiskav stisljivosti. Osnovni način vrednotenja je skupaj z enačbami shematsko prikazan na Sliki 8.2.



Slika 8.2: Standardna določitev parametrov C_c , C_s , $C_{\alpha e}$ in POP iz edometriške preiskave

Figure 8.2: Standard determination of parameters C_c , C_s , $C_{\alpha e}$ in POP from oedometer test.

S parametrom $C_{\alpha e}$ opišemo spremembo količnika por (Δe) med sekundarno konsolidacijo, če se čas spremeni za eno dekada (8.1):

$$C_{\alpha e} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (8.1)$$

Parameter C_{α} ki ga običajno vrednotimo za opis sekundarne konsolidacije, pa predstavlja deformacijo ($-\Delta h / h_{\alpha}$) preizkušanca v času ene dekade (8.2):

$$C_{\alpha} = \frac{-\Delta h}{h_{\alpha} \Delta \log t} \quad (8.2)$$

Osne deformacije (ε) lahko za edometriško preiskavo zapišemo kot (8.3):

$$\varepsilon = \frac{-\Delta h}{h_{\alpha}} = \frac{-\Delta e}{1 + e_{\alpha}} \quad (8.3)$$

Iz tega sledi, da je zveza med C_{α} in $C_{\alpha e}$ (8.4):

$$C_{\alpha} = \frac{C_{\alpha e}}{1 + e_{\alpha}} \quad (8.4)$$

kjer je h_α višina preizkušanca na začetku bremenske stopnje in e_α količnik por na začetku bremenske stopnje.

Preiskave mulja sadre so pokazale, da ima lezenje v prejšnji stopnji vpliv na konsolidacijo v naslednji bremenski stopnji. Obnašanje mulja sadre smo, z upoštevanjem vpliva lezenja v predhodnih stopnjah, določili posredno, iz meritev v edometru. Da bi lahko to naredili, smo za vsako bremensko stopnjo ocenili čas konca primarne konsolidacije. Ta je bil jasno določljiv samo pri bremenski stopnji 12.5 kPa do 25 kPa, pri ostalih bremenskih stopnjah pa ne (Slika 8.3). Nato smo linijo sekundarne konsolidacije oz. lezenja za vsako bremensko stopnjo opisali z enačbo (8.5):

$$\Delta e = C_{\alpha e} \cdot \log\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (8.5)$$

kjer je τ_c parameter, za katerega lahko upoštevamo za normalno konsolidirane gline kar čas konca primarne konsolidacije (t_c), za prekonsolidirane gline pa je večji in je odvisen od količnika por po koncu primarne konsolidacije in efektivne napetosti in t' t.i. efektivni čas lezenja (angl. effective creep time), ki ga izračunamo kot (8.6):

$$t' = t - t_c \quad (8.6)$$

Z metodo najboljšega prileganja smo za vsako bremensko stopnjo iz vrednotili par τ_c in $C_{\alpha e}$, s katerima lahko kar najbolje opišemo meritve na območju od ocenjenega konca primarne konsolidacije do konca časa trajanja bremenske stopnje (lezenje) (Slika 8.3, črna linija, model lezenja (τ_c)).

Na Sliki 8.3, levo zgoraj, je prikazano obnašanje normalno konsolidirane sadre (oz. zemljine). Konsolidacijska linija se po končani primarni konsolidaciji nadaljuje v sekundarno konsolidacijo. Meja je jasno vidna, sekundarna konsolidacija pa poteka po logaritemski premici. $C_{\alpha e}$ je določen iz naklona linije sekundarne konsolidacije. Ker sekundarno konsolidacijo vrednotimo šele po končani primarni konsolidaciji, vrednost τ_c v tem primeru lahko nadomestimo z vrednostjo časa konca primarne konsolidacije (t_c), sekundarno konsolidacijo pa računamo od časa t_c naprej.

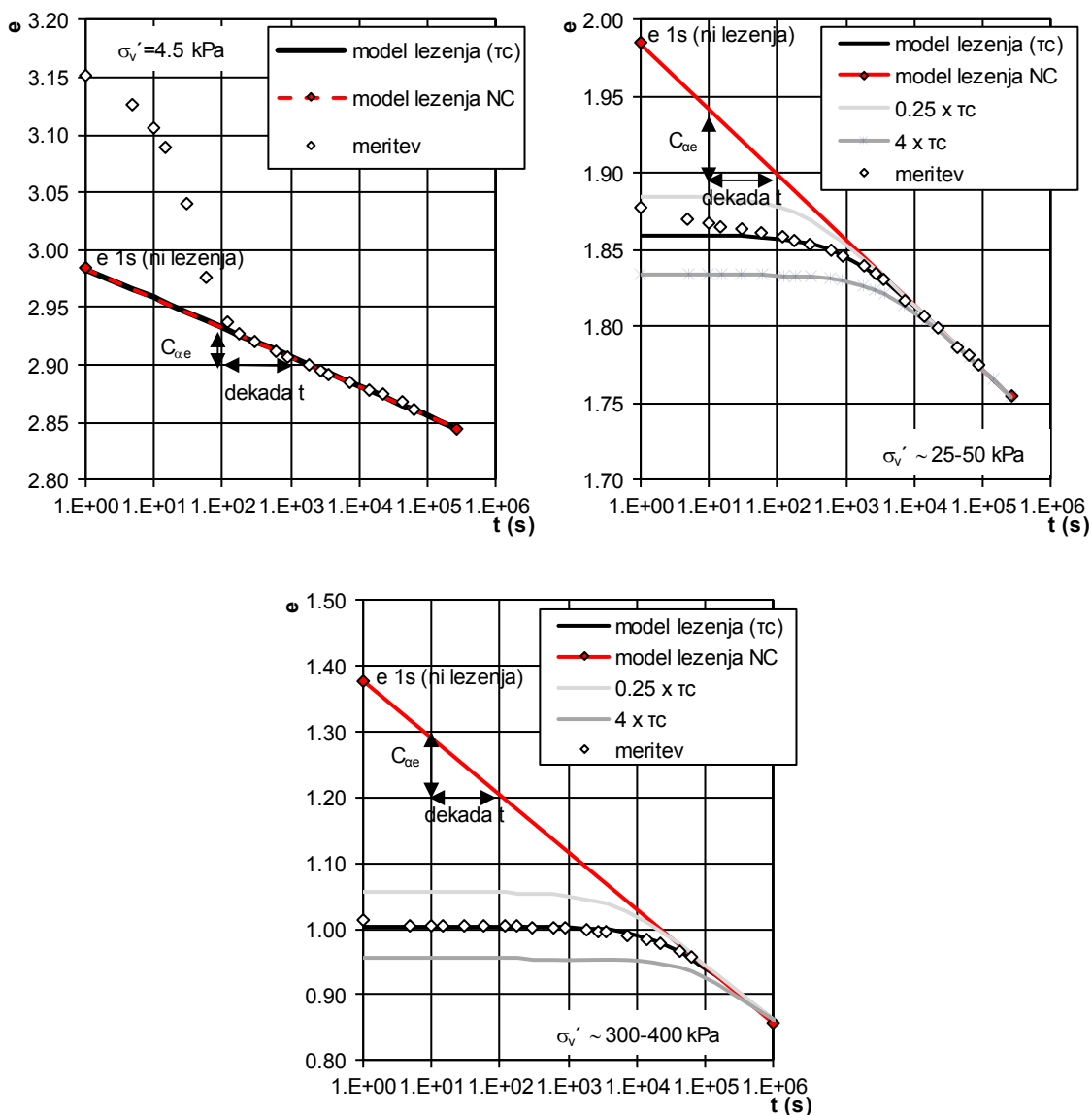
Na Sliki 8.3, desno zgoraj in spodaj je prikazana konsolidacija prekonsolidirane sadre. Primarna konsolidacija je slabo vidna (Slika 8.3, desno zgoraj) oz. sploh ni vidna (Slika 8.3, spodaj).

Iz Slike 8.3, desno zgoraj vidimo, da sekundarna konsolidacija sprva ne sledi logaritemski premici, v daljšem času pa preide v logaritemsko premico. V takšnih bremenskih stopnjah je prekonsolidacija nizka (Slika 8.3, desno zgoraj) in je τ_c majhen glede na čas trajanja celotne bremenske stopnje (npr. na Sliki 8.3 desno zgoraj ca. 900 s). Parameter $C_{\alpha e}$ lahko določimo iz merjenega linearnega dela krivulje lezenja na koncu bremenske stopnje, ne da bi vrednotili τ_c (določitev skladno s standardom).

Za bremenske stopnje, v katerih je sadra izkazovala višjo prekonsolidacijo (Slika 8.3, spodaj), kot posledico daljšega lezenja v predhodni bremenski stopnji, se je τ_c izkazal kot pomemben. V tem primeru merjena krivulja sekundarne konsolidacije, zaradi prekratkega časa trajanja bremenske stopnje v edometru, ni prešla v obliko logaritemske premice, se je pa nakazoval prevoj (Slika 8.3, spodaj, beli diamanti). Parametra $C_{\alpha e}$ nismo uspeli neposredno iz vrednotiti iz meritev, ampak smo ga lahko ocenili samo po metodi najmanjših kvadratov tako, da smo merjene podatke lezenja opisali s krivuljo

najboljšega prilaganja (Slika 8.3, spodaj, črna linija model lezenja τ_c). Za začetni približek smo uporabili parametre predhodne bremenske stopnje. Parameter τ_c v tem primeru podaljšuje čas do prevoja krivulje konsolidacije v linearni del in je približno enak času trajanja bremenske stopnje (ca. 23000 s). Za močno prekonsolidirano sadro bi bil parameter τ_c bistveno večji od časa trajanja običajne bremenske stopnje (86400 s). V tem primeru bi bila linija konsolidacije praktično ravna črta (brez prevoja). Metoda določanja parametra C_{ae} , ki smo jo uporabili za mulj sadre, zato za močno prekonsolidirano sadro ni primerna.

Obnašanje, ki je prikazano na Sliki 8.3 spodaj, so izkazovali preizkušanci mulja sadre v edometru, če si bremenske stopnje niso sledile v enakem časovnem zaporedju in v primeru, da je bila naslednja bremenska stopnja manjša od dvakratnika predhodne. Z daljšim časom merjenja posamezne bremenske stopnje, bi tudi linija konsolidacije teh preizkušancev prešla v logaritemsko premico.



Slika 8.3: Določanje parametrov C_{ae} in τ_c za normalno konsolidirano (zgoraj levo) in prekonsolidirano sadro (zgoraj desno in spodaj).

Figure 8.3: Determination of parameters $C_{\alpha e}$ and τ_c for normally consolidated (upper left) and overconsolidated red gypsum (upper right and lower).

Vidimo, da pri bremenskih stopnjah, ki trajajo dovolj dolgo, da linija sekundarne konsolidacije preide v logaritemsko premico, uporaba opisane metode določanja $C_{\alpha e}$ in τ_c ni potrebna, saj lahko $C_{\alpha e}$ enostavno določimo iz naklona logaritemske premice. Za mulj sadre se je izkazala kot nujna, saj smo le tako lahko opisali konsolidacijsko obnašanje (lezenje) bremenskih stopenj v edometru, ki so trajale prekratek čas in se je prevoj v logaritemsko premico le nakazoval.

Program Plaxis privzema, da so vse edometriške krivulje iz vrednotene za čas trajanja 1 dan. Izbrani čas je posledica poteka laboratorijske edometriške preiskave, pri kateri bremenska stopnja načeloma traja 1 dan in zajema tudi del sekundarne konsolidacije. Plaxis zato v času t_c ne zajame samo faze primarne konsolidacije (kar se v izračunih kaže kot OCR 1 po enem dnevu). Zaradi predpostavke časa t_c (24 ur), ki vključuje tudi del sekundarne konsolidacije, lahko edometriške preiskave vrednotimo skladno s standardom. Predpostavka 24 ur temelji na dejstvu, da je v naravi čas trajanja primarne konsolidacije normalno konsolidiranih mehkih glin običajno daljši od enega dneva.

V naših analizah smo za vrednotenje edometriških preiskav stisljivosti, poleg časa 24 ur, izbrali tudi čas 1 s. Na ta način smo v absolutnem času 1s, izračunali krivuljo stisljivosti za primer mulja sadre brez lezenja po koncu primarne konsolidacije (Slika 8.3, e_{1s}). Čas 1 sekunda smo izbrali zato, ker pri sadri ne znamo jasno ločiti primarne in sekundarne konsolidacije. Predpostavili smo, da smo v času 1 s zanesljivo v fazi primarne konsolidacije.

Iz enačbe (8.5) smo lahko za vsako bremensko stopnjo posredno določili količnik por za izbrani čas 1 sekunda (e_{1s}). To je količnik por, ki bi ga imel material v času 1 s po obremenitvi, v primeru da bi bila primarna faza konsolidacije končana in na obnašanje v naslednji fazi, predhodna ne bi imela vpliva (normalno konsolidiran material). Privzeli smo, da na količnik por e_{1s} , sekundarna konsolidacija nima vpliva. Kasneje, ko smo izvajali računske analize v Plaxisu, smo ugotovili, da ta korak (e_{1s}) dejansko ne bi bil potreben. Preiskave bi lahko iz vrednotili za čas 24 ur, kar smo za materialne parametre v Plaxisu tudi storili.

Ko smo izločili vpliv lezenja na obnašanje materiala, smo iz krivulje stisljivosti (soodvisnost $e_{1s} - \sigma_v$) (Slika 8.8, 8.9 in 8.10, rdeči simboli), določili:

- parameter C_c ; iz linearnega dela obremenilne krivulje,
- parameter C_s ; iz linearnega dela razbremenilne krivulje in
- POP iz začetnega obremenilnega dela.

Za čas trajanja bremenske stopnje 24 ur smo primerjali merjeno krivuljo stisljivosti (z upoštevanim lezenjem) in računsko določeno za normalno konsolidirane zemljine.

8.3 Materialni parametri SSC modela

8.3.1 *Reful*

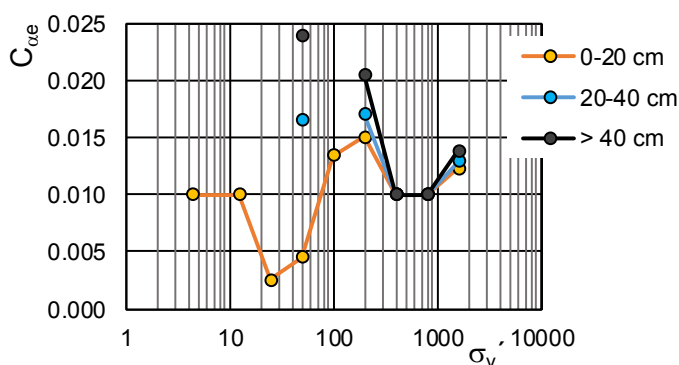
Materialne parametre za opis deformacijskega obnašanja refula smo določili za tri različne globine in so podani v Preglednici 8.1 in na Sliki 8.4. Vrednost parametra POP je za vzorce pod suho skorjo informativne narave (Preglednica 8.1, ležeče zapisane vrednosti). Natančno tako nizkih vrednosti ne moremo določiti, saj so nižje od merske natančnosti naprave.

Preglednica 8.1: Materialni parametri za opis deformacijskega obnašanja refula.

Table 8.1: Material parameters for the description of consolidation characteristics of dredged marine sediment.

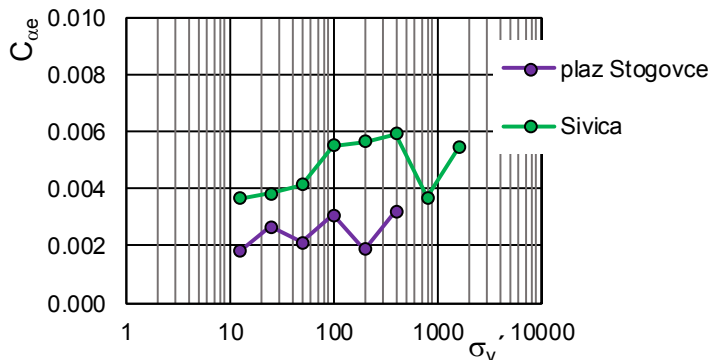
Vzorec, globina	Začetna vlaga	Začetna suha gostota	Materialni parameter			
	w_i (%)	ρ_d (t/m ³)	C_c	C_s	$C_{\alpha e}$	POP (kPa)
reful, 0-20 cm	43.1	1.25	0.35	0.06	0.02	55
reful, 20-40 cm	60.9	1.03	0.42	0.07	0.018	ca. 5
reful, >40 cm	87.8	0.807	0.52	0.08	0.02	ca. 1

Razlike v $C_{\alpha e}$ za reful, ki se kažejo za različne bremenske stopnje, so posledica natančnosti meritev in določanja parametra. Podobno kot za reful, je parameter $C_{\alpha e}$ tudi za druge zemljine neodvisen od bremenske stopnje konsolidacije (Slika 8.5), zato v izračunih običajno privzamemo kar konstantno vrednost.



Slika 8.4: Parameter $C_{\alpha e}$ v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za reful.

Figure 8.4: Parameter $C_{\alpha e}$ versus effective vertical stress for dredged marine sediment.



Slika 8.5: Parameter $C_{\alpha e}$ v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za plazino na plazu Stogovce in sivico.

Figure 8.5: Parameter $C_{\alpha e}$ versus effective vertical stress for the material from landslide Stogovce and for sivica.

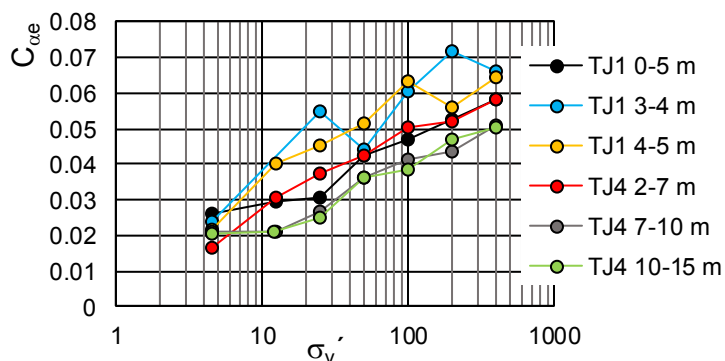
8.3.2 Mulj sadre

Materialne parametre za opis deformacijskega obnašanja mulja sadre smo iz vrednotili za mulj iz ojezeritve in primerjalno za nekaj preizkušancev mulja pod suhim nasipom (Preglednica 8.2). Parameter C_{ae} je grafično prikazan, za vse bremenske stopnje posameznega preizkušanca, na Sliki 8.6 za mulj iz ojezeritve in na Sliki 8.7 za mulj pod suhim nasipom.

Preglednica 8.2: Materialni parametri za opis deformacijskega obnašanja mulja sadre iz ojezeritve (TJ1 in TJ4) in mulja sadre pod suhim nasipom (IN-1/15).

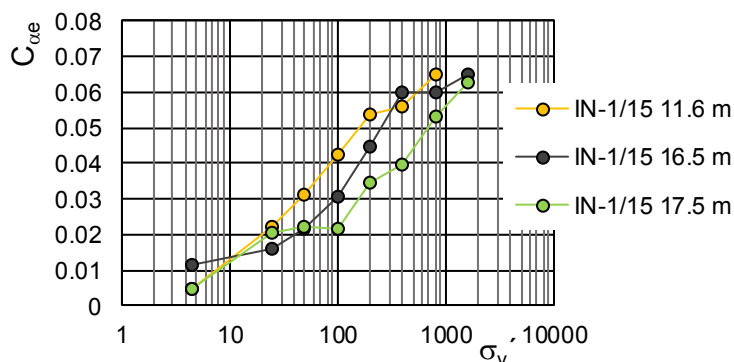
Table 8.2: Material parameters for the description of deformational characteristics of red gypsum mud from the accumulation (TJ1 in TJ4) and under the dry embankment (IN-1/15).

Vrtina, globina	Začetna vlaga	Začetna suha gostota	Materialni parameter		
	w_i (%)	ρ_d (t/m ³)	C_c	C_s	POP (kPa)
TJ1 0-5 m	96.7	0.728	0.28	0.005	2.0
TJ1 3-4 m	125	0.625	0.45	0.011	9.7
TJ1 4-5 m	123	0.627	0.46	0.015	7.1
TJ4 2-7 m	98.8	0.732	0.37	0.005	7.7
TJ4 7-10 m	85.8	0.799	0.29	0.007	10
TJ4 10-15 m	82.6	0.804	0.28	0.005	4.0
IN-1/15, 11.6 m	106	0.690	0.73	0.008	45
IN-1/15, 16.5 m	112	0.656	0.85	0.010	98.6
IN-1/15, 17.5 m	49.4	1.08	0.26	0.002	182



Slika 8.6: Parameter C_{ae} v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za mulj sadre iz ojezeritve.

Figure 8.6: Parameter C_{ae} versus effective vertical stress for red gypsum mud from accumulation.



Slika 8.7: Parameter C_{ae} v odvisnosti od efektivne vertikalne napetosti za mulj sadre pod suhim nasipom.

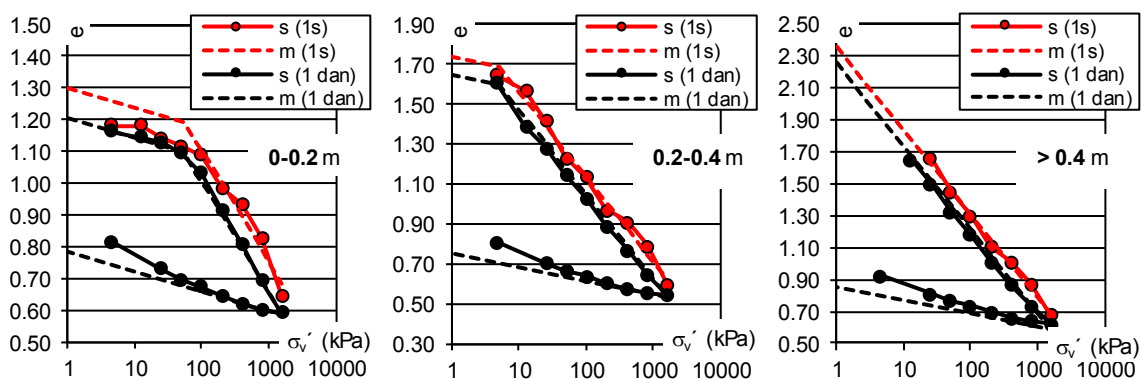
Figure 8.7: Parameter $C_{\alpha e}$, versus effective vertical stress for red gypsum mud under the dry embankment.

S Slik 8.6 in 8.7 vidimo, da lezenje na območju efektivnih vertikalnih napetosti, pri katerih smo izvajali edometriške preiskave, z višanjem efektivne vertikalne napetosti narašča. Obnašanja mulja sadre pri bremenskih stopnjah višjih od ca. 800 kPa ne znamo napovedati.

8.4 Primerjava modela in meritev

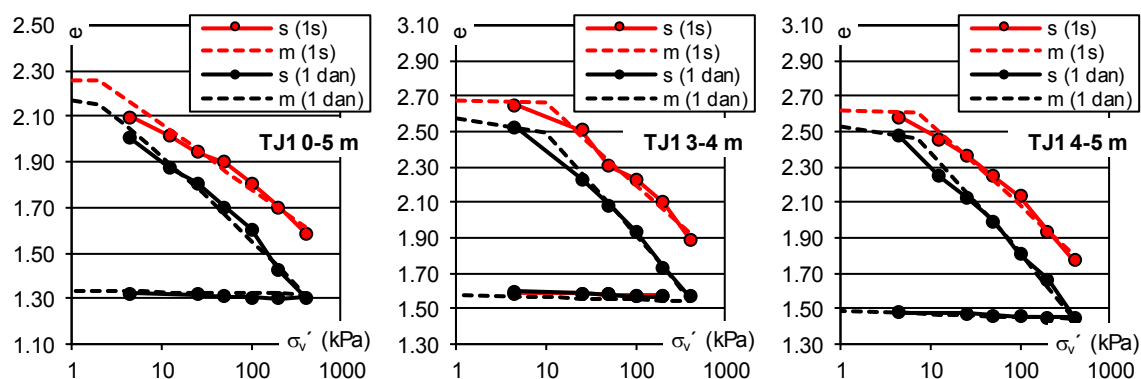
Iz materialnih parametrov za opis krivulje stisljivosti s SSC modelom (poglavje 8.3) smo z upoštevanjem hipne primarne konsolidacije, za vse bremenske stopnje izračunali količnik por za čas trajanja bremenske stopnje 1 s in 24 ur (Slike 8.8 do 8.10 – črtkane linije). Koeficient $C_{\alpha e}$ smo za reful upoštevali enoten, ne glede na bremensko stopnjo. Za mulj sadre pa smo ugotovili, da $C_{\alpha e}$ z večanjem efektivne vertikalne napetosti narašča (Slika 8.6 in 8.7). Izračunane vrednosti $C_{\alpha e}$ smo opisali s potenčno trendno črto, ki smo jo upoštevali v modelnih izračunih. Modelno napoved smo za čas 1 s primerjali z e_{1s} , določenim iz najboljšega prileganja krivulji lezenja, za čas 24 ur pa z merjeno vrednostjo v edometru.

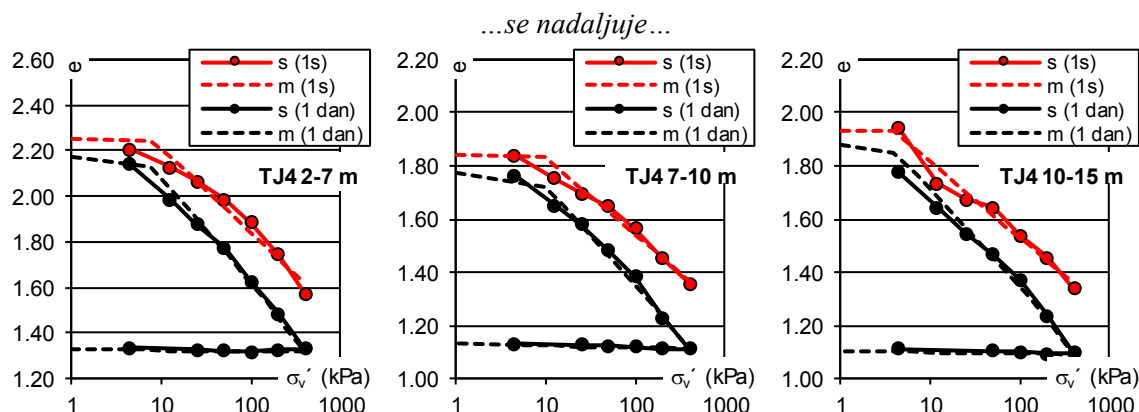
Ujemanje rezultatov modela in rezultatov, izvedenih iz edometra, je za reful prikazano na Sliki 8.8, za mulj sadre iz ojezeritve na Sliki 8.9 in za mulj sadre pod suhim nasipom na Sliki 8.10. Na Slikah 8.8 do 8.10 so rezultati modela v legendah označeni z m (1 s) in m (1 dan).



Slika 8.8: Ujemanje krivulj stisljivosti refula. Modelni izračun (m) in rezultati edometra (s).

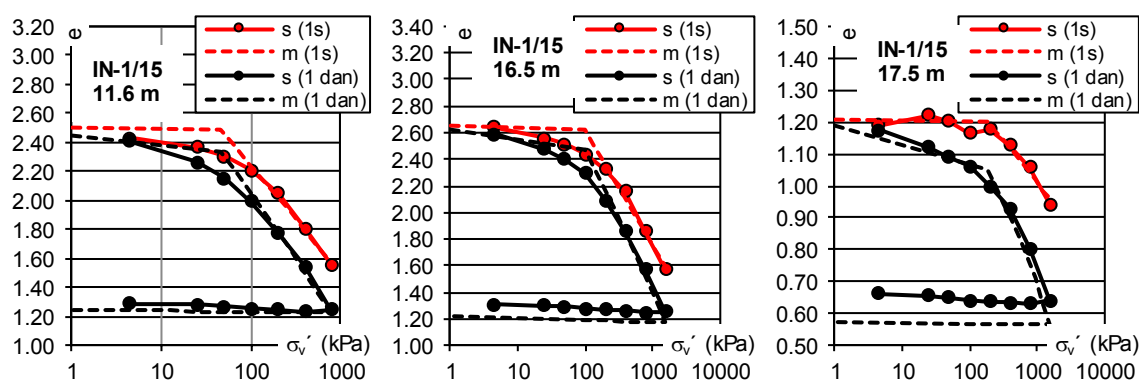
Figure 8.8: Comparison of compression curves of dredged marine sediment. Calculated values (m) and measured in oedometer (s).





Slika 8.9: Ujemanje krivulj stisljivosti mulja sadre iz akumulacije. Modelni izračun (m) in rezultati edometra (s).

Figure 8.9: Comparison of compression curves of red gypsum mud from accumulation. Calculated values (m) and measured in oedometer (s).



Slika 8.10: Ujemanje krivulj stisljivosti mulja sadre pod suhim nasipom. Modelni izračun (m) in rezultati edometra (s).

Figure 8.10: Comparison of compression curves of red gypsum mud under dry embankment. Calculated values (m) and measured in oedometer (s).

Iz rezultatov, prikazanih na Slikah 8.8 do 8.10, vidimo, da je generalno gledano ujemanje merjenega količnika por po 1 dnevu, ocenjenega po času 1 sekunde (e_{1s}) in modelne napovedi za oba časa, dobro. Nekoliko večje razlike med rezultati modelnih izračunov in vrednotenjem iz edometra se kažejo na mulju sadre pod suhim nasipom (IN-1/15), na globini 17.5 m. Z modelom za čas 1 dan precenimo končni količnik por. Razlike so odraz natančnosti določitve koeficienta sekundarnega stiskanja zaradi lezenja.

V refulu sta krivulji stisljivosti za čas 1s in 24 ur (Slika 8.8) vzporedni. To je posledica upoštevanja enotnega koeficienta C_{ae} . Za mulj sadre krivulji stisljivosti za oba časa nista vzporedni, kar je posledica večanja C_{ae} z bremenskimi stopnjami (Slika 8.9 in 8.10). Kaže se, da je upoštevanje višanja C_{ae} z bremenskimi stopnjami, za mulj sadre, verjetno potrebno. V nadaljevanju bomo v izračunih s SSC modelom v Plaxisu to poskušali ovrednotiti.

S Slik 8.8 do 8.10 vidimo tudi, da je razmik med krivuljama stisljivosti za čas 1 s in 24 ur v refulu manjši kot v mulju sadre. To kaže, da ima reful bistveno manjšo sekundarno konsolidacijo (lezenje) kot mulj sadre.

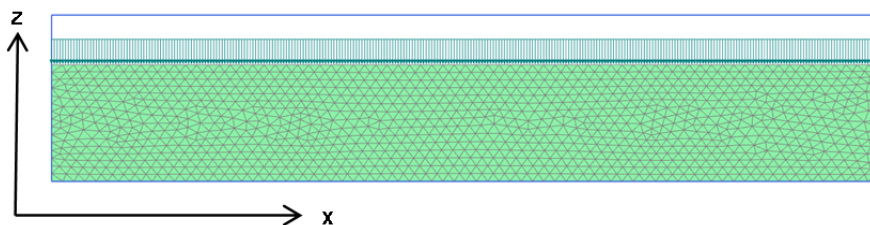
8.5 Kontrolni izračuni s SSC modelom v programu Plaxis

Ustreznost materialnih parametrov, določenih iz preiskav stisljivosti, smo preverili v programu Plaxis s SSC modelom. Na refulu smo izvedli dva kontrolna izračuna: za globino 0-0.2 m in 0.2-0.4 m. Za mulj sadre smo izvedli tri kontrolne izračune: (1) za primer klasičnega edometra z obremenjevanjem v časovnem intervalu 24 ur, (2) za primer klasičnega edometra z daljšim lezenjem pri eni bremenski stopnji in (3) za višji preizkušanelec (Rowe edometer). Izračunane linije konsolidacije, smo primerjali z izmerjenimi v laboratoriju.

8.5.1 Geometrija modela in robni pogoji – Plaxis

Izračune smo izvedli na modelu edometra, pri čemer smo upoštevali osno simetrijo preizkušanca (Slika 8.11). Robni pogoji, privzeti v vseh izračunih, so bili sledeči:

- Zgornji rob – prost, preplavljeno stanje
- Spodnji rob – preprečen tok, preprečeni pomiki v smeri x in z
- Levi rob – preprečen tok, preprečeni pomiki v smeri x
- Desni rob – preprečen tok, preprečeni pomiki v smeri x.



Slika 8.11: Geometrija modela v programu Plaxis.

Figure 8.11: Model geometry in Plaxis.

8.5.2 Reful

Na refulu smo izvedli dva kontrolna izračuna, za globino 0-0.2 m in 0.2-0.4 m. Ne glede na globino smo v izračunih upoštevali iste materialne parametre za prostorninsko težo, togost in trdnost (Preglednica 8.3). V izračunih smo, kljub temu, da je v direktnem strigu izmerjena kohezija približno 6 kPa, upoštevali vrednost 0.1 kN/m^2 . SSC model v izračunu stisljivosti k efektivni napetosti doda kohezijo pomnoženo s tangensom strižnega kota. Pri nizkih napetostih je material zaradi tega bolj tog, kar se odraža kot navidezna prekonsolidacija materiala v SSC modelu.

V materialnih parametrih C_c , C_s in C_{ae} za globino 0-0.2 m in 0.2-0.4 m ni bilo velikega odstopanja (Preglednica 8.1), zato smo v izračunih privzeli enake parametre za obe globini (Preglednica 8.3). Parameter POP pa smo upoštevali za vsako globino, skladno z modelno napovedjo.

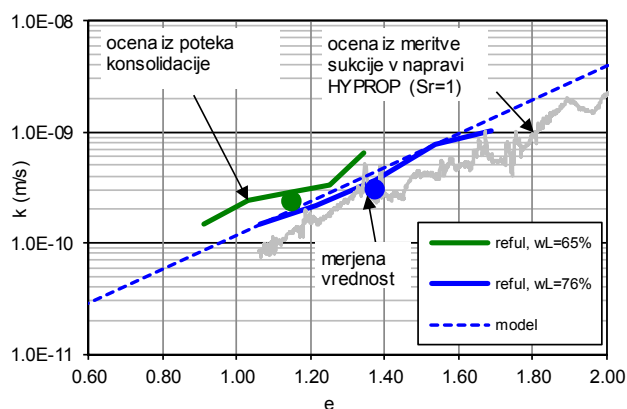
V izračunih smo upoštevali odvisnost koeficienta vodoprepustnosti od količnika por (Slika 8.12), skladno z rezultati meritev v laboratoriju.

Čas trajanja posamezne bremenske stopnje v izračunih je bil približno enak dejanskemu času trajanja posamezne bremenske stopnje v edometru. Analizirali smo samo obremenilni del edometriške preiskave.

Preglednica 8.3: Materialni parametri refula za izračun s SSC modelom v Plaxisu.

Table 8.3: Material parameters of dredged marine sediment, used in SSC model (Plaxis).

Globina	Materialni parametri SSC modela										
	γ_{sat} kN/m ³	e_0	C_c	C_s	C_{ae}	c_{ref} kN/m ²	φ °	ψ °	POP kN/m ²	$k_x, k_y (e_0)$ m/dan	c_k
0-0.2 m	15.5	2.00	0.42	0.07	0.02	0.1	25	0	55	0.346E-3	0.650
0.2-0.4									ca. 5		



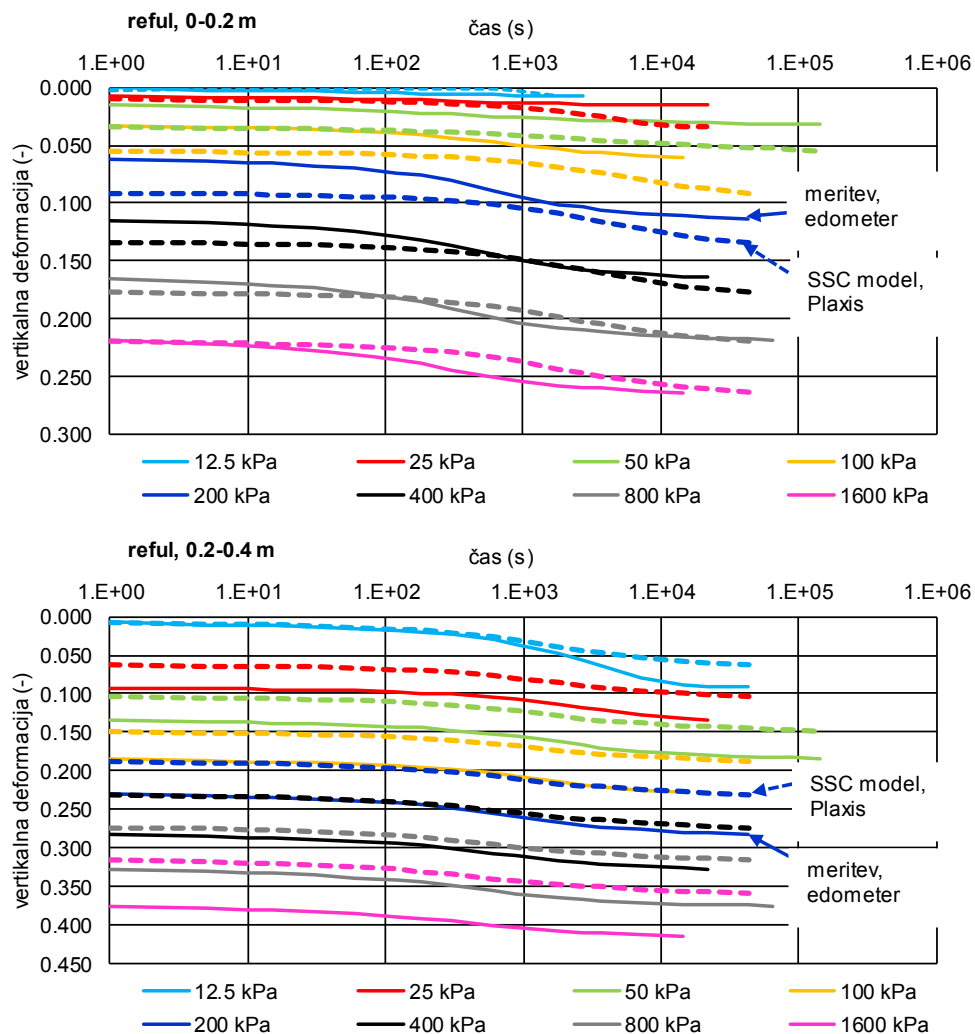
Slika 8.12: Določitev parametra vodoprepustnosti refula iz merjenih vrednosti.

Figure 8.12: Determination of parameter of hydraulic conductivity for dredged marine sediment from measured values.

Izračunane linije poteka deformacij so, za posamezne bremenske stopnje, prikazane na Sliki 8.13 (črtkane linije). Polne linije na Sliki 8.13 prikazujejo potek deformacij, iz vrednoten iz edometriških preiskav. Vidimo, da se za reful iz globine 0-0.2 m v Plaxisu izračunane deformacije in tiste iz vrednotene iz edometra, v bremenskih stopnjah višjih od 400 kPa zelo dobro ujamejo. Izračunana končna deformacija (pri 1600 kPa) je enaka merjeni. Pri nižjih bremenskih stopnjah so odstopanja posledica idealizacije modela in prekratkega časa trajanja meritev (prva in druga bremenska stopnja; 4.5 kPa in 12.5 kPa). Vidimo tudi, da smo upoštevali prenizko vodoprepustnost.

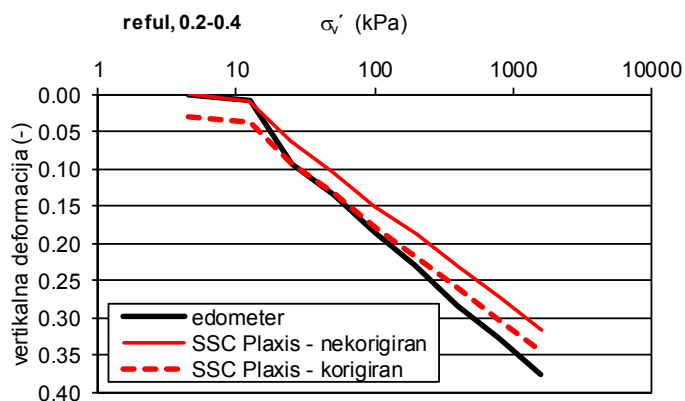
Za reful na globini 0.2-0.4 m z izračunom podcenimo deformacije. Za boljše ujemanje bi bilo potrebno nekoliko zmanjšati parameter POP , za katerega smo že v poglavju 8.3.1 zapisali, da ga ne moremo

natančno določiti. Če izračunane vrednosti korigiramo tako, da izločimo vpliv bremenskih stopenj 4.5 kPa in 12.5 kPa, ki sta v območju POP, se izračunane krivulje stisljivosti v soodvisnosti efektivna vertikalna napetost – deformacija, bolje prilegajo merjenim (Slika 8.14).



Slika 8.13: Časovni razvoj deformacij v zaporednih bremenskih stopnjah za reful iz globine 0-0.2 m (zgoraj) in iz globine 0.2-0.4 m (spodaj). Polne linije – meritve v edometeru, črtkane linije – izračun v Plaxisu.

Figure 8.13: Vertical strain versus time at sequential loading stages for dredged marine sediment; upper depth 0-0.2 m, lower 0.2-0.4 m. Solid lines – measured values in oedometer, dashed lines – calculated in Plaxis.



Slika 8.14: Izračunana (rdeča polna črta), korigirana izračunana (rdeča črtkana črta) in merjena (črna črta) krivulja stisljivosti refula na globini 0.2-0.4 m.

Figure 8.14: Calculated (red solid line), corrected calculated (red dot line) and measured (black line) compression curves of dredged marine sediment at the depth of about 0.2-0.4 m.

8.5.3 Mulj sadre

Za mulj sadre smo izvedli 3 kontrolne izračune:

- edometer – stisljivost, čas posamezne bremenske stopnje ca. 1 dan,
- edometer – daljše lezenje pri bremenski stopnji 400 kPa in
- Rowe edometer – stisljivost, večja dimenzija preizkušanca.

Vsak kontrolni izračun smo ponovili dvakrat, pri čemer smo spreminjali parameter C_{ae} .

Materialni parametri mulja sadre, upoštevani v izračunih, so podani v Preglednici 8.4. Koeficient sekundarnega stiskanja zaradi lezenja (C_{ae}) smo upoštevali na dva načina: (1) eno vrednost v celotnem izračunu, kot je običajno v geotehničnih izračunih in (2) v vsaki bremenski stopnji smo predpisali drugačno vrednost C_{ae} . Parameter C_{ae} smo za izbrano efektivno vertikalno napetost določili iz potenčne trendne črte k rezultatom, podanim na Sliki 8.6 (Preglednica 8.5). S tem smo želeli izničiti vpliv slučajnih napak pri določitvi C_{ae} .

V vseh primerih smo upoštevali edometer na mulju sadre iz ojezeritve - TJ-4 2-7 m in referenčni čas 1 dan. Čas trajanja posamezne bremenske stopnje smo ustrezno prilagodili dejanskemu poteku edometriške preiskave. Za večji Rowe edometer smo sorazmerno povečali tudi dimenzijo modela. Podobno kot pri refulu, smo tudi za mulj sadre upoštevali kohezijo 0.1 kN/m^2 in vpliv količnika por na vodoprepustnost (Slika 8.15).

Preglednica 8.4: Materialni parametri mulja sadre za izračun s SSC modelom v Plaxisu.

Table 8.4: Material parameters of red gypsum mud used in SSC model (Plaxis).

Globina	Materialni parametri SSC modela										
	γ_{sat}	e_0	C_c	C_s	C_{ae}^*	c_{ref}	φ	ψ	POP	$k_x, k_y (e_0)$	c_k
	kN/m^3	/	/	/	/	kN/m^2	°	°	kN/m^2	m/dan	/

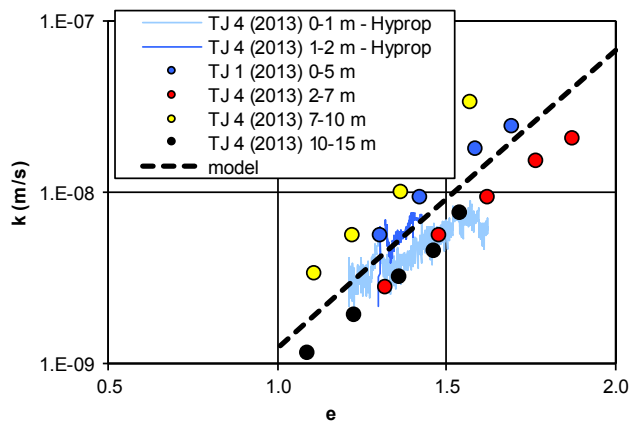
2-7 m	14.0	2.22	0.365	5.4E-3	0.039	0.1	36	0	2	0.0212	0.576
-------	------	------	-------	--------	-------	-----	----	---	---	--------	-------

* za primer izračuna z enotno vrednostjo.

Preglednica 8.5: Parameter $C_{\alpha e}$, upoštevan v izračunu za posamezne bremenske stopnje.

Table 8.5: Parameter $C_{\alpha e}$ for each loading stage (used in calculations).

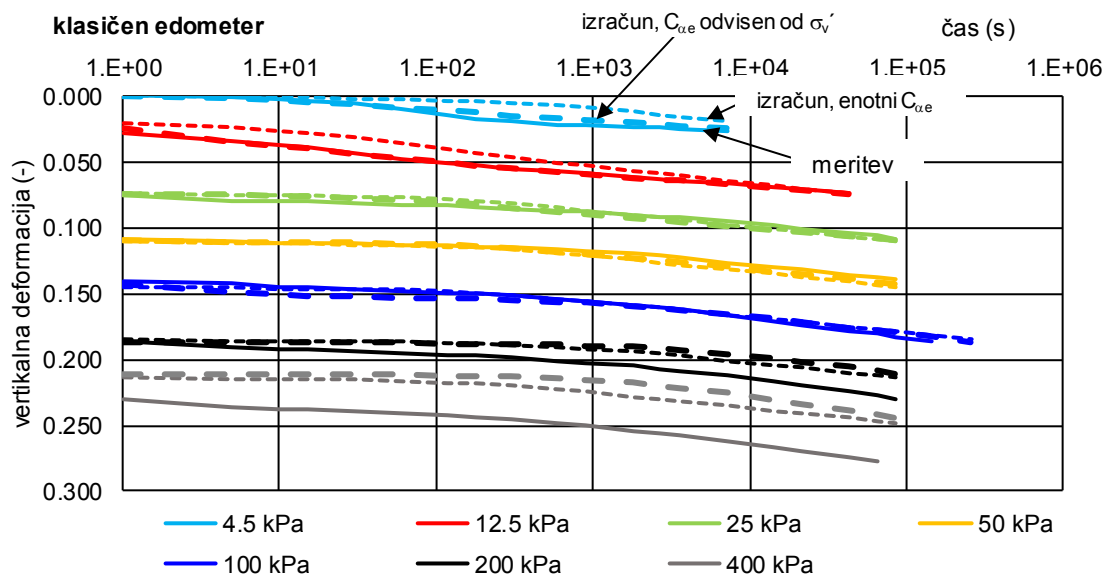
σ_v' (kPa)	$C_{\alpha e}$ /
4.5	0.022
12.5	0.027
25	0.032
50	0.038
100	0.045
200	0.053
400	0.062



Slika 8.15: Določitev parametra vodoprepustnosti mulja sadre, iz merjenih vrednosti.

Figure 8.15: Determination of parameter of hydraulic conductivity for red gypsum mud from measured values.

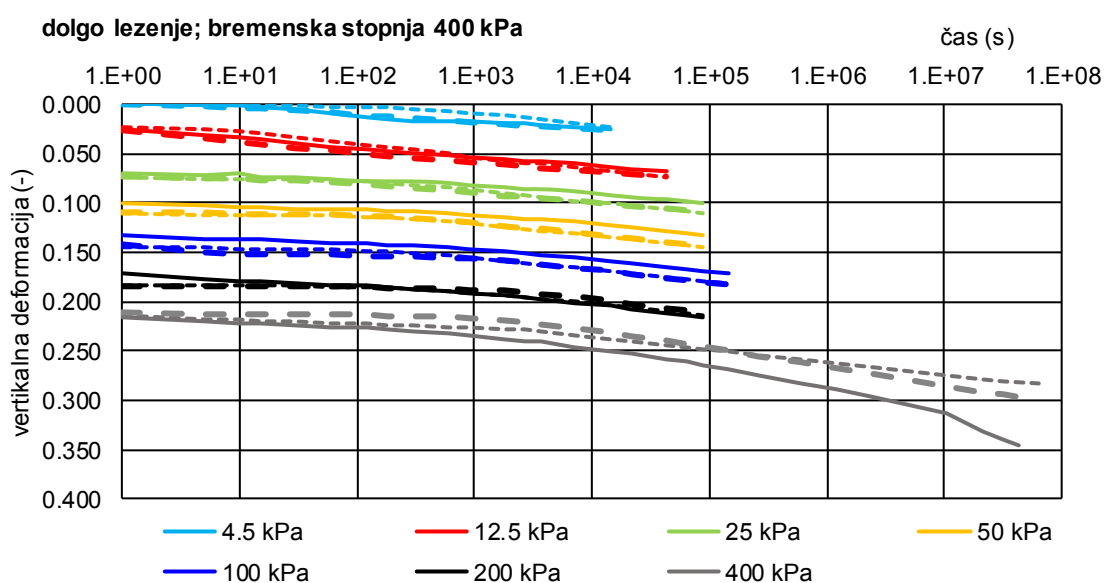
Rezultati izračunov so primerjalno z rezultati meritev v edometru podani na Slikah 8.16 do 8.18. Polne linije na slikah prikazujejo rezultate laboratorijskih meritev, linije s krajšimi črticami rezultate izračunov z upoštevanim enotnim parametrom $C_{\alpha e}$ in linije z daljšimi črticami rezultate izračunov z upoštevanim parametrom $C_{\alpha e}$ po Preglednici 8.5.



Slika 8.16: Mulj sadre - primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za klasičen potek edometriške preiskave.

Figure 8.16: Red gypsum mud - comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for standard oedometer test.

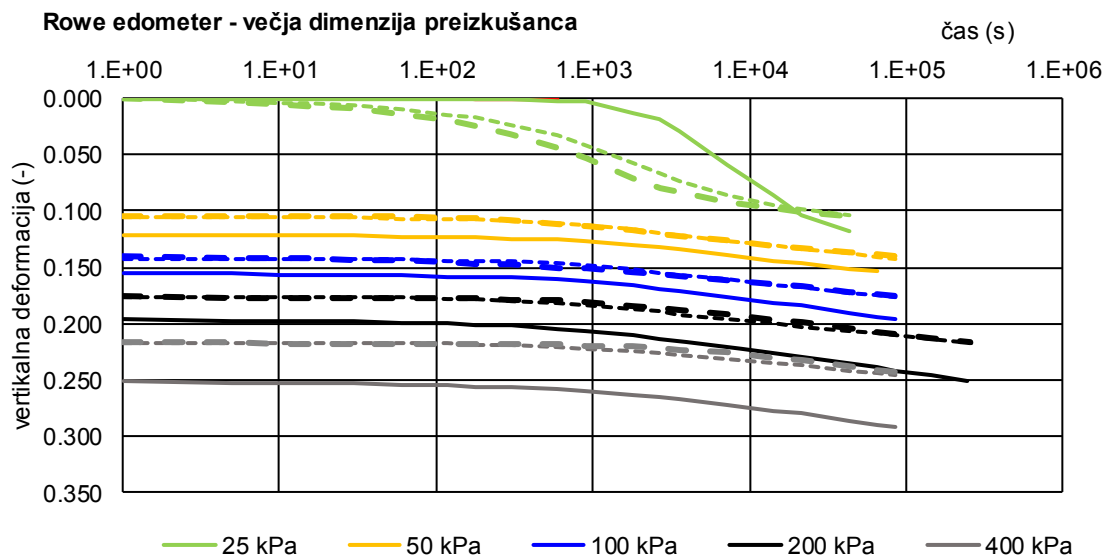
Generalno gledano so materialni parametri mulja sadre, določeni v tej nalogi ustrezni, saj je ujemanje izračunanih linij in merjenih v edometru relativno dobro. Vidimo, da za klasičen potek edometra in za bremensko stopnjo 400 kPa, pri kateri so opazovanja trajala skoraj 1 leto, z izračuni nekoliko podcenimo končno deformacijo (Slika 8.16 in 8.17). Za boljše ujemanje bi morali, pri višjih napetostih, verjetno nekoliko povečati parametra $C_{\alpha e}$ in C_c . Skoka, ki smo ga pri bremenski stopnji 400 kPa izmerili v času približno $1 \cdot 10^7$ s, tudi s spremembo parametrov ne bi mogli računsko opisati. Tudi skozi dogajanje med dejansko meritvijo ga ne znamo pojasniti.



Slika 8.17: Mulj sadre - primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za leženje pri bremenski stopnji 400 kPa.

Figure 8.17: Red gypsum mud - comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for creep during long loading stage 400 kPa.

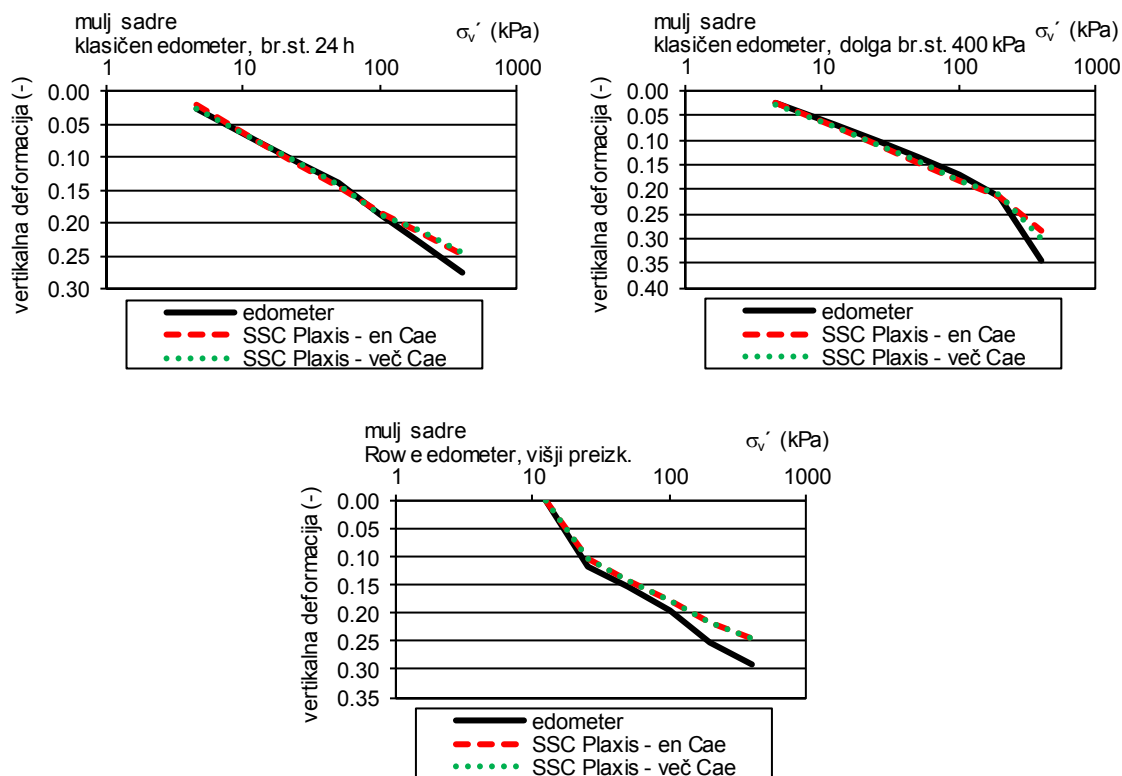
Pri izračunu velikega Rowe edometra je odstopanje izračunanih in merjenih deformacij nekoliko večje in se pojavi že v prvi bremenski stopnji konsolidacije (12.5 kPa) (Slika 8.18). Za boljše ujemanje računskih in merjenih vrednosti, bi morali, podobno kot v ostalih dveh primerih, pri višjih napetostih povečati parametra $C_{\alpha e}$ in C_c . Dodatno pa bi morali nekoliko zmanjšati tudi POP.



Slika 8.18: Mulj sadre - primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za preizkušane večjih dimenzij (Rowe edometer).

Figure 8.18: Red gypsum mud - comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for larger specimens (Rowe oedometer).

Primerjava merjenih in izračunanih krivulj stisljivosti mulja sadre je za vse računske primere, za obremenilni del, prikazana na Sliki 8.19. Vidimo, da v vseh primerih z izračunom nekoliko podcenimo merjeno deformacijo.



Slika 8.19: Primerjava merjenih in izračunanih krivulj stisljivosti mulja sadre.

Figure 8.19: Comparison of measured (solid lines) and calculated (dashed lines) compression curves of red gypsum mud.

8.6 Zaključek

Iz rezultatov laboratorijskih preiskav smo določili materialne parametre SSC modela za reful in mulj sadre. Posebno pozornost smo namenili parametrom za opis deformacijskega obnašanja, ki smo jih določili iz rezultatov edometriških preiskav stisljivosti. Pri določitvi koeficienta sekundarnega stiskanja smo si, pri bremenskih stopnjah v katerih linija konsolidacije ni prešla v logaritemsko premico, se je pa prevoj nakazoval, pomagali z modelnim opisom obnašanja na tem območju.

Ugotovili smo, da je ujemanje merjenih in računsko določenih krivulj stisljivosti dobro. Rezultati izračunov s SSC modelom v Plaxisu se ujemajo z merjenimi krivuljami časovnega poteka deformacij. Pokazali smo, da izračunane krivulje deformacijskega obnašanja, predvsem pri nižjih bremenskih stopnjah, bolje sledijo merjenim, če v izračunih za vsako bremensko stopnjo upoštevamo dejanski, iz edometriških preiskav izvrednoten parameter C_{ae} in ne enotnega za celotno preiskavo, kot je to običajno v geotehničnih izračunih.

Zaključimo lahko, da smo materialne parametre refula in mulja sadre za SSC model v programu Plaxis ustrezno določili. Materialni parametri mulja sadre bodo lahko uporabljeni v izračunih napovedi posredkov z upoštevanjem dejanske geometrije odlagališč Za Travnikom in Bukovžlak.

Ugotovili smo, da je v izračunih s SSC modelom v programu Plaxis:

- potrebno zanemariti kohezijo materiala

- POP minimalno 1 kPa. To pomeni, da v zgornjih, rahlih slojih sedimentov podcenimo konsolidacijske posedke.

9 MODELIRANJE SUŠENJA

9.1 Uvod

Površina refula v akumulacijah je potem, ko voda odteče, izpostavljena zunanjim vplivom, ki v poletnih mesecih in obdobjih brez padavin povzročajo sušenje, nastajanje suhe skorje, formiranje krčitvenih razpok in kopičenje soli v skorji, med padavinskimi dogodki pa vlaženje, polnjenje razpok z vodo in raztapljanje ter spiranje soli. Zaradi visoke vsebnosti soli je v suhi skorji na površini osmotska sukcija visoka. Osmotska sukcija ovira sušenje zemljine in vpliva na hitrost prodiranja sušenja v globino.

Mulj sadre je zaradi okoljskih zahtev odredbodajalcev ves čas pod vodnim pokrovom. Osmotska sukcija v zasičenem mulju sadre je nižja kot v zasičenem refulu (poglavje 5.6), zato je njen vpliv na hitrost sušenja manjši. Da bi ovrednotili pomen osmotske sukcije v refulu in mulju sadre, smo vpliv prisotnosti soli na hitrost sušenja preverili s preprostim laboratorijskim poskusom na referenčnih materialih.

Sušenje muljev smo poskušali opisati z modelom za opis gibanja vode v zemljini s sukcijo, ki ga je za opis obnašanja plazine na plazu Slano blato razvil Maček (2012).

Vhodne podatke za modelne izračune smo za oba sedimenta določili iz laboratorijskih preiskav meje krčenja s hkratno meritvijo totalne sukcije, iz retencijskih krivulj, iz krivulj stisljivosti, merjenih v edometru, in iz meritev vodoprepustnosti. Podatke o vremenu na lokaciji smo pridobili za najbližjo vremensko postajo s spletne strani ARSO za obdobje januar 2010 do april 2016 (ARSO, 2016).

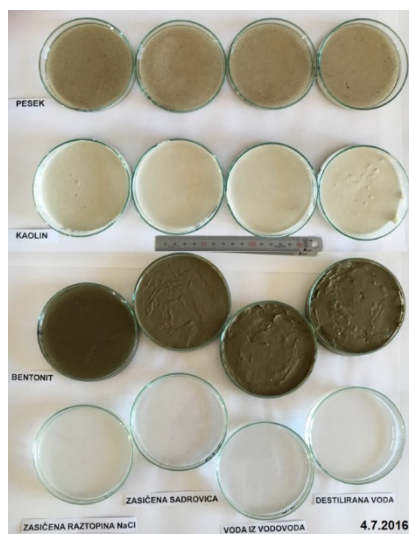
9.2 Vpliv soli na hitrost sušenja – laboratorijski poskus

Hitrost izhlapevanja v različnih okoljih smo preverili s preprostim laboratorijskim poskusom, ki smo ga izvedli na suhih referenčnih materialih: pesku, kaolinu in bentonitu. Iz vsakega od materialov smo pripravili po štiri preizkušance enake suhe mase in vsakemu dodali enako količino vodne raztopine: destilirane vode, vode iz Ljubljanskega vodovoda, vode iz mulja sadre (v nadaljevanju zasičena sadrovica) in zasičene raztopine NaCl. Količina dodane porne tekočine je bila v različnih materialih različna in tolikšna, da smo dosegli židko stanje. Kontrolne meritve smo izvedli na vodnih raztopinah. Hitrost izhlapevanja vode iz preizkušancev smo spremljali na dva načina: (1) z opazovanjem in fotografiranjem preizkušancev in (2) z meritvami spremembe mase.

Začetno stanje preizkušancev je prikazano na Sliki 9.1, stanje po času 2 dni in stanje zračno suhih preizkušancev pa na Sliki 9.2. Vidimo, da je bilo začetno stanje preizkušancev peska in kontrolnih tekočin, vizualno, enako, ne glede na vrsto tekočine. V kaolinu in bentonitu med pripravo nismo opazili razlik v obnašanju, če smo dodali destilirano vodo, vodo iz Ljubljanskega vodovoda in zasičeno sadrovico. Z mešanjem smo ustvarili homogeno lahkognetno maso. Pri dodatku primerljive količine slane vode sta bila preizkušanca obeh glin tekoča, kar je razvidno s Slike 9.1. Preizkušancu

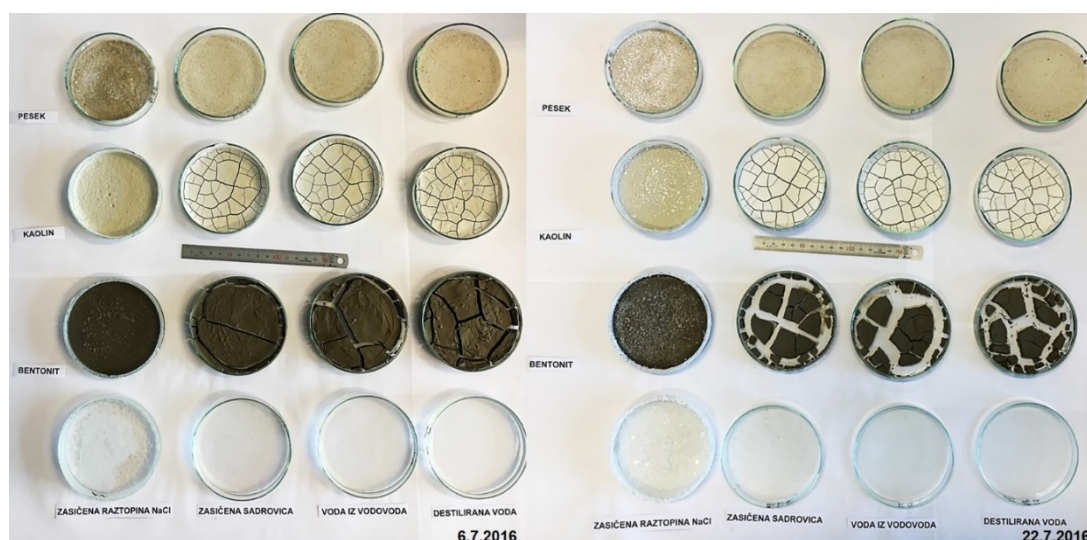
bentonita, ki smo mu dodali slano vodo, smo tako zmanjšali aktivnost, da se je na površini zrn nabral vodni film.

Po 4 urah sušenja na sobni temperaturi so se iz bentonita, ki smo mu dodali zasičeno raztopino NaCl in iz kontrolne zasičene raztopine NaCl (brez vzorca) pričeli, na notranjih in zunanjih robovih steklene posode, izločati kristali soli (Slika 9.2, levo). Da bi preprečili izgubo kristalov soli in bi dejansko merili samo izhlapevanje vode kot na preostalih preizkušancih, smo omenjena preizkušanca postavili na podlago znane mase in preiskavo nemoteno nadaljevali.



Slika 9.1: Začetno stanje preizkušancev, pripravljenih z različnimi pornimi raztopinami.

Figure 9.1: Initial state of specimens, prepared by using different pore fluids.



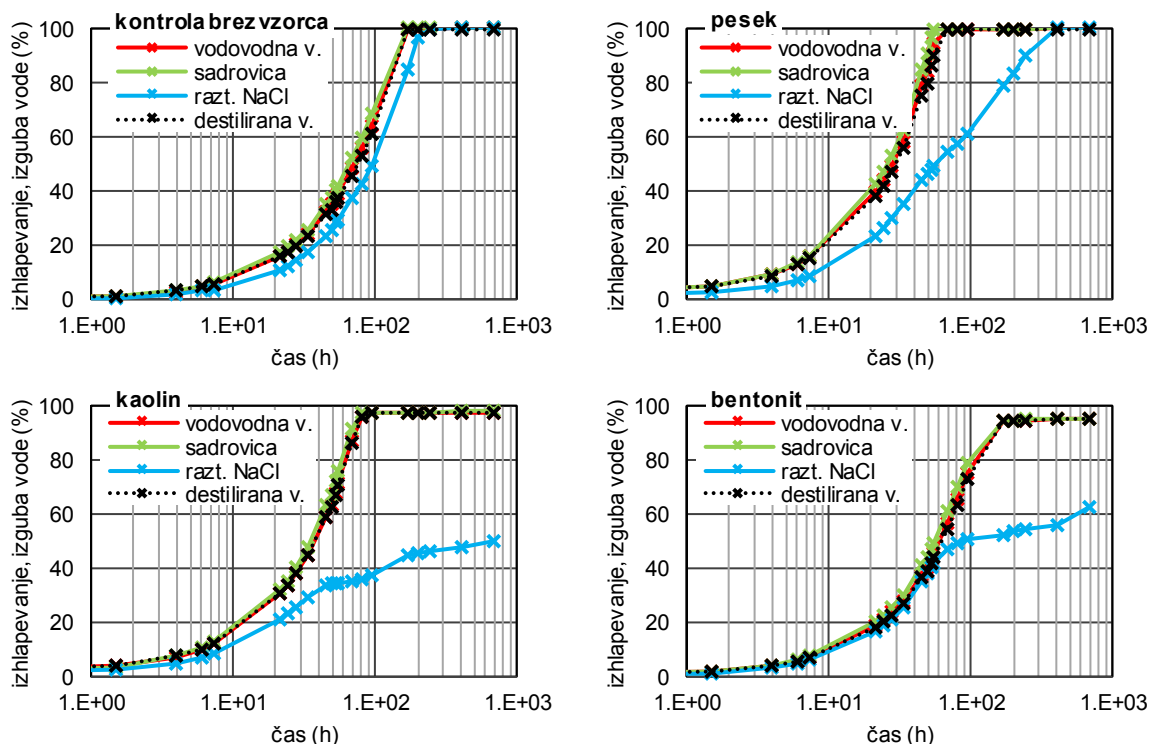
Slika 9.2: Preizkušanci po dveh dneh sušenja na zraku (levo) in zračno suhi preizkušanci (desno).

Figure 9.2: Specimens dried for 2 days at room temperature (left) and air dry specimens (right).

V preizkušancih kaolina in bentonita, ki niso bili pripravljene z zasičeno solno raztopino, so se po ca. 30 urah sušenja pričele formirati prve krčitvene razpoke, ki so bile po dveh dneh sušenja tolikšne, da

so se posamezne zaplate materiala med seboj ločile (Slika 9.2, levo). V bentonitu so se v istem času ustvarile širše razpoke, ki so ločevale večje zaplate materiala, v kaolinu pa ožje, bolj gosto razvejane razpoke. Preizkušanci, ki smo jim vmešali zasičeno raztopino NaCl, v času sušenja niso razpokali (Slika 9.2, desno).

Kvantitativno smo sušenje ovrednotili kot zmanjšanje deleža vode glede na začetno (nično) stanje (v %). Rezultati so, v časovni soodvisnosti, grafično prikazani na Sliki 9.3.



Slika 9.3: Izhlapevanje kot % izgubljene vode v odvisnosti od časa.

Figure 9.3: Time dependent transpiration as the % of evaporated water.

S Slike 9.3 (levo zgoraj) vidimo, da je v zasičeni raztopini NaCl, izhlapevanje ca. 20-30 % počasnejše kot v ostalih kontrolnih tekočinah, ki izkazujejo primerljivo obnašanje. Podobno kot kontrolne tekočine, se tudi preizkušanci, ki smo jih pripravili z zasičeno raztopino NaCl, sušijo bistveno počasneje od ostalih. Med preizkušanci, pripravljenimi z navadno in destilirano vodo in tistimi s sadrovico, v hitrosti sušenja ni opaziti večjih razlik (Slika 9.3). Na preizkušancu kaolina in bentonita s slano vodo se je na površini formirala skorja kristalov soli, ki upočasnjuje sušenje preizkušancev v globino. Po 1 mesecu opazovanja in tehtanja smo z žičko preverili stanje preizkušancev pod skorjo in ugotovili, da ta dva preizkušanca še nista zračno suha, kar je lepo razvidno tudi s Slike 9.3 (spodaj). Opažanja smo potrdili z meritvijo totalne sukcije in vlage bentonita, prekrita s skorjico kristalov soli. Ugotovili smo, da sukcija 39.5 MPa približno ustreza osmotski sukciji zasičene porne raztopine, vlaga bentonita pod skorjico pa je bila ca. 55%.

Ta preprosti laboratorijski poskus sušenja kaže, da sadrovica, ki je v mulju sadre, ne vpliva na hitrost sušenja, zasičena raztopina NaCl pa sušenje močno upočasni. Kaolin in bentonit, kljub sušenju v

konstantnih laboratorijskih pogojih, tudi po enem mesecu nista zračno suha. Vzrok je površinska skorja kristalov soli. Proces sušenja se upočasni zaradi zmanjšane vodoprepustnosti skorje in zvišanja osmotske in matrične sukcije do te mere, da se le-ta uravnoteži z relativno vlago zraka v okolici (laboratoriju).

Procesi sušenja, ki smo jih v laboratoriju identificirali na kaolinu in bentonitu s slano porno vodo, so podobni dogajanjem v lagunah z refulom. »Suha« skorja, v kateri se med izhlapevanjem vode kopiči sol, zavira sušenje refula. Kljub vsemu pa so razmere v kasetah ugodnejše od laboratorijskih, saj padavinski dogodki spirajo sol in jo prenašajo po površini na druga mesta oz. po razpokah v globino.

Modelni izračun sušenja refula, ki ga bomo obravnavali v naslednjem poglavju, bomo izvedli primerjalno, brez in z upoštevanjem osmotske sukcije.

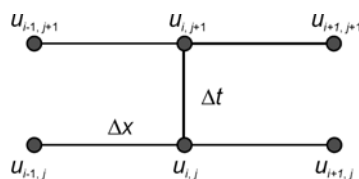
9.3 Lastnosti modela in potrebni materialni podatki

Numerični model, ki ga bomo uporabili za izračune, je predstavljen v doktorski disertaciji Maček (2012). Model za gibanje vode v splošnem v izračunih upošteva:

- 1D tok vode,
- horizontalno površino,
- stanje brez toplotnih sprememb,
- nestisljivo tekočino v porah,
- kontinuirane zračne pore v zemljini,
- konstanten zračni tlak in
- zemljino brez osmotske sukcije.

V izračunih za reful smo model prilagodili tako, da upošteva konstantno osmotsko sukcijo na površini, ki pa ima v izračunih vpliv samo na evapotranspiracijo. To pomeni, da osmotska sukcija spreminja robni pogoj.

Materialne parametre, potrebne v modelnih izračunih, lahko razdelimo v štiri sklope: (1) parametri strižne trdnosti, (2) parametri Modificiranega Cam Clay modela za opis deformabilnosti, (3) parametri za opis retencijske krivulje – Brooks & Coreyev model in osmotska sukcija, (4) parametri za opis vodoprepustnosti zasičene zemljine (Preglednica 9.1). Postopek določitve materialnih parametrov je podan v Maček (2012). Modelni izračun poteka z uporabo Crank-Nicolsonove diferenčne metode, ki je osnovana na centralnih diferencah po prostoru in trapeznem pravilu po času (Slika 9.4). Pri diskretizaciji morajo biti točke v prostoru enakomerno porazdeljene, časovni korak pa se lahko spreminja.



Slika 9.4: Shema izračuna po metodi Crank-Nicolson za 1 dimenzionalni problem (Maček, 2012).

Figure 9.4: Scheme for calculations by using Crank-Nicolson method for 1 dimensional problem (Maček, 2012).

Preglednica 9.1: Materialni parametri v 1D modelnem izračunu.

Table 9.1: Material parameters in 1D model calculations.

Sklop	Količina	Enota	Opis
(1) Strižna trdnost	ϕ'	°	strižni kot (izražen za efektivno napetostno stanje)
	c'	kPa	kohezija (izražena na efektivno napetostno stanje)
(2) Deformabilnost	Γ	/	specifični volumen zemljine na črti kritičnega stanja pri $p'=1$ kPa
	λ	/	naklon logaritemske premice deviške kompresijske krivulje
	κ	/	naklon logaritemske premice razbremenitve in ponovne obremenitve
	G_0	kPa	razbremenilni strižni modul pri p_0
	p_0	kPa	referenčni tlak
(3) Retencijska krivulja	α_{BC}	kPa	oblikovni parameter Brooksove in Coreyeve funkcije; točka vstopa zraka
	λ_{BC}	/	oblikovni parameter Brooksove in Coreyeve funkcije
	Sr_s	/	stopnja zasičenosti zasičene zemljine (običajno 1)
	Sr_r	/	stopnja zasičenosti pri rezidualni vlagi
	κ_γ	/	oblikovni parameter Bishopovega popravka efektivnih napetosti
	Π	kPa	osmotska sukcijska
(4) Vodoprepustnost	a, b	/	parametra za opis funkcije vodoprepustnosti zasičene zemljine (k_s) v soodvisnosti $\log(k) - e$; $k_s = 10^{a-e+b}$

9.4 Modelni izračun sušenja refula

9.4.1 Materialni parametri refula

Materialne parametre refula, ki jih bomo uporabili v modelnem izračunu sušenja, smo določili iz rezultatov laboratorijskih preiskav po postopkih Maček (2012) in so podani v Preglednici 9.2.

Preglednica 9.2: Materialni parametri refula.

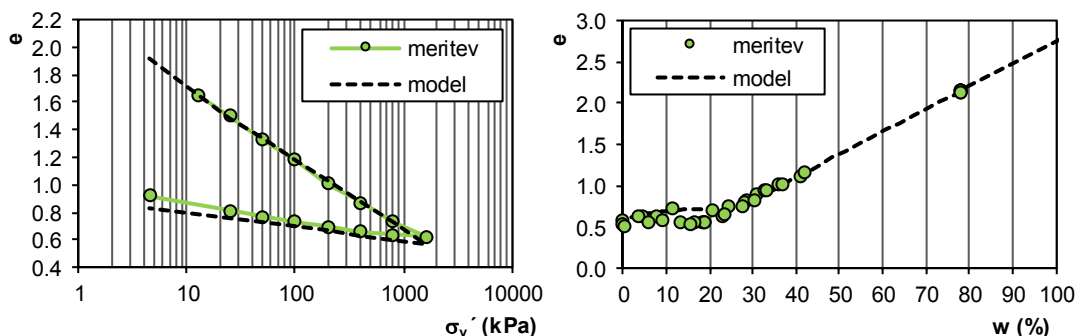
Table 9.2: Material parameters of dredged marine sediment.

Sklop	Količina	Enota	Vrednost
(1) Strižna trdnost	ϕ'	°	27.5
	c'	kPa	0
(2) Deformabilnost	Γ	/	3.1
	λ	/	0.22
	κ	/	0.045
	G_0	kPa	19
	p_0	kPa	1
(3) Retencijska krivulja	α_{BC}	kPa	1100
	λ_{BC}	/	0.4
	Sr_s	/	1
	Sr_r	/	0
	κ_γ	/	2.3
	Π	kPa	glej izračune
(4) Vodoprepustnost*	a	/	1.5
	b	/	-8.16

* parametra a in b sta izračunana iz merjenih vrednosti vodoprepustnosti v m/dan

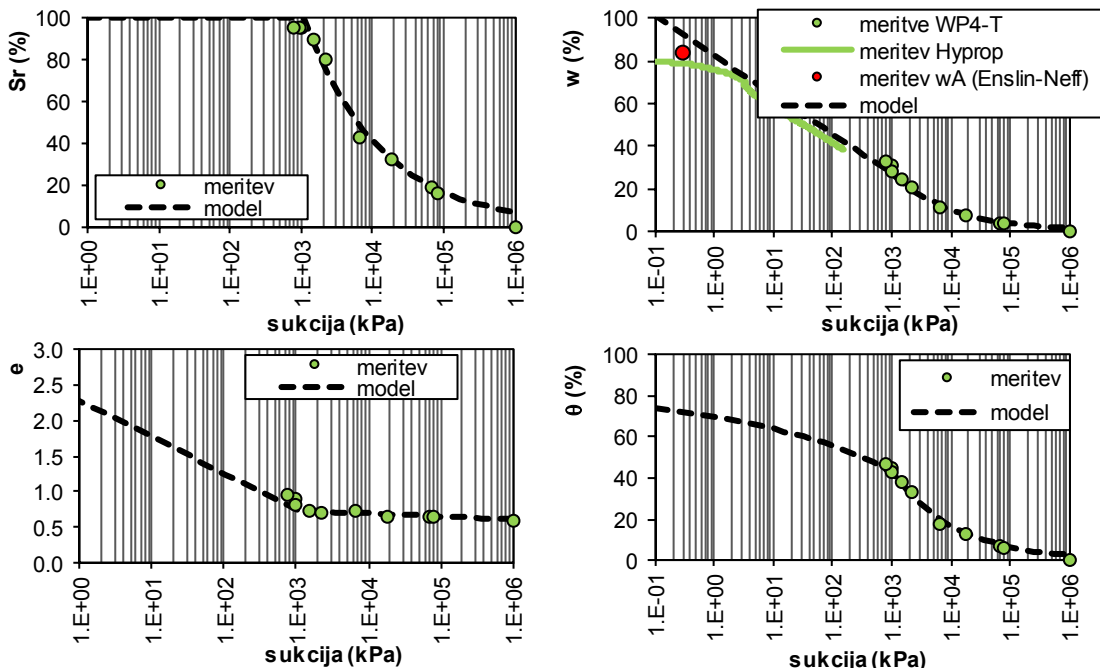
Iz meritev stisljivosti v edometru smo določili parametre, s katerimi v izračunih opišemo deformacijsko obnašanje. Z meritvijo retencijske krivulje v obliki saturacija – sukcija, smo določili do katere sukcije je zemljina popolnoma zasičena. Za zasičene zemljine velja, da je Bishopov korekcijski faktor χ enak 1, zato lahko krivuljo krčenja računsko določimo iz parametrov v Preglednici 9.2 (Maček, 2012).

Prileganje vrednosti, ki smo jih izračunali z uporabo parametrov v Preglednici 9.2, k merjenim, je prikazano na Slikah 9.5 in 9.6. Poleg materialnih parametrov, podanih v Preglednici 9.2, smo v izračunih upoštevali še gostoto zrn refula 2.75 t/m^3 .



Slika 9.5: Primerjava računskih vrednosti (črtkano) in merjenih v laboratoriju. Levo edometriška preiskava, desno meja krčenja.

Figure 9.5: Comparison of calculated (dashed line) and measured values. Left consolidation curve, right shrinkage limit.



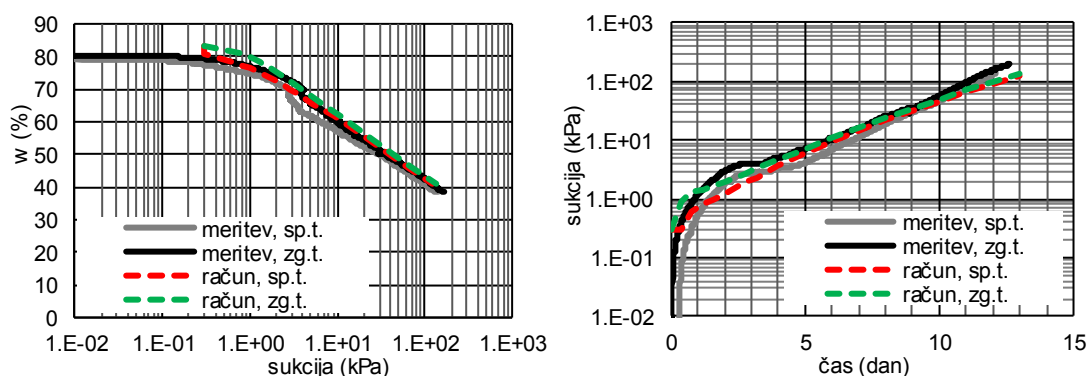
Slika 9.6: Primerjava računskih vrednosti (črtkano) in merjenih v laboratoriju. Meritve retencijske krivulje s hkratnim merjenjem gostote zemljine. Desno zgoraj je dodana tudi meritev sukcije v napravi HYPROP in meritev vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku (rdeč simbol).

Figure 9.6: Comparison of calculated (dashed line) and measured values. Suction measurements with the simultaneous determination of the density. Right upper – SWRC measured by using Hyprop, red dot in the same figure – Enslin - Neff water adsorption.

9.4.2 Preverba delovanja numeričnega modela – simulacija laboratorijske preiskave

Delovanje numeričnega modela smo najprej preverili s simulacijo sušenja preizkušanca v napravi Hyprop, kjer imamo na zgornjem robu pogoj konstantnega toka, na spodnjem pa nični tok vode (hidravlični gradient je enak 0). Preizkušancu smo določili konstantne začetne pogoje glede na stanje zemljine ob vgradnji.

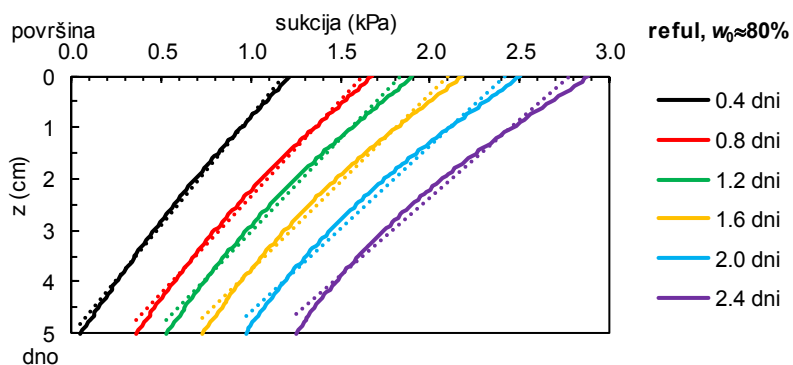
S primerjavo izračunanih in merjenih vrednosti smo preverili, kako dobro znamo z numeričnim modelom opisati gibanje vode in razvoj matrične sukcije v zemljini. V začetnem delu se rezultati meritev in izračunane vrednosti nekoliko razlikujejo (Slika 9.7), kar je posledica modelne idealizacije na meji med prekonsolidirano in normalno konsolidirano zemljino. V času od ca. 1 dneva naprej se izračunane in merjene vrednosti dobro ujamejo (Slika 9.7, desno). Vidimo, da smo z uporabljenim numeričnim modelom dobro simulirali evaporacijo in razvoj sukcije med preiskavo refula v napravi Hyprop, zato ga bomo uporabili tudi za izračune sušenja refula v kasetah.



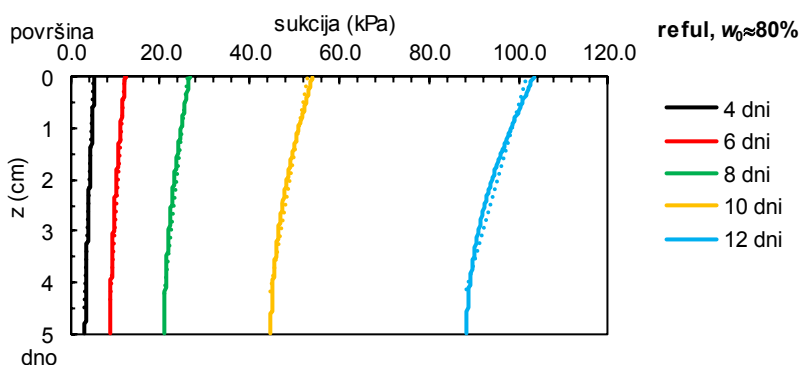
Slika 9.7: Rezultat modelnega izračuna sušenja in rezultat meritve v napravi Hyprop. Legenda: sp.t., zg.t., glej Sliko 4.6.

Figure 9.7: Numerical simulation of the transpiration test in the Hyprop device – comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values. Legend: sp.t., zg.t., see Figure 4.6.

Ena izmed predpostavk pri meritvah sukcije v napravi Hyprop je linearna razporeditev sukcije po višini preizkušanca (poglavje 4.4.4). Veljavnost predpostavke smo preverili z numeričnim izračunom. Rezultati izračuna so za različne čase sušenja, skupaj z linearno soodvisnostjo, prikazani na Sliki 9.8. Vidimo, da je izračunana zveza (polne črte) skoraj linearna (prekinjene črte – linearna aproksimacija) in je predpostavka preiskave približno ustrezna.



...se nadaljuje...



Slika 9.8: Izračun sukcije po globini za različne čase sušenja. Globina 0 cm pomeni površino in globina 5 cm dno preizkušanca.

Figure 9.8: Calculated soil suction along the depth in Hyprop for different drying times. Depth 0 cm – surface of the specimen and depth 5 cm – bottom of the specimen.

9.4.3 Numerični izračun sušenja refula v akumulaciji

Z izračunom sušenja zemljine v napravi Hyprop (simulacija preiskave) smo pokazali, da lahko z numeričnim modelom Maček (2012) zadovoljivo opišemo dogajanje v zemljini. Enake materialne parametre (Preglednica 9.2) in numerični model bomo uporabili za izračun realnega problema sušenja refula v akumulaciji.

V 1D izračunu sušenja smo upoštevali plast refula debeline 3.5 m, ki je bila izmerjena s terenskimi meritvami v akumulaciji (Slika 5.37) in naslednje začetne in robne pogoje:

- začetni pogoj: normalno konsolidirana zemljina
- spodnji rob: konstanten tlak vode; 3.5 m vodnega stolpca
- zgornji rob: vremenski podatki (padavine ali evapotranspiracija in relativna vlaga zraka) na lokaciji Portorož za obdobje januar 2010 do april 2016 (Slika 9.9) (ARSO, 2016).

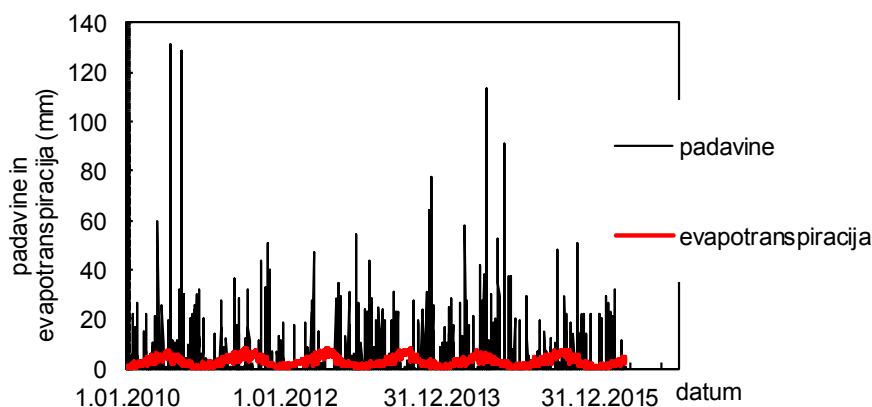
Osmotska sukcija v refulu zmanjšuje maksimalni možni delni tlak vodne pare tik nad zemljino. Izračune smo zato izvedli za tri scenarije: (1) brez upoštevanja osmotske sukcije, (2) z osmotsko

sukcijo 20 MPa in (3) z osmotsko sukucijo 40 MPa, ki približno ustreza osmotski sukuciji zasičene raztopine NaCl. Osmotsko sukucijo smo v izračunih upoštevali kot vpliv na zmanjšanje hitrosti izhlapevanja (9.1). Meritve padavin in izhlapevanja so prikazane na Sliki 9.9 (ARSO, 2016).

$$ET = ET_0 \left(\frac{p_v(\psi) - p_v}{p_{vSr} - p_v} \right) \quad (9.1)$$

kjer je p_v parcialni tlak vodne pare v zraku, p_{vSr} zasičen parcialni tlak vodne pare v zraku, $p_v(\psi)$ parcialni tlak vodne pare v zraku tik nad zemljino s sukucijo ψ , ET dejanska evapotranspiracija in ET_0 referenčna evapotranspiracija.

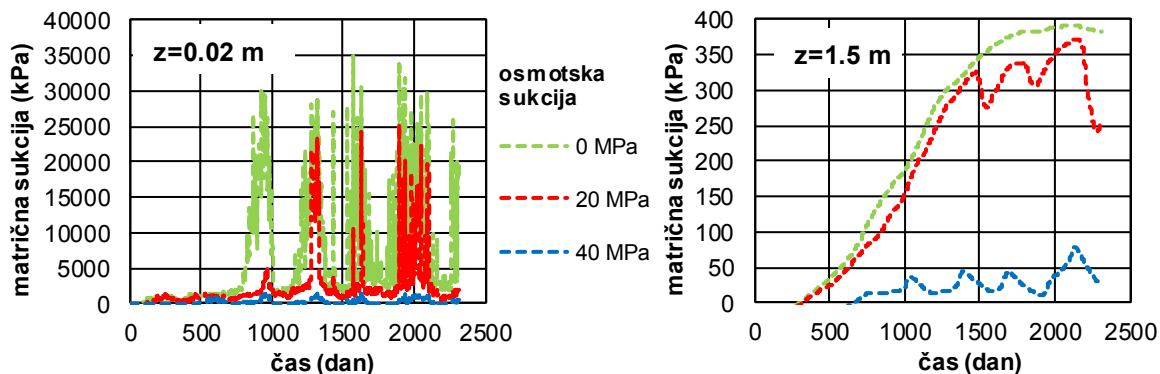
Račune smo za vse tri parametre: matrično sukucijo, vlago in saturacijo, izvedli po celotnem vertikalnem profilu, v koraku 2 cm po globini. Izračunane vrednosti smo izpisali dnevno za obdobje 2311 dni. Celoten nabor dnevnih izračunanih profilov po globini, za en parameter, za eno vrednost osmotske sukucije, obsega preko 400 000 podatkov; 2311 dni \times 175 globin (t.j. 3.5 m / 0.02 m). Rezultati so zaradi boljše preglednosti prikazani za globino 0.02 m, ki predstavlja stanje v »suhi skorji« in za maksimalno globino odvzema vzorcev iz vrtin 1.5 m.



Slika 9.9: Meteorološki podatki na lokaciji (ARSO, 2016).

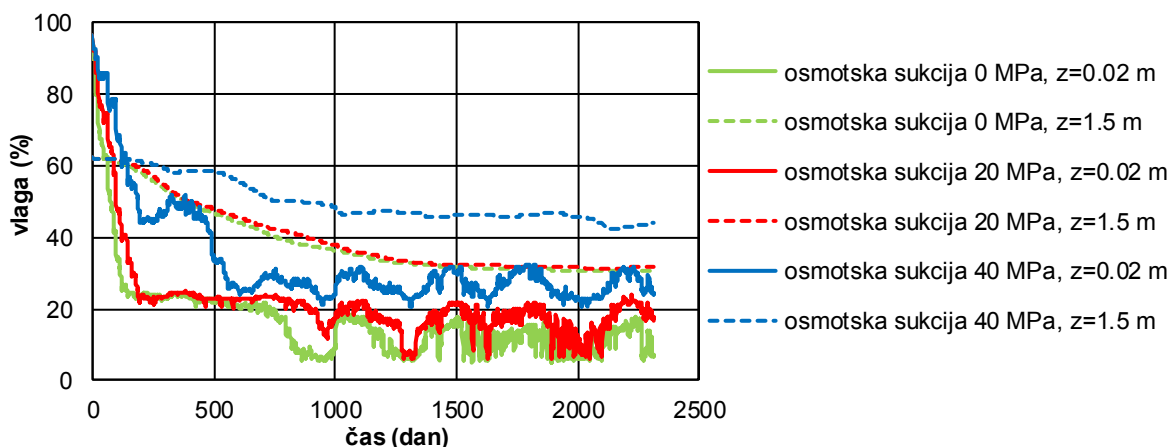
Figure 9.9: Meteorological data at the location (ARSO, 2016).

S Slik 9.10 do 9.12 vidimo, da so vsi izračunani parametri zelo občutljivi na zmanjšanje izhlapevanja zaradi osmotske sukucije. Vpliv se kaže tako v suhi skorji kot tudi na globini 1.5 m. Ob upoštevanju nične osmotske sukucije in osmotske sukucije 20 MPa matrična sukucija v suhi skorji naraste na vrednosti višje od 20 MPa, vlaga upade pod mejo krčenja, saturacija pa pod 50%. Z upoštevanjo osmotske sukucije 40 MPa je izračunano stanje drugačno. Matrična sukucija doseže vrednosti do 1500 kPa na površini in na globini 1.5 m ca. 50 kPa, vlaga je višja od meje krčenja, reful pa je v celotnem računskem profilu zasičen, kar približno ustreza dejanskemu stanju v naravi.



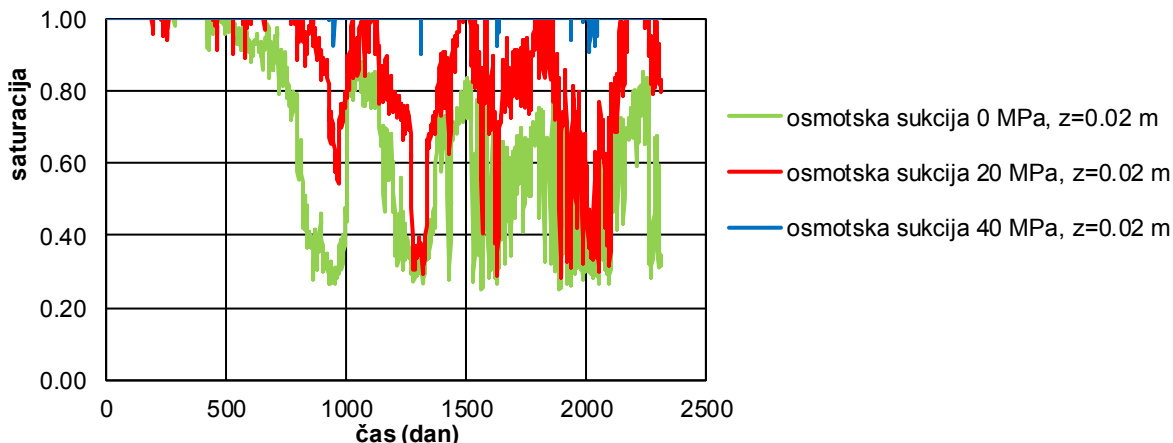
Slika 9.10: Vpliv osmotske sukcije na gibanje matrične sukcije v refulu na globini 0.02 m (levo) in 1.5 m (desno).

Figure 9.10: The influence of osmotic suction on the matric suction in the deposited dredged marine sediment; depth 0.02 m (left) and depth 1.5 m (right).



Slika 9.11: Vpliv osmotske sukcije na vlago refula na globini 0.02 m (polne črte) in 1.5 m (črtkane črte).

Figure 9.11: Influence of osmotic suction on the water content in deposited dredged marine sediment, at the depth of about 0.02 m (solid lines) and 1.5 m (dashed lines).

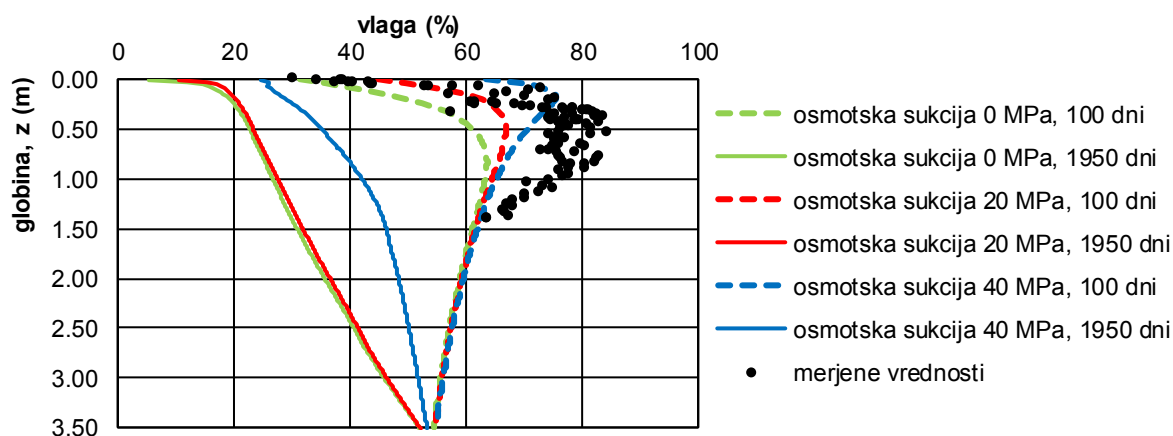


Slika 9.12: Vpliv osmotske sukcije na saturacijo refula na globini 0.02 m.

Figure 9.12: Influence of osmotic suction on the degree of saturation in deposited dredged marine sediment at the depth of about 0.02 m.

Da bi lahko ovrednotili ustreznost modelnega izračuna, smo izračunane vrednosti vlage primerjali z rezultati laboratorijskih preiskav vzorcev iz vrtin (Slika 9.13). Starost kasete ob odvzemu vzorcev, smo ocenili na 5 let, zato rezultate podajamo za čas 1950 dni (Slika 9.13, polne črte). Izračuni za čas 1950 dni, ne glede na upoštevanje osmotsko sukucijo, realnega stanja ne opišejo dobro. Sušenje refula je, v primerjavi s stanjem v naravi, močno precenjeno.

S podrobno analizo vseh z numeričnim modelom določenih vrednosti smo ugotovili, da se računski vlažnost za čas 100 dni najbolj ujema z merjeno (Slika 9.13, črtkane črte). Tudi v tem primeru z modelom precenimo sušenje v zgornjih plasteh, na globini ca. 1.5 m pa se merjene in računski vrednosti ujamejo. Računski trend gibanja vlage z globino je primerljiv merjenemu. Z modelnim računom smo identificirali tudi formiranje suhe skorje na površini, kar je skladno z rezultati terenskih in laboratorijskih raziskav.



Slika 9.13: Računska vlaga refula po globini, za čas mirovanja 100 dni in 1950 dni, primerjalno z meritvami vlage na vzorcih iz vrtin.

Figure 9.13: Calculated water content of deposited dredged marine sediment, along the depth for the resting time of 100 days and 1950 days in comparison with measured data.

Ugotovili smo, da z 1D modelom, kljub upoštevanju zmanjšanja izhlapevanja zaradi osmotske sukucije, dolgoročno precenimo vplive sušenja refula na porazdelitev vlage po globini. Odstopanja računskih in merjenih vrednosti lahko pojasnimo z neravno površino akumulacije in ojezeritvijo v osrednjem delu akumulacije. Pomanjkljivost uporabljenega modela je, da zanemari infiltracijo vode skozi stene razsušitvenih razpok. V izračunih sušenja plazine na plazu Slano blato ta težava ni prišla do izraza, ker voda v razpokah ni zastajala (Maček, 2012). V akumulacijah refula pa se gladina vode v ojezerjenem delu v času padavin dvigne in preplavi razpoke. Zaradi neupoštevanja t.i. bočnih vtokov je podcenjen vpliv infiltracije in precenjen vpliv sušenja refula na vlago.

Podobno kot v našem primeru izračuna sušenja je za modelni izračun formiranja krčitvenih razpok v programu CONDENSE, Znidarčič ugotovil prenehanje delovanja numeričnih izračunov ob prvem upadu evaporacije in sukucije (Znidarčič, 2007). Zaključil je, da je s tem kršena ena od temeljnih predpostavk teorije sušenja, ki pravi, da je zemljina izpostavljena le monotoni obremenitvi.

Rezultati numeričnih izračunov, ki za trenutno stanje v akumulacijah precenijo sušenje, so lahko tudi pozitiven kazalnik. Kažejo namreč, da bi se reful po globini bistveno bolj osušil, če bi bila površina refula ravna in bi se lahko po celotnem območju formirala suha skorja. S tem bi tudi preprečili omočenje zaradi stranskih vtokov vode. Kontrolirano bi morali urediti tudi vplive podzemne vode in drugih nepadavinskih virov, ki napajajo reful v lagunah. Za ustrezno potrditev veljavnosti numeričnih izračunov bi potrebovali izvedbo testne lagune, izvedene kot lizimeter, v kateri bi se z robnimi in začetnimi pogoji kar najbolj približali numeričnemu modelu.

9.5 Modelni izračun sušenja mulja sadre

Materialnih parametrov mulja sadre, ki bi jih upoštevali v izračunih sušenja, nismo mogli tako enolično določiti kot za reful. Vse preiskave, razen preiskava določanja meje krčenja, so bile izvedene na vzorcu iz enake globine.

Podobno kot za reful smo iz meritev stisljivosti mulja sadre v edometru določili parametre, s katerimi v izračunih opišemo deformacijsko obnašanje (Γ , λ , κ). Z meritvijo retencijske krivulje v obliki zveze saturacija – sukcijska smo določili velikost sukcijske pri točki vstopa zraka. Za zasičene zemljine velja, da je Bishopov korekcijski faktor χ enak 1, zato lahko na tem območju načeloma enostavno izračunamo krivuljo krčenja.

Ko smo s temi parametri poskušali opisati potek preiskave meje krčenja mulja sadre, so bili izračunani količniki por neprimerljivi z merjenimi. Za sprejemljivo prileganje modelnih vrednosti merjenim, smo morali spremeniti parameter Γ . Tudi retencijskih krivulj, merjenih v napravi Hyprop, kljub temu, da sta bili meritvi izvedeni na enakem vzorcu kot edometriška preiskava, nismo uspeli opisati z materialnimi parametri, določenimi iz edometra. V izračunih retencijskih krivulj, ki se prilegajo merjenim, smo morali popraviti parameter Γ in v primeru 2. vzorca tudi parameter λ . V Preglednici 9.2 so podani materialni parametri, izvrednoteni za posamezno preiskavo, na Slikah 9.14 do 9.16 je, za materialne parametre v Preglednici 9.3, prikazano ujemanje modelnih izračunov in merjenih vrednosti.

Preglednica 9.3: Materialni parametri mulja sadre.

Table 9.3: Material parameters of red gypsum mud.

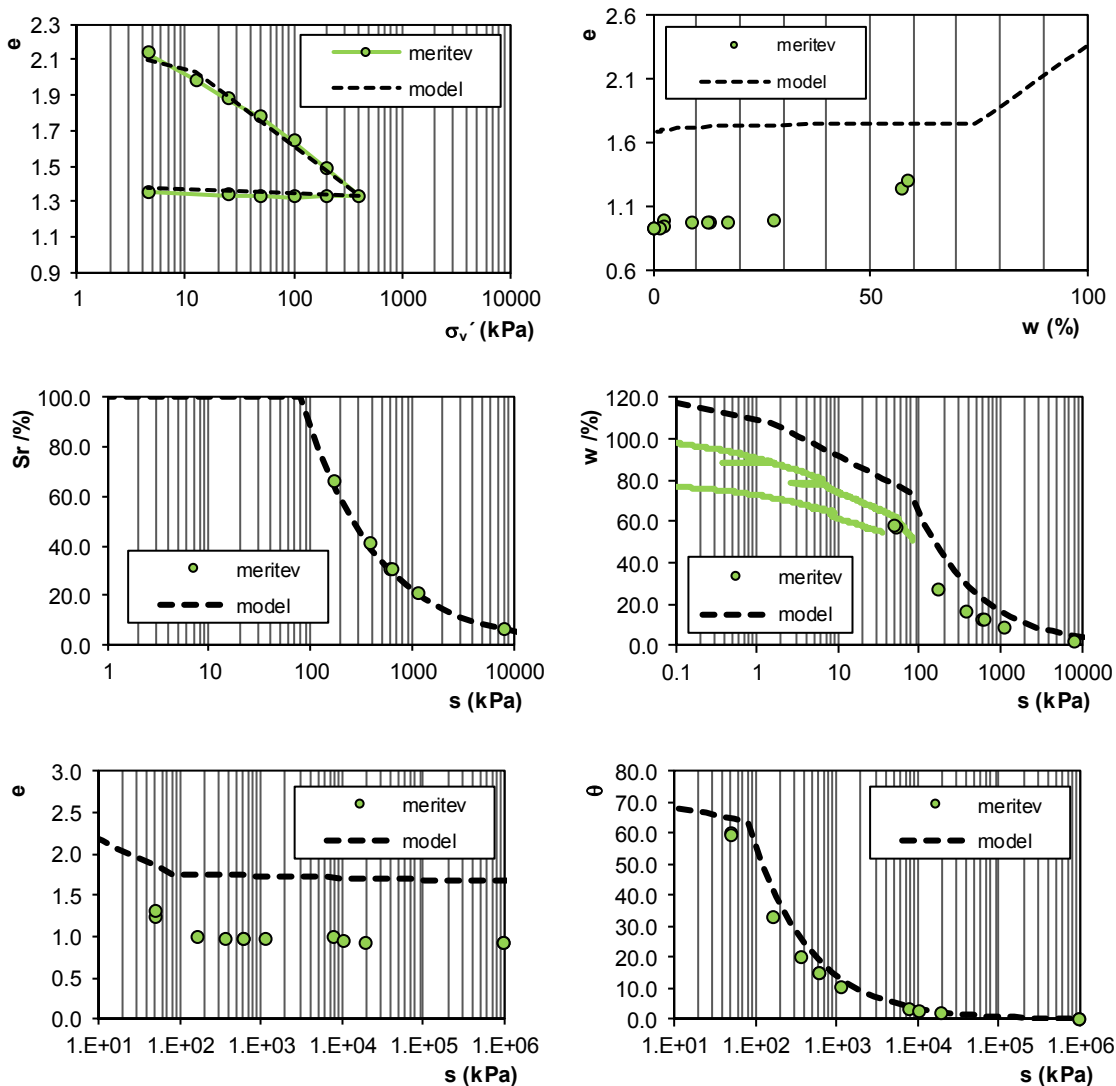
Sklop	Količina	Enota	Edometer in DS	Meja krčenja	SWRC (Hyprop 1)	SWRC (Hyprop 1)
(1) Strižna trdnost	ϕ'	°	36			
	c'	kPa	0			
(2) Deformabilnost	Γ	/	3.44	2.65	3.10	2.65
	λ	/	0.200	0.200	0.200	0.150
	κ	/	0.008	0.008	0.008	0.008
	G_0	kPa	150	150	150	150
	p_0	kPa	1	1	1	1
(3) Retencijska krivulja	α_{BC}	kPa		60	60	60
	λ_{BC}	/		0.595	0.595	0.595
	Sr_s	/		100	100	100
	Sr_r	/		0	0	0
	κ_γ	/		1.60	1.60	1.60
	Π	kPa		0	0	0

Ugotavljamo naslednje:

- Slika 9.14 – Z materialnimi parametri, ki dobro opišejo izmerjeno krivuljo stisljivosti, smo izračunali ostale parametre. Količniki por so glede na merjene precenjeni (slika desno zgoraj), modelno določena retencijska krivulja v soodvisnosti vlaga - sukcija se pri sukcijah nad 100 kPa relativno dobro prilega merjeni (desno v sredini), merjena in modelna soodvisnost količnik por in sukcija se zelo razlikujeta.
- Slika 9.15 – Z materialnimi parametri, ki dobro opišejo merjeno krivuljo krčenja, smo izračunali ostale parametre. Ugotovili smo, da je izračunana krivulja stisljivosti neustrezna, slabo je tudi ujemanje računsko določene in merjene retencijske krivulje (zveza vlaga – sukcija).
- Slika 9.16 – Z materialnimi parametri, ki dobro opišejo merjeno retencijsko krivuljo (Hyprop 1), smo izračunali ostale parametre. Tudi v tem primeru je modelni opis merjene krivulje stisljivosti neustrezen, odstopanja so tudi med računsko določenimi in merjenimi vrednostmi krčenja mulja sadre.

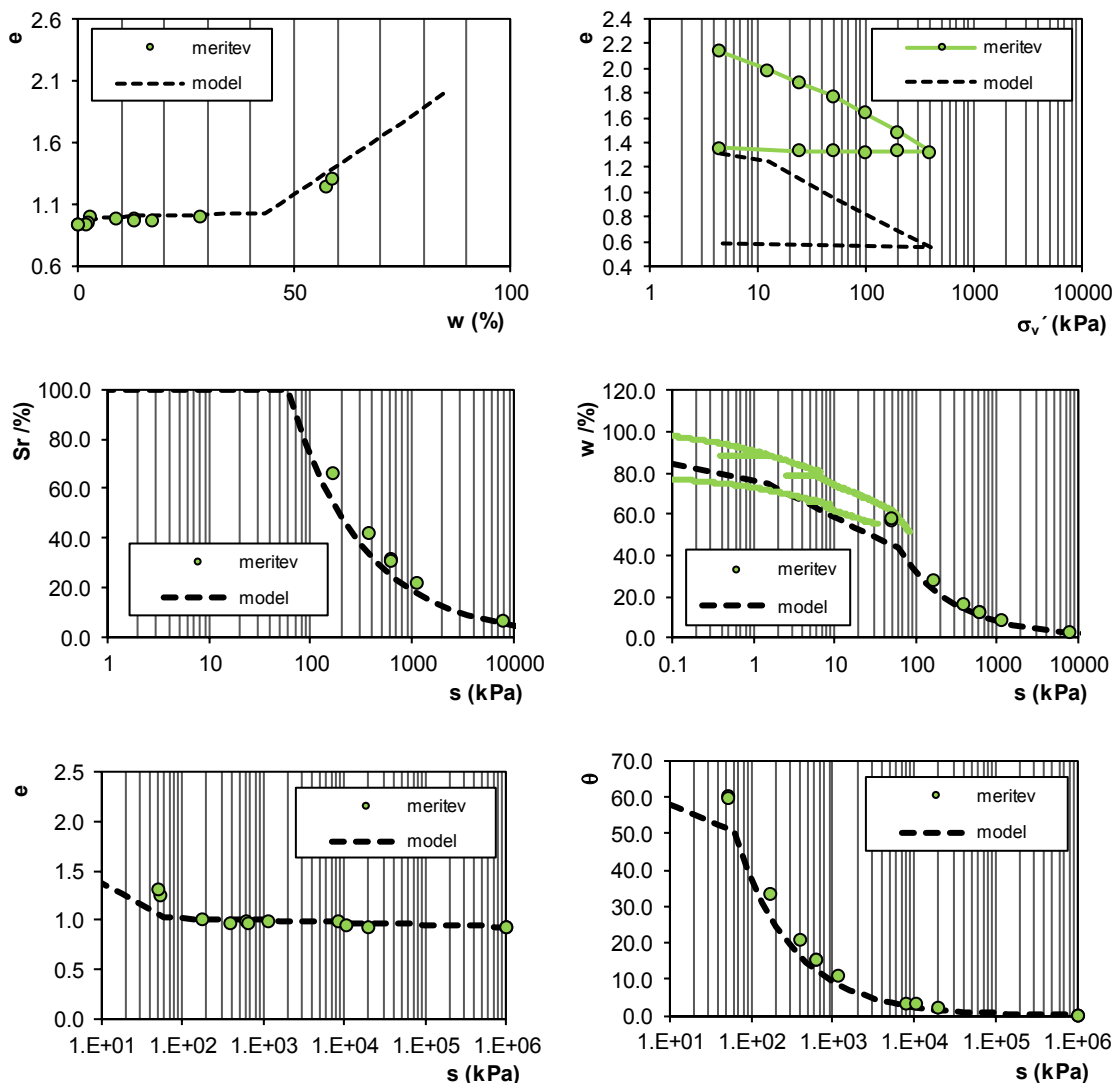
Iz Preglednice 9.3 in Slik 9.14 do 9.16 vidimo, da rezultatov laboratorijskih preiskav stisljivosti, meje krčenja s hkratnim merjenjem sukcije in meritev sukcije, ne moremo opisati z enotnimi materialnimi parametri, ki bi jih lahko uporabili v izračunih sušenja.

Brez enotnih materialnih parametrov, modelnih izračunov, ki bi opisali dejansko obnašanje mulja sadre, ni možno izvesti. Rezultati takšnih izračunov so lahko zavajajoči in povsem napačni, zato jih nismo izvajali.



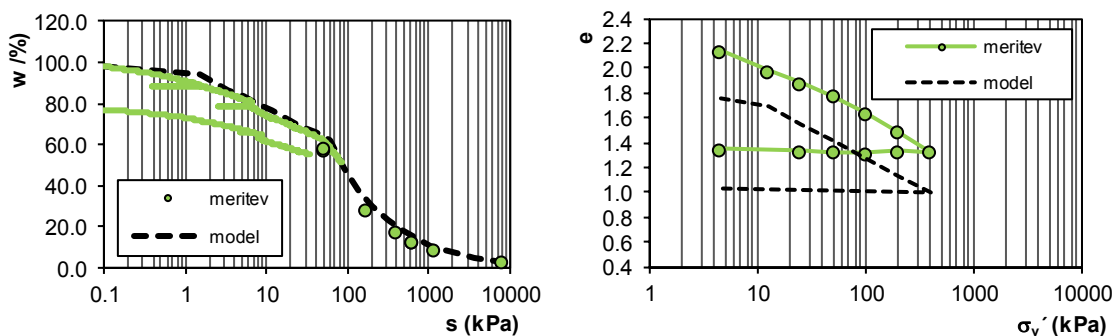
Slika 9.14: Mulj sadre - prileganje vrednosti, izračunanih s parametri iz vrednotenimi iz edometrične preiskave (črtkano), k merjenim.

Figure 9.14: Red gypsum mud - comparison of values, calculated from parameters, determined from oedometer test (dashed line) and measured values.

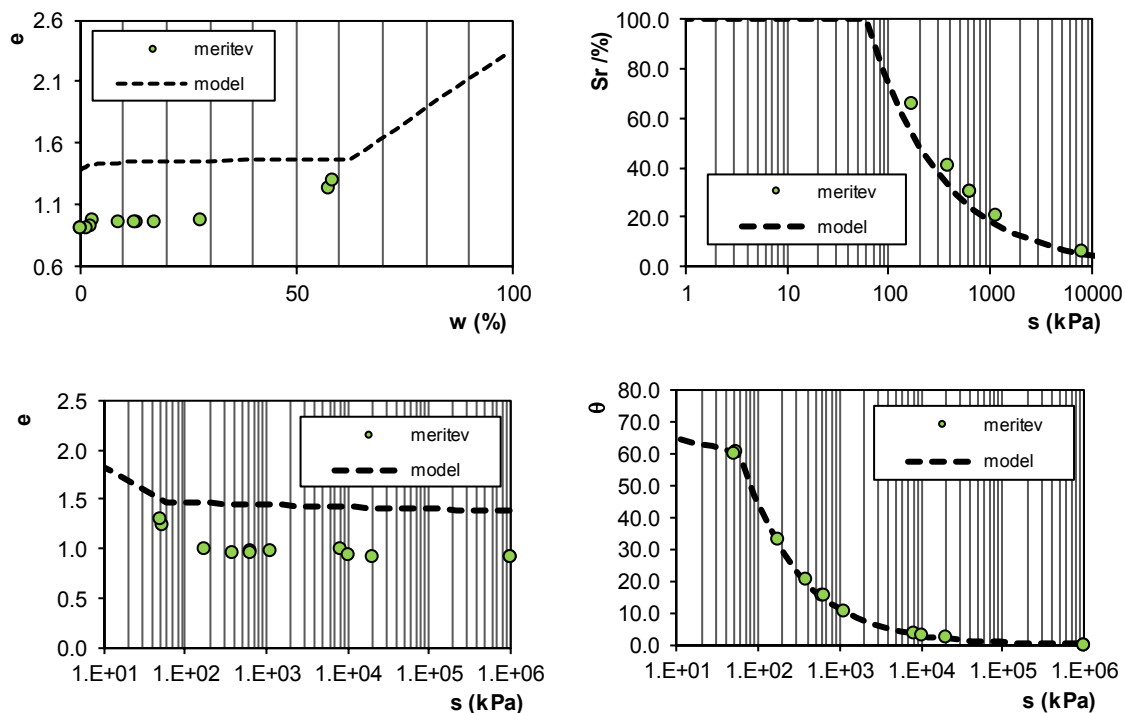


Slika 9.15: Mulj sadre - prileganje vrednosti, izračunanih s parametri iz vrednotenimi iz preiskave določanja meje krčenja (črtkano), k merjenim.

Figure 9.15: Red gypsum mud - comparison of values, calculated from parameters, determined from shrinkage limit test (dashed line) and measured values.



... se nadaljuje ...



Slika 9.16: Mulj sadre - prileganje vrednosti, izračunanih s parametri iz vrednotenimi iz retencijske krivulje Hyprop 1 (črtkano), k merjenim.

Figure 9.16: Red gypsum mud - comparison of values, calculated from parameters, determined from SWRC (dashed line) and measured values.

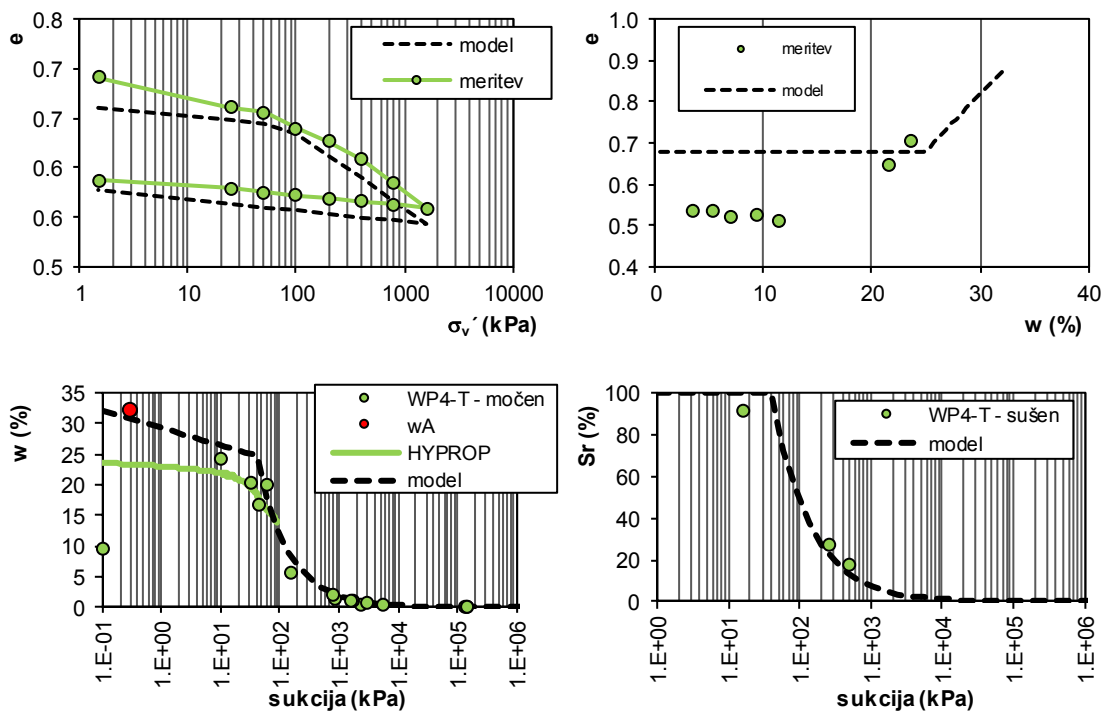
9.6 Določitev parametrov modela na zemljinah

Pokazali smo, da lahko za reful določimo enotne parametre modela, s katerimi lahko izračunamo 1D sušenje, za mulj sadre pa tega ne moremo narediti.

Možnost določitve enotnih modelnih parametrov smo zato preverili še za dva referenčna materiala: (1) kameno moko in (2) sivico. Primerjava merjenih vrednosti in izračunanih iz materialnih parametrov, ki najbolj opišejo eno od preiskav, je za kameno moko prikazana na Sliki 9.17, za sivico pa na Sliki 9.18.

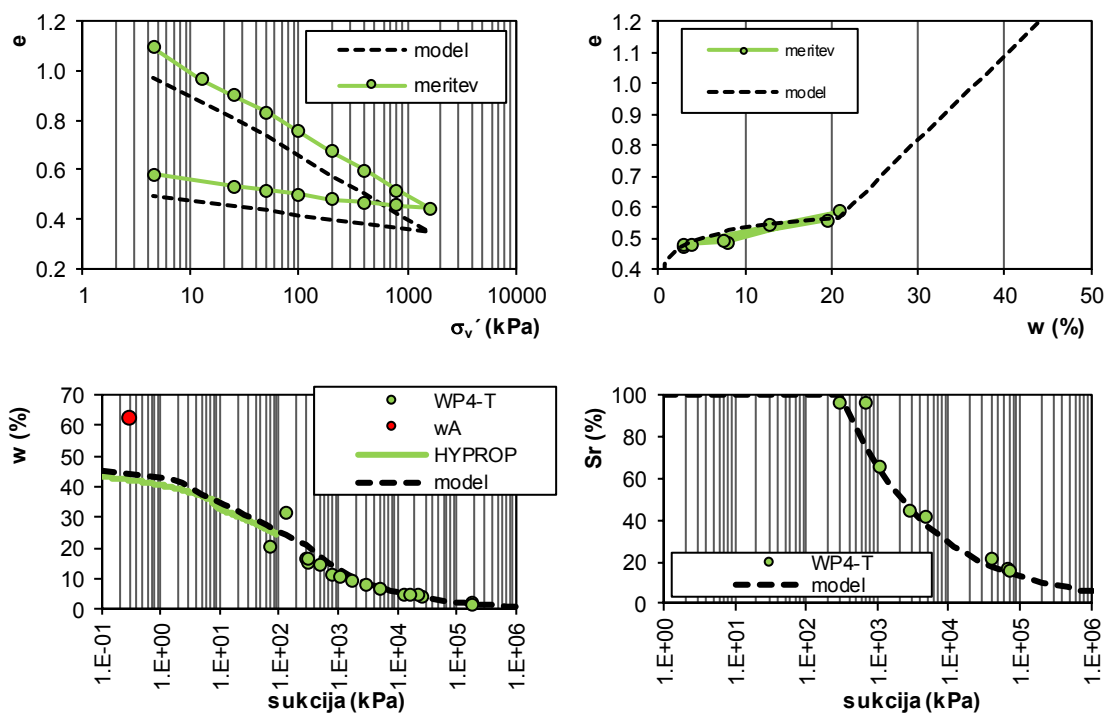
S Slike 9.17 vidimo, da podobno kot za mulj sadre, tudi za kameno moko ne moremo ustrezno določiti enovitih materialnih parametrov za izračune sušenja z modelom Maček (2012). Materialni parametri za sivico so določeni bolje (Slika 9.18).

Razlog za odstopanja so lahko slučajne napake med izvedbo laboratorijskih preiskav ali za tovrstne materiale neustrezen način določanja materialnih parametrov.



Slika 9.17: Primerjava računskih in merjenih vrednosti, določenih za kameno moko.

Figure 9.17: Comparison of calculated and measured values, determined for stone flour.



Slika 9.18: Primerjava računskih in merjenih vrednosti, določenih za sivico.

Figure 9.18: Comparison of calculated and measured values, determined for sivica.

9.7 Zaključek

S preprostim laboratorijskim poskusom sušenja referenčnih materialov, zasičenih z različnimi pornimi tekočinami smo pokazali, da:

- porna voda, ki je v mulju sadre, nima bistvenega vpliva na hitrost sušenja,
- zasičena solna raztopina močno upočasni sušenje (ca. 20-30%). Na površini se formira skorja kristalov soli, osmotska sukcija v zemljini pa tako naraste, da se sušenje praktično ustavi.

Izračuni sušenja refula v akumulaciji z 1D modelom so pokazali vpliv osmotske sukcije na hitrost sušenja, ki smo ga identificirali v laboratoriju. Osmotsko sukcijo smo upoštevali kot popravek robnega pogoja. Izračunani parametri sušenja za obdobje 2311 dni z upoštevanjem dejanskih vremenskih podatkov, se z merjenimi najbolj ujemajo za čas 100 dni. Za dejansko starost kasete pa račun preceni sušenje, t.j. podceni vlago. Razlog je podcenjena infiltracija, zaradi neupoštevanja bočnega dotoka vode skozi stene razsušitvenih razpok v slučaju dviga vode v akumulacijah.

Precenjeno sušenje zaradi neupoštevanja stranskih dotokov je lahko tudi pozitiven kazalnik. Reful bi se lahko po globini bolj osušil, če bi bila površina ravna ali rahlo izbočena in bi se po celotnem območju formirala suha skorja. Stranski vtoki, ki bi preplavili razpoke bi se zmanjšali, zastajanja vode na površini ne bi bilo.

Poskusna uporaba 1D modela sušenja Maček (2012) kaže, da ta ni splošno veljaven. Za gline (reful, plazina na plazu Slano blato) lahko določimo enotne materialne parametre, vendar pa moramo v modelnih izračunih korigirati robne pogoje. V izračunih sušenja refula smo evapotranspiracijo močno zmanjšali z upoštevanjem korekcije robnega pogoja za vpliv osmotske sukcije. Za mulj sadre in kameno moko pa na način, kot ga podaja avtor modela, nismo uspeli določiti enotnih materialnih parametrov za izračune.

Za napredovanje razvoja realističnih modelov bo treba v prihodnje graditi poskusne lizimetre, v katerih bo poleg spremembe vlage in stopnje saturacije, možno na posameznih globinah meriti tudi s spremembami vlage povezane vertikalne deformacije. Mali ekološki nasip, zgrajen iz kolača sadre v Cinkarni, je v prvem letu delovanja pokazal zelo močne vplive sušenja tudi do globine 0.85 m, vendar teh ugotovitev ni moč neposredno prenesti na mulj sadre.

10 MODELIRANJE OŽEMANJA / FILTRACIJE

10.1 Uvod

Leta 2008 so v Cinkarni Celje pričeli z ožemanjem suspenzije sadre na tlačnih filtrskih stiskalnicah. Rezultat ožemanja je filtrski kolač. V času poskusnega ožemanja je bilo izvedenih več tehnoloških poskusov, pri katerih so spremljali delovne nastavitve stiskalnic, čas ožemanja in tlak ožemanja, merili pa so vlago nastalega kolača.

Poskusna vakuumaska in tlačna filtracija suspenzije morskega sedimenta je bila doslej izvedena samo na laboratorijskem nivoju, na Kemijskem inštitutu v Ljubljani.

Z modelnimi izračuni bomo poskušali opisati ožemanje suspenzij obeh sedimentov. Materialne parametre bomo določili iz rezultatov poskusnega ožemanja. Z variacijo dveh parametrov: upornosti filtra in upornosti filtrskega kolača, bomo pokazali vpliv posameznega parametra na izcejen volumen filtrata.

10.2 Teoretično ozadje izračunov

Prvotna ideja je bila, da bi modelne izračune ožemanja opravili v programu Plaxis, ki smo ga uporabili tudi za izračune konsolidacijskega lezenja v poglavju 8. Izkazalo se je, da v programu ni možno računati hipnega stiskanja suspenzije pod visokimi tlaki, saj program ne omogoča izračuna pri tako visokih vlagah oz. pri tako nizki začetni prekonsolidacijski napetosti. To smo preverili tudi pri razvijalcih programa, ki so pritrdili našim ugotovitvam.

Modelne izračune ožemanja oz. filtracije smo nato izvedli, za stiskanje s konstantnim tlakom, z uporabo najenostavnejšega linearnega modela. Za izračune smo uporabili osnovne filtracijske enačbe po Wakeman in Tarleton (1999), Holdich, (2002), Tarleton in Wakeman (2006) in Wairagu (2012) in drugi. Predpostavka modela je, da ima kolač, ki nastaja na filtru, po celotni debelini enake lastnosti, v izračunih se zato uporabijo povprečne vrednosti lastnosti kolača.

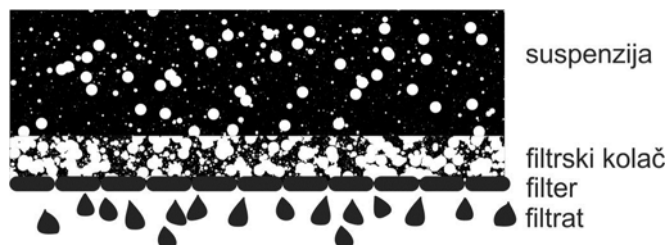
10.2.1 Osnovne enačbe

Linearna filtracija s konstantnim tlakom temelji na predpostavki Darcy-evega zakona za opis toka vode skozi filter in filtrski kolač. Za filtrski kolač moramo predpostaviti sprejemljive oz. upoštevati merjene vrednosti vodoprepustnosti in vlage pri znanem tlaku in času filtracije. Shematsko je princip linearnega modela filtracije prikazan na Sliki 10.1.

Izračune smo izvedli z uporabo osnovne filtracijske enačbe (10.1) po Wakeman in Tarleton (1999), Holdich, (2002), Tarleton in Wakeman (2006) in Wairagu (2012):

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot c}{A^2 \cdot \Delta P} \cdot V + \frac{\eta \cdot R_m}{A \cdot \Delta P} \quad (10.1)$$

kjer je t čas (s), V prostornina filtrata (m^3), η viskoznost tekočine (filtrata), za katero običajno privzamemo kar viskoznost vode $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, α povprečna upornost filtrskega kolača (m/kg), c koncentracija suspenzije (kg/m^3), A površina filtra (m^2), ΔP tlačna razlika (Pa), R_m upor filtra; lastnost naprave (m^{-1}).



Slika 10.1: Shematski prikaz filtracije skozi kolač, prirejeno po Holdich (2002).

Figure 10.1: Schematic presentation of cake filtration, adapted after Holdich (2002).

V geotehniko terminu upor filtra in filtrskega kolača nista v splošni rabi, zato bomo v nadaljevanju poskušali pojasniti fizikalno ozadje teh količin, uporabljenih v filtraciji.

V zvezah za izračun filtracije nastopa t.i. absolutna prepustnost (κ), ki jo izrazimo z enoto m^2 . κ je običajno v rabi v fiziki in kemiji in opisuje lastnost materiala, ki je neodvisna od medija, ki se pretaka skozi material. Absolutno prepustnost z vodoprepustnostjo (k), ki je v splošni rabi v geotehniko, povezuje zveza (10.2):

$$\kappa = k \cdot \frac{\eta}{\rho_v g} \quad (10.2)$$

Specifična upornost (R) je enaka obratni (recipročni) vrednosti prevodnosti. Z integracijo specifične upornosti po precejni poti dobimo upornost nekega sloja na tok vode (10.3):

$$R = \frac{\Delta L}{\kappa} \quad (10.3)$$

kjer je ΔL sprememba dolžine.

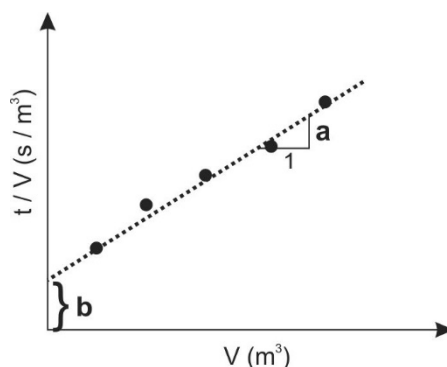
V enačbi (10.1) nastopajo tri neznanke: čas, prostornina filtrata in razlika tlaka. Pri filtraciji s konstantnim tlakom, ki jo bomo modelirali, je ΔP celotni tlak stiskanja. Enačbo (10.1) za primer konstantnega tlaka stiskanja, ki predstavlja robni pogoj, integriramo po času (od časa 0 do časa t). V končnem času t se skozi filter in filtrski kolač precedi nek volumen filtrata V . Po integraciji in preureditvi enačbe (10.1) dobimo zvezo (10.4):

$$\left(\frac{\eta \cdot \alpha \cdot c}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \right) \cdot V^2 + \left(\frac{\eta \cdot R_m}{A \cdot \Delta P} \right) \cdot V - t = 0 \quad (10.4)$$

Enačbo (10.4) lahko zapišemo kot (10.5):

$$a \cdot V^2 + b \cdot V - t = 0 \quad (10.5)$$

Člena a in b v enačbi (10.5), iz katerih lahko izračunamo parameter upornosti filtrskega kolača (α) in upornost filtra (R_m), sta najenostavneje določljiva iz testov filtracije v modelnem merilu, ali na realni filtrski stiskalnici. Če zvezo (10.5) delimo z V in narišemo soodvisnost t/V (y os) – V (x os) dobimo linearno premico, iz katere lahko določimo parametra a in b (Slika 10.2).



Slika 10.2: Shematski prikaz določitve parametrov a in b v enačbi (10.5), prirejeno po Tarleton in Wakeman (2006).

Figure 10.2: Determination of parameters a and b in the equation (10.5), adapted after Tarleton and Wakeman (2006).

Če rezultatov testov filtracije nimamo, je parameter upornosti filtra eden najtežje določljivih, običajno pa je, v primerjavi z upornostjo filtrskega kolača, zanemarljiv in nima velikega vpliva na rezultate izračunov. Upor filtra se, pri filtraciji s konstantnim tlakom, v izračunih zato lahko tudi zanemari (privzame vrednost 0). Na ta način izračunamo za iztok istega volumna filtrata krajši čas filtracije kot z upoštevanjem R_m (Wakeman in Tarleton, 1999). Okvirne vrednosti upora filtra so med 10^8 m^{-1} do 10^{11} m^{-1} , vendar pa se s časom, z izrabo in zablatenjem filtra spreminjajo (Wakeman, 1981; Wakeman in Tarleton, 1999; Tarleton in Wakeman, 2006).

Parameter α lahko določimo tudi računsko, iz merjenih lastnosti filtrskega kolača, po enačbi (10.6) (Holdich, 2002). Okvirne vrednosti povprečne upornosti filtrskega kolača so, glede na sprijetost kolača, podane v Preglednici 10.1 (Leu, 1986):

$$\alpha = \frac{1}{\kappa C \cdot \rho_s} \quad (10.6)$$

kjer je C volumska koncentracija trdnine v kolaču, ρ_s pa gostota zrn.

Preglednica 10.1: Upornost filtrskega kolača α (Leu, 1986).

Table 10.1: Filter cake resistance α (Leu, 1986).

Sprijetost	α (m/kg)
Zelo slaba	$1 \cdot 10^9$
Slaba	$1 \cdot 10^{10}$
Srednja	$1 \cdot 10^{11}$
Dobra	$1 \cdot 10^{12}$
Zelo dobra	$1 \cdot 10^{13}$

Iz volumna filtrata, izračunanega po enačbi (10.4), smo debelino filtrskega kolača (H_c) izračunali kot (10.7) (Holdich, 2002):

$$H_c = \frac{c \cdot V}{A} \cdot \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{(m_r - 1)}{\rho_{vode}} \right) \quad (10.7)$$

kjer je $m_r = m_{moker\ kolač} / m_{suh\ kolač}$ oz. vlaga, podana kot delež filtrskega kolača, povečana za 1.

10.3 Parametri v izračunih

V izračunih smo upoštevali parametre, ki so bili določeni pri poskusnem ožemanju obeh suspenzij na obratu oz. v laboratoriju.

10.3.1 Suspenzija morskega sedimenta

Tlačna filtracija refula je bila v dveh ponovitvah izvedena na suspenziji podobne koncentracije, kot se jo črpa na kopno, to je ca. 20-30% trdnine. Volumen filtrata in čas, potreben za izcejanje podanega volumna, sta, skupaj s tlakom ožemanja, podana v Preglednici 10.2. Površina filtra je bila 0.071 m², vlaga filtrskega kolača pa ca. 36%. Debelina filtrskega kolača pri tlačni filtraciji ni navedena, pri vakuumski filtraciji pa je bil kolač debel ca. 1 cm.

Preglednica 10.2: Rezultati poskusnega ožemanja suspenzije refula (Kemijski inštitut).

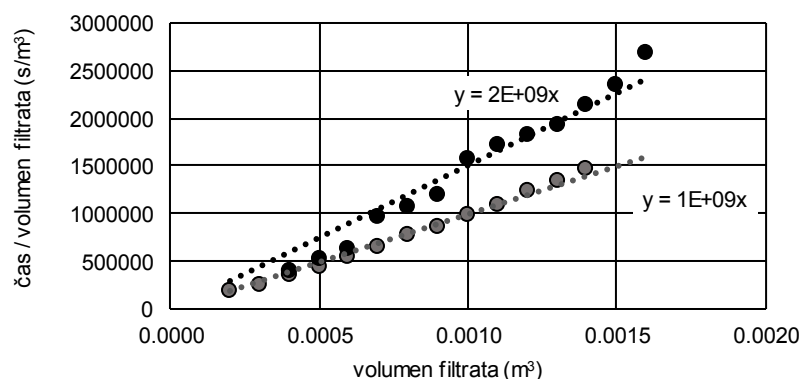
Table 10.2: Results of the trial filtration of dredged marine sediment suspension (Kemijski inštitut).

V filtrata	Tlak	Test 1, čas	Test 2, čas
L	bar	min	min
0.2	5	0.6	/
0.3		1.3	/
0.4		2.33	2.72
0.5		3.7	4.33
0.6		5.5	6.33
0.7		7.6	11.28
0.8		10.28	14.38
0.9		13	17.8
1.0		16.33	26.1
1.1		19.9	31.58
1.2		24.6	36.65
1.3		29	41.83
1.4		34.02	50.07
1.5		/	58.63
1.6		/	71.8

Upornost filtrskega kolača refula smo določili iz rezultatov tlačne filtracije (Slika 10.3). Za oba testa smo določili vrednost parametra a (enačba (10.5) in Slika 10.2), vrednost parametra b je 0 (kar je lahko napaka preiskave). Zaradi nične vrednosti parametra b bi morali v izračunih upoštevati nično upornost filtra. S Slike 10.3 je razvidno, da je parameter a za test 1 1.0E+9, za test 2 pa 2.0E+9. Iz enačb (10.4) in (10.5) lahko za izračun parametra a zapišemo (10.8):

$$a = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot c}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \quad (10.8)$$

Iz enačbe (10.8) smo za obe vrednosti parametra a iz vrednotili upornost filtrskega kolača refula (α). Izračunani upornosti kolača sta skupaj z ostalimi parametri refula podani v Preglednici 10.3.



Slika 10.3: Grafični prikaz vrednotenja parametrov a in b iz rezultatov poskusne tlačne filtracije suspenzije refula.

Figure 10.3: Graphical presentation of values, measured during trial pressure filtration of dredged marine sediment suspension. Determination of parameters a and b .

Preglednica 10.3: Materialni in tehnološki parametri v izračunih ožemanja suspenzije refula.

Table 10.3: Material and technological parameters, used in the calculations of the pressure filtration of dredged marine sediment suspension.

Parameter	Enota	Reful
površina filtra, A	m^2	0.071
viskoznost tekočine, η	$mPa \cdot s$	1.0
gostota vode, ρ_w	kg/m^3	1000
volumska koncentracija suspenzije, c	%	10-15*
gostota suspenzije, ρ_{su}	kg/m^3	1190*
gostota zrn, ρ_s	kg/m^3	2750
vlaga kolača, w_k	%	~36
gostota kolača, ρ	t/m^3	2.01
suha gostota kolača, ρ_d	t/m^3	1.48
upornost filtra, R_m	m^{-1}	0
tlak na stiskalnici, ΔP	bar	5
čas filtracije, t	s	2040 (test 1)
		4260 (test 2)
upornost kolača, α	m/kg	1.33E+13 (test 1)
		2.66E+13 (test 2)

* predpostavljena vrednost.

10.3.2 Suspenzija sadre

V preglednici 10.4 so prikazani rezultati poskusnega ožemanja suspenzije sadre v Cinkarni (Petkovšek, 2009).

Gostoto suspenzije sadre smo določili na vzorcih iz proizvodnje.

Lastnosti filtrskega kolača sadre smo raziskali na kosih, dostavljenih v laboratorij. Merili smo vlago, gostoto, vodoprepustnost in debelino kolača, ki variira od 3.5 cm do 4.5 cm. Iz merjene

vodoprepustnosti kolača ($k \approx 8.5E-9$ m/s), smo po enačbi (10.6) izračunali upornost filtrskega kolača. Upornost filtra smo privzeli iz literature. Parametri mulja sadre, upoštevani v izračunih, so podani v Preglednici 10.5.

Preglednica 10.4: Tehnološki parametri poskusnega ožemanja in vlaga filtrskega kolača sadre (Petkovšek, 2009).

Table 10.4: Technological parameters of trial pressure filtration and water content of red gypsum filter cake (Petkovšek, 2009).

Izvedba poskusa	Čas ožemanja	Tlak	Vlaga kolača, w_k
mesec / leto	s	bar	%
3/2008	120	13.5	39.70
	120	13.5	39.79
	120	13.5	38.05
4/2008	120	13.5	45.16
	120	13.5	46.23
	120	14.0	43.89
	120	14.0	39.59
	120	14.0	40.35
	180	14.0	42.26
	180	14.0	44.22
	120	14.0	41.70
	120	14.0	44.20
	240	15.0	41.70
	120	15.0	48.20
	180	15.0	43.28
	240	15.0	40.43
	300	15.0	38.64
	360	15.0	34.63
420	15.0	32.48	
480	15.0	32.83	

Preglednica 10.5: Materialni in tehnološki parametri upoštevani v izračunih ožemanja suspenzije mulja sadre.

Table 10.5: Material and technological parameters, used in the calculations of the pressure filtration of red gypsum mud suspension.

Parameter	Enota	Sadra
površina filtra, A	m^2	0.071*
viskoznost tekočine, η	mPa·s	1.0
gostota vode, ρ_w	kg/m^3	1000
volumska koncentracija suspenzije, c	%	14
gostota suspenzije, ρ_{su}	kg/m^3	1190
gostota zrn, ρ_s	kg/m^3	2360
vlaga kolača, w_k	%	40
gostota kolača, ρ	t/m^3	1.70
suha gostota kolača, ρ_d	t/m^3	1.21
upornost filtra, R_m	m^{-1}	0*
tlak na stiskalnici, ΔP	bar	15
čas filtracije, t	s	480
upornost kolača, α	m/kg	9.51E+11

* predpostavljena vrednost. Opomba: za filtracijo sadre smo, zaradi primerjave rezultatov, privzeli enako površino filtra kot za reful.

10.4 Rezultati izračunov

Izračune smo najprej izvedli s parametri, podanimi v Preglednicah 10.3 in 10.5. Nato pa smo za obe suspenziji preverili vpliv variacije dveh parametrov na izračunane vrednosti: (1) upornost filtra in (2) upornost filtrskega kolača. Parametri, ki jih v posameznem računskem primeru ne variramo, so skladni s parametri v Preglednicah 10.3 in 10.5, pri čemer smo za reful upoštevali parametre testa 1.

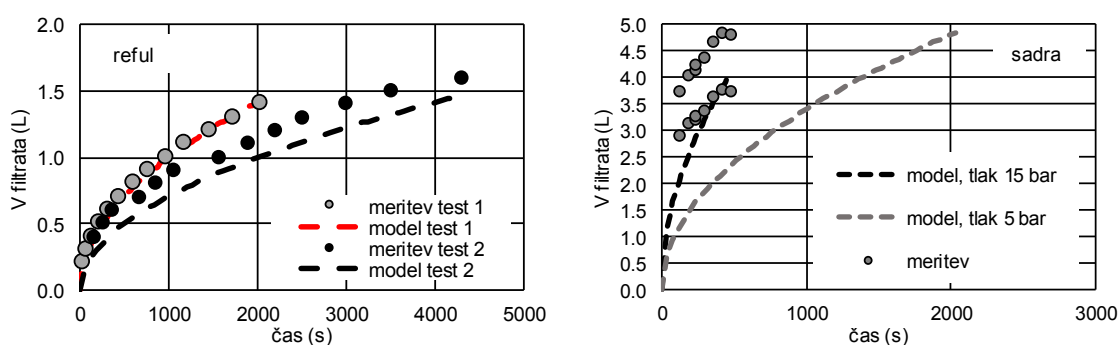
10.4.1 Izračuni s parametri iz poskusnih filtracij

Izračunani volumni filtrata za dejanski čas trajanja poskusnih tlačnih filtracij so prikazani na Sliki 10.4, debeline filtrskega kolača, izračunane po enačbi (10.7), pa na Sliki 10.5.

Za suspenzijo refula smo izračunane volumne filtrata (Slika 10.4 levo, model) primerjali z vrednostmi, merjenimi med poskusno filtracijo (Slika 10.4 levo, meritev). Vidimo, da je ujemanje za test 1 popolno, v testu 2 pa so manjša odstopanja, ki so posledica natančnosti določitve upornosti filtrskega kolača. Na Sliki 10.3 je vidno, da se linearna trendna črta, iz katere določimo parameter a in nadalje α , merjenim vrednostim testa 2 ne prilega popolnoma, rezultate testa 1 pa z linearno premico zelo dobro opišemo. S potrditvijo ujemanja rezultatov izračunov in merjenih vrednosti smo za suspenzijo refula ugotovili, da lahko z osnovnimi enačbami zadovoljivo modeliramo postopek tlačne filtracije v laboratoriju.

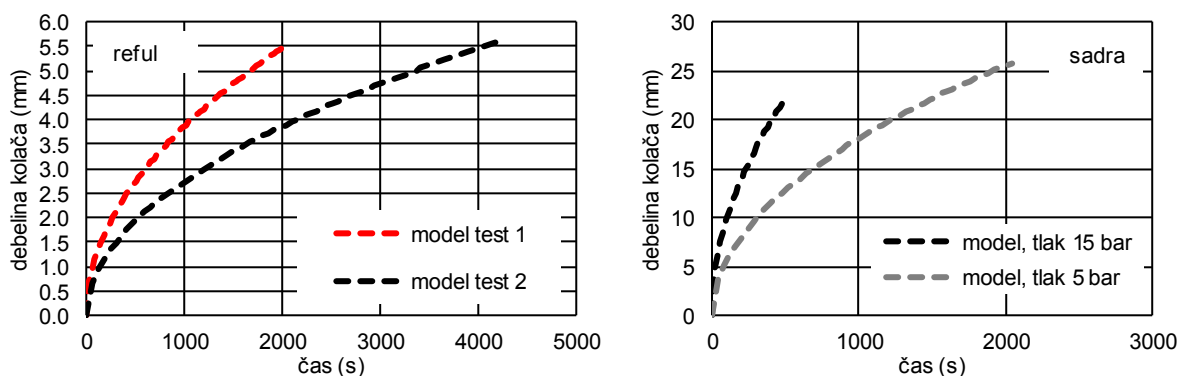
Za sadro smo volumen filtrata za različne čase filtracije izračunali iz tehnoloških parametrov ožemanja in iz materialnih podatkov. V izračunu volumna kolača, ki se formira, smo upoštevali polovično vrednost zgornje in spodnje merjene vrednosti debeline kolača (1.75 cm in 2.25 cm). S Slike 10.4, desno vidimo, da je volumen filtrata, izračunan iz filtracijske enačbe, enakega velikostnega reda kot izračunan iz parametrov poskusnega ožemanja.

Neposredna primerjava volumnov filtrata refula in sadre ni možna, saj je bil izračun filtracije sadre izveden za 10 barov višji tlak, krajši čas filtracije in manjšo upornost filtrskega kolača (Preglednici 10.3 in 10.5). Če tehnološke parametre ožemanja (tlak in čas filtracije) za mulj sadre, upoštevamo po testu 1 za reful, vidimo, da je volumen filtrata iz sadre za ca. 70% večji (Slika 10.4, desno siva linija). Zaključimo lahko, da ima upornost filtrskega kolača velik vpliv na izračunane vrednosti.



Slika 10.4: Primerjava rezultatov tlačne filtracije suspenzije refula (levo) in mulja sadre (desno), z izračunanimi vrednostmi s parametri po Preglednicah 10.3 in 10.5.

Figure 10.4: Pressure filtration – values calculated by using parameters given in Tables 10.3 and 10.5 (dashed lines) and measured values (dots). Figure left – dredged marine sediment suspension and right – red gypsum mud suspension.



Slika 10.5: Izračun formiranja filtrskega kolača refula (levo) in sadre (desno).

Figure 10.5: Calculation of time growth of the filter cake; dredged marine sediment (left) and red gypsum (right).

Iz analize formiranja filtrskega kolača (Slika 10.5) vidimo, da je debelina kolača refula manjša od debeline kolača sadre. Merjene debeline kolača refula iz poskusne filtracije nimamo, zato ne moremo primerjalno ovrednotiti računskih in laboratorijsko določenih vrednosti. Vidimo pa, da je pri enakem času (2000 s), izračunana debelina kolača refula za test 1 ca. 5.5 mm, za test 2 pa komaj nekaj manj kot 4 mm.

Debelina kolača sadre ob dostavi v laboratorij je med 3.5 cm in 4.5 cm, kar pomeni, da je izračunana vrednost nižja (ca. polovica merjene debeline). Glede na to, da smo modelne izračune preverili z rezultati dejanskih meritev, smo potrdili veljavnost modela. Razlike v merjeni in izračunani debelini kolača lahko izvirajo iz: (1) zveze za izračun debeline kolača (preveč poenostavljen pristop), (2) dvosmerne filtracije na realni filtrski stiskalnici (dobimo v primerjavi z izračuni, dvojno debelino kolača) in morebitnih drugih vplivov.

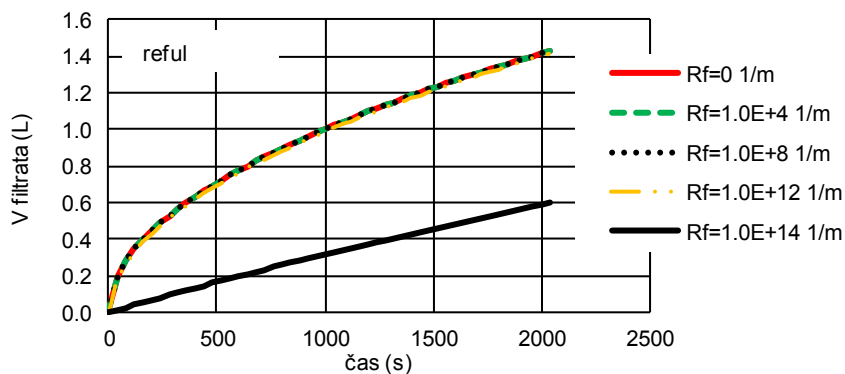
Tudi za primer, ko smo prilagodili tehnološke parametre ožemanja, t.j. povečali čas filtracije na ca. 34 min in zmanjšali tlak na stiskalnici na 5 bar, je za nespremenjene materialne parametre razlika v debelini kolača med refulom in sadro velika (ca. 2 cm). Pri nižjem tlaku filtracije bi se zmanjšala tudi upornost kolača. Tega v izračunih nismo upoštevali, bi pa nižja vrednost upornosti kolača rezultirala v še večje debeline kolača.

Osnovna predpostavka linearne metode filtracije so nespremenljive lastnosti kolača v fazi nastajanja (t.j. celoten kolač je enak in homogen). Izračunov porazdelitve vlage in gostote kolača v odvisnosti od časa (v fazi nastajanja) zato ni možno izvesti.

10.4.2 Vpliv upornosti filtra

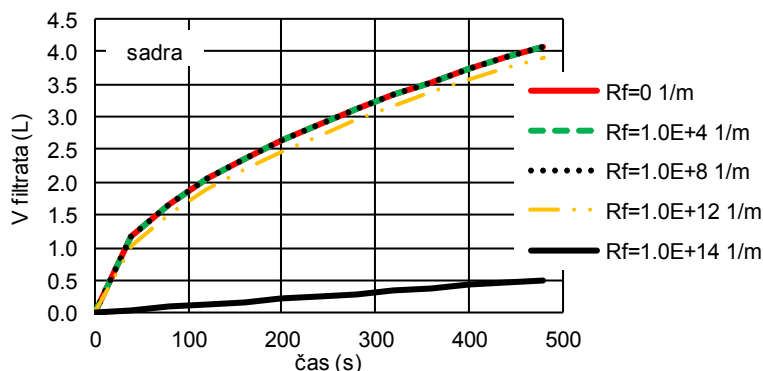
V analizah vpliva upornosti filtra na volumen filtrata smo upoštevali materialne in tehnološke parametre, podane v Preglednicah 10.3 in 10.5 (za reful test 1). Najprej smo izračun ponovili za upornost filtra 0 m^{-1} , nato pa smo jo višali do vrednosti $1\text{E}+14 \text{ m}^{-1}$. Rezultati izračunov so prikazani na Sliki 10.6 za reful in na Sliki 10.7 za sadro.

Vidimo, da variiranje vrednosti upornosti filtra od 0 m^{-1} do $1.0\text{E}+12 \text{ m}^{-1}$, v našem primeru, ne vpliva na izračunan volumen filtrata. Naše ugotovitve so skladne z ugotovitvami drugih avtorjev (poglavje 10.2.1). Upornost filtra lahko v izračunih tlačne filtracije zanemarimo. Po drugi strani pa ne smemo upoštevati previsoke vrednosti (črna linija na Slikah 10.6 in 10.7), saj se volumen filtrata v tem primeru močno zmanjša.



Slika 10.6: Izračunan volumen filtrata iztisnjene iz refula v odvisnosti od upornosti filtra.

Figure 10.6: Calculated filtrate volume, from dredged marine sediment suspension, versus time and filter resistance.



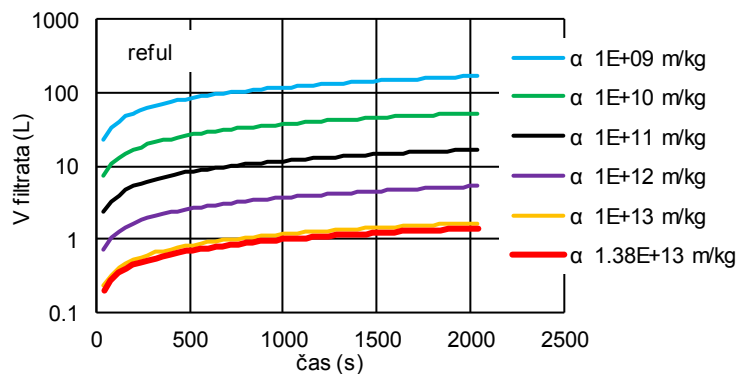
Slika 10.7: Izračunan volumen filtrata iztisnjene iz sadre v odvisnosti od upornosti filtra.

Figure 10.7: Calculated filtrate volume, from red gypsum suspension, versus time and filter resistance.

10.4.3 Vpliv upornosti filtrskega kolača

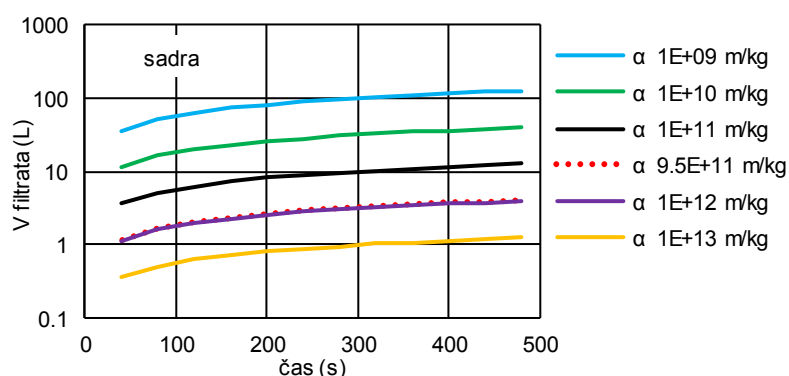
Upornost filtrskega kolača (α) smo variirali skladno s Preglednico 10.1 (od $1.0\text{E}+9 \text{ m/kg}$ do $1.0\text{E}+13 \text{ m/kg}$). Ostali tehnološki in materialni parametri so upoštevani po Preglednicah 10.3 in 10.5. Rezultati izračunov so prikazani na Slikah 10.8, 10.9 in 10.10. Vidimo, da je upornost filtrskega kolača tista, ki bistveno vpliva na izračunan volumen filtrata in debelino filtrskega kolača.

Z analizo vpliva upornosti filtrskega kolača na učinkovitost filtracije smo pokazali na pomen dobrih materialnih parametrov v izračunih. Upornost filtrskega kolača je najpreprosteje in najbolj natančno določljiva iz poskusnih testov tlačne filtracije, kot smo pokazali za reful iz Luke Koper. Lahko pa jo določimo tudi računsko iz merjene vodoprepustnosti filtrskega kolača in iz testov ožemanja na dejanskih ožemalnih napravah, kot smo to storili za sadro.



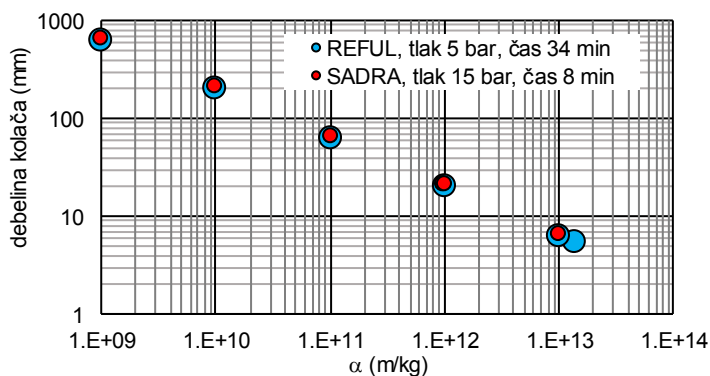
Slika 10.8: Izračunan volumen filtrata iztisnjene iz refula v odvisnosti od upornosti kolača.

Figure 10.8: Calculated volume of filtrate, from dredged mud suspension, versus time and filter cake resistance.



Slika 10.9: Izračunan volumen filtrata iztisnjene iz sadre v odvisnosti od upornosti kolača.

Figure 10.9: Calculated volume of filtrate, from red gypsum mud suspension, versus time and filter cake resistance.



Slika 10.10: Izračunana debelina kolača v odvisnosti od upornosti kolača.

Figure 10.10: Calculated height of the filter cake versus filter cake resistance.

10.5 Opis tlačne filtracije s konsolidacijo v edometru

Z opisom filtracije s konstantnim tlakom, z linearnim modelom, smo pokazali, da so za pravilnost računa ključni vhodni materialni in tehnološki parametri. Rezultati izračunov so odvisni predvsem od upornosti filtrskega kolača, ki je v veliki meri odvisna od lastnosti trdnine v suspenziji, tlaka na stiskalnici in časa filtracije. Vplivov variacije tlaka v izračunih nismo preverjali, saj iz merjenih vrednosti poskusne filtracije nismo uspeli določiti parametra upornosti kolača za različne tlake.

Parameter upornosti filtrskega kolača smo poskusili določiti iz rezultatov edometriške preiskave stisljivosti in iz meritev vodoprepustnosti. Preiskava stisljivosti sicer poteka v več bremenskih stopnjah, ki trajajo bistveno dlje časa kot tlačna filtracija na ožemalnih napravah. Prednost določanja parametra upornosti kolača iz edometriške preiskave so natančno definirani robni pogoji in materialni parametri. Za vsako bremensko stopnjo lahko po klasičnih geomehanskih zvezah izračunamo: količnik por (e), vlago v zasičenem stanju (w_{sat}) in koncentracijo »kolača« v edometru (C).

Rezultati laboratorijskih preiskav refula in mulja sadre, ki smo jih upoštevali v izračunih parametra α , so podani v Preglednici 10.6.

Preglednica 10.6: Materialni parametri muljev v izračunih parametra α .

Table 10.6: Material parameters of mud used in the calculations of parameter α .

Parameter	Reful	Sadra
gostota zrn, ρ_s (t/m^3)	2750	2360
začetni količnik por (pri ca. 1kPa), e_0	2.0	2.2
koeficient konsolidacije, C_c	0.42	0.37
parametra za opis funkcije vodoprepustnosti zasičene zemljine, a b	$a = -11.5$ $b = 1.53$	$a = -10.47$ $b = 1.74$

Rezultati izračunov so za reful podani v Preglednici 10.7, za mulj sadre pa v Preglednici 10.8. Poleg upornosti filtrskega kolača smo za različne obremenitve določili tudi količnik por (e), vlago v saturiranem stanju (w_{sat}), volumsko koncentracijo (C) in vodoprepustnost (k). Upornost filtrskega kolača smo izračunali po enačbi (10.6.).

Preglednica 10.7: Kolač refula – izračun filtracije iz edometriških preiskav stisljivosti.

Table 10.7: Dredged marine sediment filter cake – calculation from oedometer tests.

σ' (kPa)	e (-)	w_{sat} (%)	C (-)	k (m/s)	κ (m ²)	α (m/kg)
75	1.21	44.1	0.45	2.3E-10	2.3E-17	3.5E+13
125	1.12	40.7	0.47	1.6E-10	1.7E-17	4.6E+13
250	0.99	36.1	0.50	1.0E-10	1.1E-17	6.8E+13
500	0.87	31.5	0.54	6.7E-11	6.8E-18	9.9E+13
1000	0.74	26.9	0.57	4.3E-11	4.4E-18	1.4E+14
1500	0.67	24.2	0.60	3.3E-11	3.4E-18	1.8E+14
2000	0.61	22.3	0.62	2.7E-11	2.8E-18	2.1E+14

Preglednica 10.8: Kolač sadre – izračun filtracije iz edometriških preiskav stisljivosti.

Table 10.8: Red gypsum filter cake – calculation from oedometer tests.

σ' (kPa)	e (-)	w_{sat} (%)	C (-)	k (m/s)	κ (m ²)	α (m/kg)
75	1.52	55.1	0.40	1.5E-08	1.5E-15	6.1E+11
125	1.43	52.2	0.41	1.1E-08	1.1E-15	8.2E+11
250	1.32	48.2	0.43	6.8E-09	7.0E-16	1.2E+12
500	1.21	44.2	0.45	4.4E-09	4.5E-16	1.8E+12
1000	1.11	40.2	0.48	2.8E-09	2.9E-16	2.6E+12
1500	1.04	37.8	0.49	2.2E-09	2.2E-16	3.3E+12
2000	1.00	36.2	0.50	1.8E-09	1.9E-16	3.9E+12

Vidimo, da je upornost filtrskega kolača, določena iz laboratorijskih edometriških preiskav, enakega velikostnega reda, kot tista iz poskusnega ožemanja na pilotnih napravah in stiskalnicah. Iz edometriških preiskav napovedane upornosti filtrskega kolača so približno za faktor 3 višje od tistih, iz vrednotenih iz poskusnih ožemanj (Preglednici 10.7 in 10.8 rumeno pobarvana vrstica).

Ugotovili smo, da lahko iz edometriških preiskav ustrezno določimo upornost filtrskega kolača. Poleg tega lahko za vsako bremensko stopnjo (različen tlak stiskanja) izračunamo tudi vlago in gostotno stanje materiala.

10.6 Zaključek

Z uporabo preprostih zvez za filtracijo suspenzij smo pokazali, da lahko ustrezno opišemo modelne poskuse tlačne filtracije. Izračunan in merjen volumen filtrata sta za enake tehnološke in materialne parametre ožemanja, primerljiva.

Izračunana debelina filtrskega kolača je manjša od merjene. Odstopanje pojasnjujemo s preprostostjo modela in z morebitno dvosmerno filtracijo na dejanskih filtrskih stiskalnicah v Celju.

Računi kažejo, da bi bilo ožemanje suspenzije refula manj učinkovito od ožemanja suspenzije sadre, kar se je pokazalo tudi s poskusnim ožemanjem in je posledica nižje prepustnosti refula.

Analiza vplivov parametrov na rezultate izračuna je pokazala, da:

- lahko upornost filtra v izračunih zanemarimo,
- upornost filtrskega kolača bistveno vpliva na izračunane vrednosti.

Pokazali smo, da lahko upornost kolača izračunamo iz rezultatov preiskav stisljivosti v edometru. Izračunane vrednosti so za enak tlak primerljive določenim iz poskusne filtracije. Iz meritev v edometru lahko za vsako obremenitev (tlak stiskanja) izračunamo tudi vlago v saturiranem stanju in gostotno stanje materiala.

11 RAZPRAVA K NAJPOMEMBNEJŠIM UGOTOVITVAM

11.1 Rezultati eksperimentov

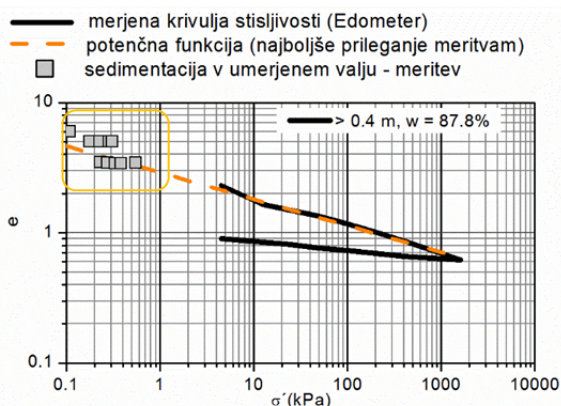
11.1.1 Temeljna vprašanja pred izvedbo eksperimentov

Program eksperimentov smo zasnovali in izpeljali z namenom, da preverimo, ali so raziskovalne metode za preiskovanje zemljin primerne, dovolj natančne, dovolj občutljive in dovolj zanesljive za raziskovanje muljev.

Deformabilnost

Mulji, ki se iz naravnega geološkega okolja transportirajo in kopičijo v umetnih akumulacijah na kopnem, so po mineralni in zrnastni sestavi podobni zemljinam, po poroznosti in količini vsebovane vode pa suspenzijam.

V diagramu edometrske preiskave ($\sigma'-e$) se mulji nahajajo na skrajnem levem zgornjem robu oz. na začetnem delu deviške kompresijske krivulje. To je del krivulje, do katerega večina zemljin iz gradbenih tal ne seže (Slika 11.1, sivi simboli).



Slika 11.1: Količnik por refula pri t.i. nični efektivni napetosti.

Figure 11.1: Zero effective vertical stress void ratio of dredged marine sediment.

Nedrenirana strižna trdnost

Vsebnost vode je v muljih višja od referenčne vlage pri meji židkosti, kar pomeni, da je nedrenirana trdnost nižja od 1-3 kPa. Pri tako nizkih trdnostih, meritve z UU triosnim in enoosnim tlačnim preizkusom niso možne. Na voljo ostajata samo konus in krilna sonda v laboratoriju ter terenski preizkusi CPTu, DMT in terenska krilna sonda. Ali so te »sprejemljive« metode tudi v resnici dovolj občutljive in natančne, da lahko z njimi izmerimo nedrenirano strižno trdnost mulja?

Strukturni naboj na površini zrn in osmotska sukcijska

Mulji iz morskega dna in industrijski mulji, ki se umetno kopičijo v akumulacijah na kopnem, so na prvi pogled podobni kopenskim muljem in se v praksi največkrat identificirajo z meritvami zrnastne sestave. To je ena najpogostejših in tudi usodnih napak. V muljih iz morja in industrije so v porni vodi

prisotne različno visoke koncentracije različnih vrst soli. Te soli vplivajo na totalno in osmotsko sukucijo in na strukturni naboj na površini zrn trdnine.

Pri identificiranju lastnosti morskih in industrijskih muljev se zato najprej soočimo z vprašanjem pravilne klasifikacije. V Atterbergovih mejah plastičnosti, ki so osnova za klasifikacijo drobno zrnatih zemljin, sta oba merjena parametra, w_p in w_L , odvisna od strukturnega naboja oz. adsorpcijske sposobnosti površine zrn za polarne molekule vode. Če je v destilirani vodi mulj klasificiran kot mastna glina (CH), se lahko zgodi, da bo zaradi dodatnih kationov v morski vodi, klasifikacija tega sedimenta drugačna, npr. nizkoplastična glina (CL).

Osmotska sukucija, prisotna v zemljinah s solmi v porni raztopini, vpliva na sušenje, trdnost, stratifikacijo in togost plasti. V morskem/industrijskem mulju, ki se suši, nastaja na površini suha skorja, v kateri narašča koncentracija soli. V slanih muljih poteka sušenje sprva podobno kot v sladkovodnih muljih, v nekem določenem trenutku pa se sušenje upočasni in celo zastane. Ta, imenujmo jo »kritična točka sušenja«, je različna za različne vrste sedimentov, pornih raztopin in termodinamskih pogojev v talnem profilu. Pomembno je, da se njenega obstoja in pomena zavedamo in za izbrane sedimente, te pogoje tudi določimo.

Tiksotropija

Tiksotropija geoloških zemljin je malo znan in v osrednji Evropi redko raziskovan fenomen, poznajo pa ga nordijske države in Kanada na materialih tipa »quick clay«. Posledice tiksotropnega tečenja (Slika 11.2) so po usodnosti dogodkov najmanj primerljive z likvifakcijo ob potresu ali celo bolj usodne od nje.



Slika 11.2: Plaz Kattmarka 2009; tiksotropen material »quick clay« (Helle et al., 2016).

Figure 11.2: Kattmarka landslide 2009, »quick clay« with thixotropic behavior (Helle et al., 2016).

V geotehniki se s posledicami tiksotropnega tečenja praviloma srečujemo ob poružitvah pregrad za akumulacijo industrijskih muljev. Pri načrtovanju ravnanj z mulji je poznavanje tiksotropije in drugih reoloških lastnosti pomemben parameter in ga je treba vključiti v nabor projektnih parametrov, čeprav ni v stalni domeni geomehanskih laboratorijev.

Raba veziv za izboljšanje mehanskih lastnosti muljev

Anorganska veziva se za izboljšanje in stabilizacijo zemljin uporabljajo že več kot 2000 let. Vendar pa se v zemljinah njihova raba omejuje na razmeroma ozko območje vlažnosti, ki je običajno med vlago zemljine pri meji plastičnosti in vlago zemljine, ki je nekje med vlagama pri meji plastičnosti in mejo židkosti. Raba veziv pri vlagah na meji židkosti ali celo nad njo ni primerna. Ker imajo mulji vlago vselej nad mejo židkosti, je potrebno ugotoviti, pri kateri mejni vlagi ožemanja postane raba veziv smotrna in racionalna, pa tudi, ali prisotne soli vplivajo na potek pridobivanja trdnosti.

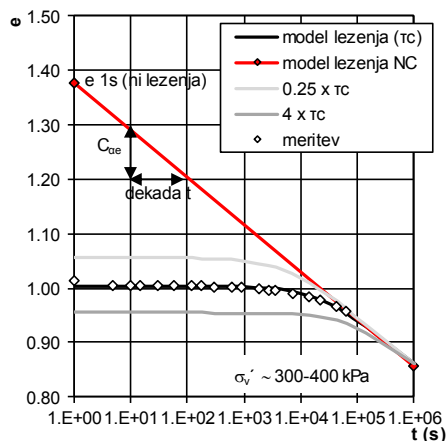
11.1.2 Odgovori po izvedbi eksperimentov

Deformabilnost

Za ocenjevanje deformabilnosti preiskovanih muljev v zgornjih delih akumulacij terenske meritve CPTu s konusom in DMT niso primerne, ker so za rahle mulje premalo natančne, za mulje z visokim učinkom lezenja pa prehitre.

Glavna pomanjkljivost edometriške raziskave je v tem, da v celico ni moč vgraditi mulja v stanju maksimalne poroznosti (e_{max}). Zato tudi ni moč opisati dogajanj v zgodnji fazi usedanja suspenzije v akumulacijskih bazenih, to je v času, ko se zemljinska struktura mulja šele vzpostavlja. Z uporabo Enslin –Neff preiskave in preiskave prostega sedimentiranja z določitvijo vodnega faktorja usedline, pa lahko posredno izračunamo količine izcejene vode in ocenimo velikost deformacij v času vzpostavljanja strukture (Slika 11.1).

Z raziskavami smo potrdili predhodno že zaznano (Petkovšek, 2014) izrazito lezenje sadre. Ugotovili smo, da na časovnih sovisnicah konsolidacije mulja sadre, ni moč ločiti primarne in sekundarne faze konsolidacije, saj so že v primarni fazi prisotni močni učinki lezenja, ki so tudi ključni za realno ocenitev računskih posedkov mulja pod obtežbami na površini. Zato je treba interpretacije edometriških raziskav za bremenske stopnje, ki ne trajajo tako dolgo, da bi krivulja lezenja prešla v logaritemsko premico, se pa nakazuje prevoj, v takih primerih prilagoditi. Enega od možnih pristopov smo podrobno opisali v poglavju 8, koncept tega pristopa pa je prikazan na Sliki 11.3. Z rabo takega pristopa se izračunani posedki dobro skladajo z merjenimi.



Slika 11.3: Določanje parametrov $C_{\alpha e}$ in τ_c za prekonsolidirano sadro.

Figure 11.3: Determination of parameters $C_{\alpha e}$ and τ_c for overconsolidated red gypsum mud.

Nedrenirana strižna trdnost

Standardne terenske metode DMT in CPT so premalo natančne za in-situ merjenje trdnosti mulja v zgornjih delih akumulacij, zato bi morali sonde preoblikovati. Pri CPT testu smo preverili rabo krogle namesto konusa. Rezultati so zelo obetajoči.

Ugotovili smo tudi, da bi morali pri poročanju o terenskih meritvah CPT dodati poročila o natančnosti naprave, saj se podatki za različne naprave močno razlikujejo in cela vrsta CPT naprav ni primerna za preiskovanje muljev.

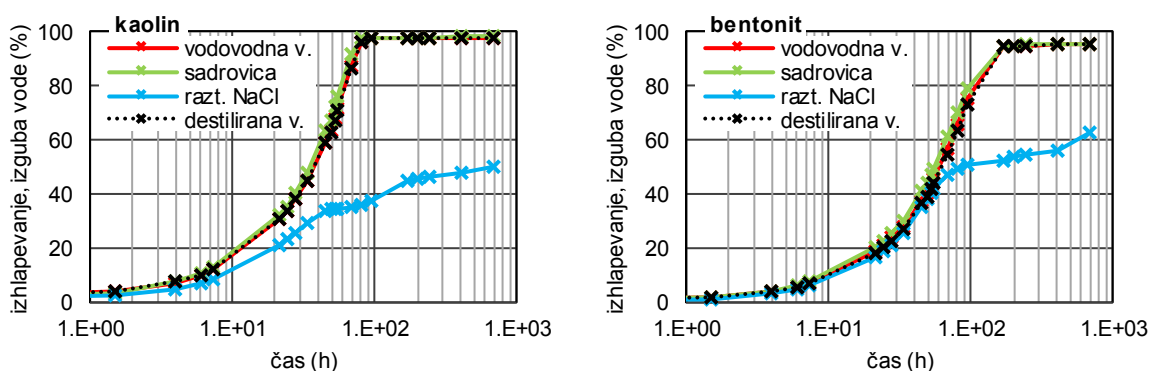
S primerjavo terenskih in laboratorijskih raziskav smo tudi ugotovili, da je treba pri vrednotenju rezultatov terenskih preiskav korigirati računске vhodne parametre za drenirano strižno trdnost in gostoto zrnja, saj le ti vplivata na izvedenoten rezultat meritve. Izpeljali smo korekcijsko enačbo za rabo v mulju sadre. Njeno veljavnost bi morali preveriti z meritvami tudi na drugih materialih.

Laboratorijske meritve s klasično krilno sondo, namenjeno delu z zemljinami in krilno sondo, nameščeno na naprednejšem reometru, kažejo dobro ujemanje. Primerjava meritev s krilno sondo na terenu in v laboratoriju na bolj zgoščenem mulju pa kaže, da v laboratoriju merimo rezidualno trdnost.

Strukturni naboj na površini zrn in osmotska sukcija

Ugotovili smo, da pri materialih z mejo židkosti pod ca. 110%, vrsta porne raztopine ne vpliva na klasifikacijo po USCS sistemu klasifikacije. Vplivi se pokažejo šele pri zelo plastičnih, bentonitnih glinah.

Zato pa imata sestava porne vode in osmotska sukcija pomemben vpliv pri sušenju muljev. Pri tem je pomembna kombinacija vplivov vrste soli v porni vodi in vrste sedimenta oz. njegove retencijske krivulje. V slano porno vodo zasičenih glinah se proces zračnega sušenja upočasni in se lahko v celoti zaustavi tudi pri relativno visoki vsebnosti vlage na zraku sušenega materiala (Slika 11.4).



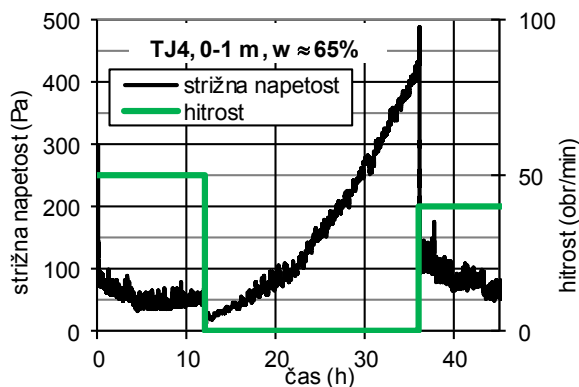
Slika 11.4: Izhlapevanje v različnih raztopinah kot % izgubljene vode v odvisnosti od časa.

Figure 11.4: Time dependent transpiration as the % of evaporated water.

Tiksotropija

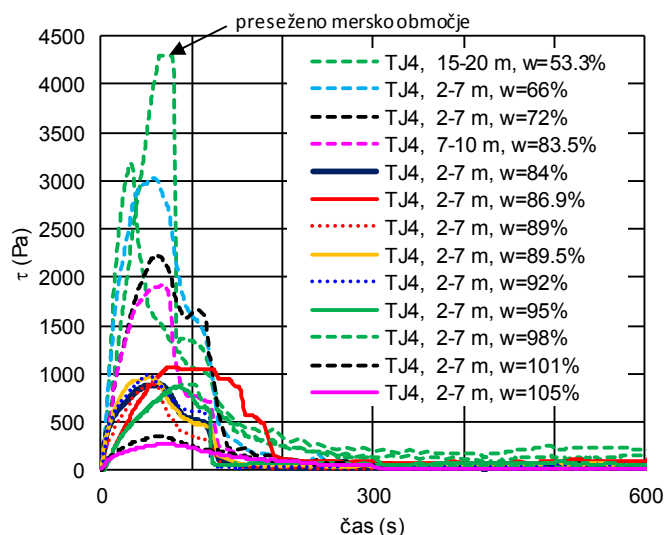
Z reometrijskimi raziskavami smo uspeli dobro identificirati občutljivost in tiksotropne lastnosti preiskovanih muljev. Reful je malo občutljiv in ni nagnjen k tiksotropiji. Mulj sadre je po izmerjenih

lastnostih zelo občutljiv, z izrazito izraženo tiksotropijo in je po obnašanju podoben obnašanju glin tipa »quick clay« (Slika 11.5). Na muljih sadre nas je presenetil popoln upad strižne odpornosti po poružitvi, ne glede na začetno vlago in vrhunsko trdnost (Slika 11.6).



Slika 11.5: Tiksotropija mulja sadre.

Figure 11.5: Thixotropy of red gypsum mud.

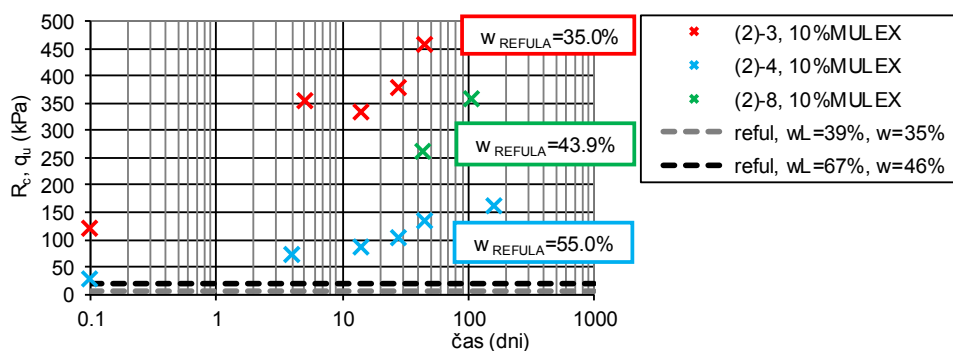


Slika 11.6: Upad τ v različno vlažnih preizkušancih mulja sadre.

Figure 11.6: Decrease of τ in red gypsum mud at different water content.

Raba veziv za izboljšanje mehanskih lastnosti muljev

Raba veziv za izboljšanje lastnosti muljev v usedalnih bazenih ni perspektivna. Mulj je potrebno predhodno ožeti na vlage globoko pod mejo židkosti, pa tudi v tem primeru so dosežene trdnosti po izboljšanju z vezivi reda velikosti pod 350 - 450 kPa (Slika 11.7), kar je v cestogradnji običajno merilo kakovosti. Kolikšen je negativni učinek soli na razvoj vezanja in dolgoročno volumsko stabilnost mešanic nismo raziskovali. Izmerjen časovni prirast trdnosti je, z vidika izboljšanja zemljin, kjer učinke pričakujemo po 4 oz. 7 dneh, počasen.



Slika 11.7: Časovni prirast tlačne trdnosti mešanic refula in 10 m% MULEXa .

Figure 11.7: Time dependent increase of compressive strength of mixtures from dredged marine sediment and 10 m% of MULEX.

11.2 Modeliranje obnašanja muljev v različnih pogojih zniževanja vlage

Prioritetni cilj ravnanja z mulji iz vodnih okolij je znižanje vlage, saj se z znižanjem vlage spreminjajo vse druge lastnosti muljev: gostota, trdnost, deformabilnost, tiksotropija, prepustnost za vodo, osmotska sukcija in druge. Z eksperimenti smo identificirali mejne oz. ciljne vrednosti vlage, pri katerih se spremenijo bistvene mehanske lastnosti sedimenta.

S podatki, pridobljenimi z eksperimenti, smo preverili veljavnost materialnih modelov, s katerimi lahko posredno ocenimo dogajanja pri zniževanju vlage pri naslednjih procesih:

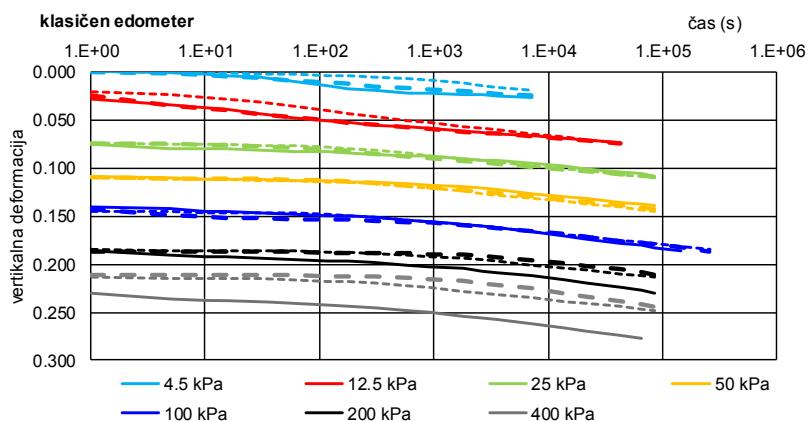
- konsolidacijskem lezenju,
- zračnem sušenju,
- ožemanju na tlačnih filtrih.

11.2.1 Konsolidacijsko lezenje

Z izračuni s SSC modelom v Plaxisu smo zadovoljivo opisali obnašanje muljev v edometru (Slika 11.8). Ugotovili smo, da je pri mulju sadre, ki izkazuje izrazito lezenje, ki se akumulira iz zgodovine preizkušanca, izjemno pomemben zadosten in enak čas trajanja posameznih bremenskih stopenj v edometru. Samo na ta način krivulja sekundarne konsolidacije preide v logaritemsko premico. Pomembno je tudi, da si obremenitve sledijo v enakem prirastu (npr. vsaka naslednja je dvakratnik predhodne).

Za bremenske stopnje, ki so trajale prekratek čas in/ali si obremenilni intervali niso sledili v enakem prirastu (npr. 300 kPa – 400 kPa, Slika 11.3), krivulja lezenja pa ni prešla v logaritemsko premico (prevoj se je samo nakazoval), smo predlagali postopek (model) za določitev koeficienta sekundarnega stiskanja (Slika 11.3).

Pokazali smo, da izračunane krivulje deformacijskega obnašanja bolje sledijo merjenim (Slika 11.8, polne linije), če v izračunih za vsako bremensko stopnjo, upoštevamo dejanski, iz edometriških preiskav izvrednoten parameter $C_{\alpha e}$ (Slika 11.8, linije iz daljših črtic) in ne enotnega za celotno preiskavo, kot je to običajno v geotehničnih izračunih (Slika 11.8, linije iz krajših črtic).



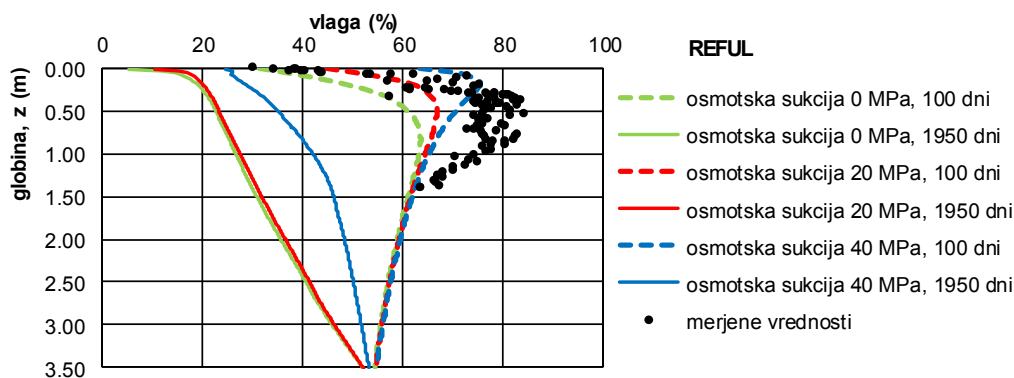
Slika 11.8: Primerjava rezultatov meritev (polne črte) in izračuna (črtkane črte) za klasičen test v edometru.

Figure 11.8: Comparison of calculated (dashed lines) and measured (solid lines) values for oedometer test.

11.2.2 Zračno sušenje

Ugotovili smo, da enostavni 1D modeli za izračun sušenja mulja v akumulaciji splošno ne delujejo. Izračunov s programom CONDENSE nismo izvajali, saj je že prof. Znidarčič ugotovili, da numerični izračuni prenehajo delovati ob prvem upadu evaporacije in sukcije (Znidarčič, 2007). Zaključil je, da je s tem kršena ena od temeljnih predpostavk teorije sušenja, ki pravi, da je zemljina izpostavljena le monotoni obremenitvi.

Poskusna uporaba 1D modela sušenja (Maček, 2012) kaže, da ta ni splošno veljaven. Za gline (reful, plazina na plazu Slano blato) lahko določimo enotne materialne parametre, vendar pa moramo v modelnih izračunih korigirati robne pogoje. V izračunih sušenja refula smo evapotranspiracijo močno zmanjšali z upoštevanjem korekcije robnega pogoja za vpliv osmotske sukcije. Sušenje smo za čas mirovanja kasete, primerljiv dejanskemu, kljub temu precenili (Slika 11.9) Za mulj sadre in v kontrolnem izračunu za kameno moko pa na način, kot ga podaja avtor modela, nismo uspeli določiti enotnih materialnih parametrov za izračune. Na Sliki 11.9 vidimo, da smo za reful najboljšo napoved sušenja dobili pri času 100 dni.



Slika 11.9: Računska vlaga po globini, za čas mirovanja 100 dni in 1950 dni, primerjalno z meritvami vlage na vzorcih iz vrtin.

Figure 11.9: Calculated water content along the depth for the resting time 100 days and 1950 days in comparison with measured data.

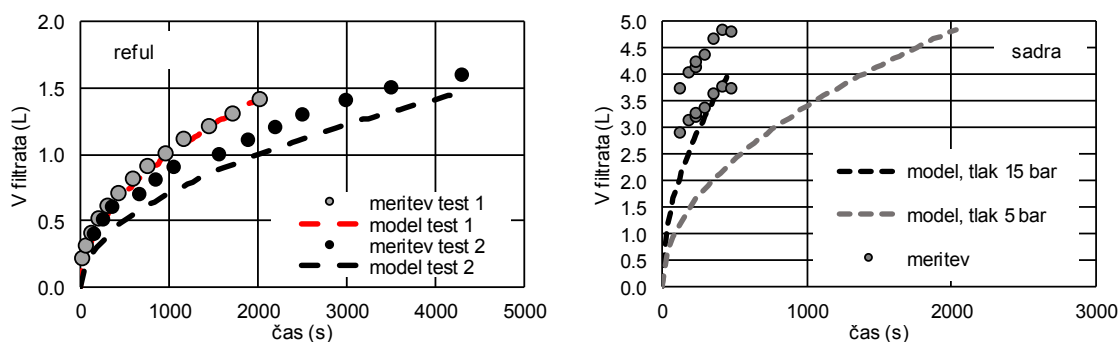
Kaže se, da bi za simulacijo dejanskega sušenja potrebovali bolj kompleksne 3D modele in bistveno več vhodnih podatkov, ki bi jih lahko pridobili z lizimetri.

11.2.3 Ožemanje na tlačnih filtrih

Z uporabo preprostih zvez za filtracijo suspenzij smo pokazali, da lahko ustrezno opišemo laboratorijske modelne poskuse tlačne filtracije in tlačno filtracijo na dejanskih stiskalnicah (Slika 11.10).

Pokazali smo, da lahko upornost kolača izračunamo iz rezultatov preiskav stisljivosti v edometru. Izračunane vrednosti so za enak tlak primerljive določenim iz poskusne filtracije. Iz meritev v edometru lahko za vsako obremenitev izračunamo tudi vlago v saturiranem stanju in gostotno stanje materiala.

Za vrednotenje dejanske učinkovitosti ožemanja pa so neobhodno potrebni pilotni preizkusi na realnih filtrskih stiskalnicah.



Slika 11.10: Primerjava rezultatov tlačne filtracije suspenzije refula (levo) in mulja sadre (desno), z izračunanimi vrednostmi s parametri po Preglednicah 10.3 in 10.5.

Figure 11.10: Pressure filtration – values calculated by using parameters given in Tables 10.3 and 10.5 (dashed lines) and measured values (dots). Figure left – dredged marine sediment suspension and right – red gypsum mud suspension.

12 ZAKLJUČKI

12.1 Povzetek ugotovitev opravljenega dela

Mulji so drobno zrnati, z vodo zasičeni sedimenti v zelo rahlem stanju. Predstavljajo začetno fazo v nastajanju zemljin v sedimentacijskem bazenu, ki je lahko v morju ali na kopnem. Tekoči mulj se pri zračnem sušenju spremeni v navidezno trdno, a hidrofilno skorjo (angl. *dry crust*).

V nalogi smo raziskovali in preučevali, ali so terenske in laboratorijske raziskave ter materialni modeli, uveljavljeni za preiskovanje zemljin, primerni tudi za raziskovanje lastnosti in napovedovanje obnašanja muljev pod dodatnimi normalnimi in strižnimi napetostmi, v času sušenja in pri pogojih tlačne filtracije.

V raziskavo smo vključili dva značilna tipa anorganskih muljev, ki v velikih količinah nastopata v Sloveniji in po svetu, to je morski sediment - reful v Luki Koper in kemična sadra iz proizvodnje titanovega dioksida v Celju. Posebnost obeh sedimentov je, da imata zaradi soli v porni vodi visoko osmotsko sukcijsko.

Terenske preiskave smo opravili s sondiranjem. Meritve s CPT, DMT in s krilno sondo smo dopolnili z vzorčenjem, vzorce pa raziskali v laboratoriju z uporabo standardnih in nestandardnih geomehanskih metod ter s postopki za preučevanje reoloških lastnosti materialov.

V okviru naloge smo prvič v Sloveniji na terenu preučili delovanje CPT sonde z uporabo krogle namesto konusa in v laboratoriju izvedli reološke raziskave z uporabo dveh tipov koaksialnih valjastih reometrov, ki po osnovni zasnovi nista namenjena preučevanju zemljin. Prvič smo v Sloveniji z meritvami tudi ovrednotili velikost in gibanje osmotske sukcijske in njen vpliv na sušenje.

Z reološkimi raziskavami smo ovrednotili občutljivost preiskovanih muljev in opredelili značaj njihovega tiksotropnega obnašanja.

Z analizami podatkov meritev smo ugotovili, da sta občutljivost in natančnost terenskih metod, pri meritvah s standardno CPT in DMT sondo premajhni za raziskovanje lastnosti muljev v fazi sedimentacije. Pokazali smo, da tudi v fazi konsolidacije, semiempirične enačbe, vgrajene v programsko opremo za vrednotenje trdnostnih lastnosti mulja, ne veljajo, ampak jih je treba korigirati. Za izbrane mulje smo predlagali korekcije standardnih postopkov vrednotenja. Z upoštevanjem predlaganih korekcij se iz vrednotenih rezultatov terenskih meritev dobro prilegajo rezultatom laboratorijskih analiz.

Ugotovili smo, da je treba pri načrtovanju raziskav muljev predpisati natančnost merilne opreme oz. natančnost postopkov za merjenje, podobno kot to velja za kemične analize.

Dokazali smo, da terenske metode CPT in DMT niso primerne za določanje deformacijskih lastnosti muljev z visokim lezenjem.

12.2 Uresničitev ciljev naloge

Z nalogo smo uresnili in vsebinsko razširili in nadgradili vse, na začetku postavljene cilje, tako kot so predstavljeni v poglavju 1.2. V vsebinsko zaokroženih celotah smo v poglavjih 4 do 10 predstavili postopke dela, rezultate raziskav in evalvacije materialnih modelov, s poudarki na grafičnih predstavitev rezultatov eksperimentov in računskih modelov.

12.3 Evalvacija hipotez

Hipoteza 1: Z ožemanjem je možno reful iz Luke Koper osušiti do takšne vlage, da za odlaganje ne bo potrebna gradnja bazenov, začasno odlaganje pa bo možno tudi v večje višine. Ožemanje ima prednost pred sušenjem, saj pri ožemanju ne narašča količina soli.

To hipotezo smo potrdili.

Poskusno ožemanje suspenzije refula na laboratorijskem nivoju so s tlačno filtracijo opravili na Kemijskem inštitutu v Ljubljani. Izmerjena vlaga kolača je, podana v obliki koncentracije ca 27%, preračunana na gravimetrično vlago pa okoli 36%. Dokazali smo, da lahko z materialnim modelom z uporabo podatkov naših raziskav, dobro opišemo potek tlačne filtracije. Potrdili smo hipotezo 1, to je, da bi filtrski kolač lahko narivali v deponije, ne da bi zanje potrebovali dodatne varovalne nasipe. Dosežena suha gostota ožetega kolača je okoli $1.3 - 1.4 \text{ t/m}^3$, vendar pa to ni pričakovana končna suha gostota deponiranega kolača, ki bi bila nižja, saj kolača pri vlagi 37% ni moč komprimirati.

Ugotovili smo tudi, da s tlačno filtracijo ni moč dosežati takega stanja vlage in gostote kolača, da bi le tega lahko vgrajevali v zemeljske objekte s komprimiranjem, brez dodatne stabilizacije z vezivi. Za bolj učinkovito ožemanje bi morali suspenziji morskega mulja dodajati flokulante, da bi znižali naboj na zrnih in šele nato pristopiti k tlačni filtraciji.

Z raziskavami smo ugotovili, da sta sedimentacija in sušenje mulja v kasetah v Luki Koper neučinkovita. Vlaga refula ostaja visoko nad mejo židkosti vzdolž celotne višine sedimenta v kaseti, suha gostota je manjša od 0.9 t/m^3 . Razlog za tako rahlo stanje je v kombinaciji več vplivov in sicer:

- visoke plastičnosti in nizke prepustnosti morskega sedimenta,
- neprepustne podlage na dnu kaset,
- naraščanja osmotske sukcije v površinski skorji med sušenjem in
- konkavne površine, zaradi katere se v kasetah ob padavinskih dogodkih nabira voda, ki saturira razpoke.

Ugotovili smo, da lahko s podatki merjenih edometrijskih krivulj stisljivosti, retencijskih krivulj ter krivulje krčenja razmeroma dobro nakažemo potek procesov med sušenjem v globino, vendar pa podatkov meritev z uporabljenim računskim modelom (Maček, 2012) ne moremo potrditi.

Hipoteza 2: *Cement in apno, ki se uporabljata kot klasični vezivi, lahko ekvivalentno nadomestimo z alternativnimi vezivi kot sta papirniški in elektrofiltrski pepel. S količinami dodanega veziva lahko narekujemo trdnostne in deformacijske lastnosti mešanice refula in veziva.*

Pred potrditvijo te hipoteze moramo poudariti pomen vlage refula. Raziskave so pokazale, da je raba veziv za izboljšanje mehanskih lastnosti refula v kasetah neracionalna, ker je vlaga refula previsoka. Pred rabo veziv je treba reful dodatno ožeti in sicer na vlage pod 50%, za doseganje optimalnih učinkov veziv pa pod 40%. Preverili smo rabo klasičnih veziv, apna in cementa ter dveh veziv iz alternativnih virov. Ugotovili smo, da je pri dodajanju veziv najbolj pomembna začetna vlaga refula, saj ta vpliva na velikost tlačne trdnosti. Potrdili smo hipotezo, da lahko z vezivom iz alternativnega vira - to je papirniški EF pepel MULEX, ekvivalentno nadomestimo klasična veziva, vendar pa so količine potrebnih dodatkov, vrednoteno z vidika zemljin, previsoke (10%).

Pri izvedbi eksperimentov in analizi rezultatov le teh za potrebe evalvacije hipoteze 2 smo prišli do podobnih zaključkov kot pri evalvaciji hipoteze 1. Za učinkovito rabo veziv bi morali refulu najprej z dodajanjem flokulantov znižati površinsko aktivnost, s tlačno filtracijo znižati vlago in šele nato pristopiti k dodajanju veziv.

Hipoteza 3: *Površinske plasti mulja sadre, odloženega v akumulaciji, bi se hitreje zgoščale in konsolidirale, če ne bi bile ojezerene.*

To hipotezo smo potrdili z več eksperimenti. Najprej smo z laboratorijskim eksperimentom sušenja ugotovili, da zasičena sadrovica (porna tekočina) ne zavira sušenja, kar pa se zgodi v primeru, če je porna voda zasičena z natrijevim kloridom. Nato smo z meritvami krčenja ugotovili, da se mulj sadre suši do količnika por približno $e = 1$, to pomeni do suhe gostote okoli 1.15 t/m^3 .

Na refulu smo s terenskimi meritvami potrdili potek sušenja po globini in z materialnim modelom opisali pravi trend razvoja sušenja, ne pa tudi absolutnih vrednosti. Za mulj sadre pa zaradi kompleksnosti dogajanj, z modelom ni bilo moč opisati poteka sušenja po globini.

Hipoteza 4: *Mulji sadre so tiksotropni. Tiksotropno obnašanje je močno odvisno od vlage. Z merjenjem in modeliranjem reoloških parametrov lahko identificiramo kritične meje suhe gostote, pod katero se navidezno strukturirane sadre lahko utekočinijo. Laboratorijsko izmerjene podatke bomo primerjali s podatki o lastnostih odloženih plasti v akumulaciji in identificirali globine, do katerih lahko pride do utekočinjenja.*

To hipotezo smo potrdili. Mulji sadre imajo visok indeks občutljivosti in imajo močno izraženo tiksotropijo. Mejna napetost je močno odvisna od vlage, po poružitvi pa vpliva vlage ni zaslediti. Po utekočinjenju je preostanek strižne trdnosti neodvisen od začetne vlage, saj ne glede na količino vode, sadra tiksotropno teče. Eksperimente smo v laboratoriju izvedli z uporabo dveh tipov vreten in za različne vlage mulja nad 53%. Meritve kažejo, da je v obstoječih akumulacijah mulja sadre, le ta po celotni višini akumulacije izpostavljen tiksotropnemu tečenju v primeru poružitve pregrade. Z raziskavami smo tudi potrdili, da so bile ocenjene vrednosti, upoštevane v računih hidravličnih

posledic morebitne porušitve pregrade Bukovžlak (Četina et al., 2010) pravilne (primer P 2) in so sedaj potrjene tudi z eksperimentalnimi podatki.

12.4 Naloga in njen prispevek k znanosti

Zadnja leta se geomehanske raziskave in geotehnična dela vse bolj selijo iz geoloških tal na umetna tla, med katera sodijo tudi akumulacije muljev. Izkušnje iz številnih akumulacij muljev so pokazale, da so bili pristopi h geotehničnim raziskavam, vrednotenju rezultatov raziskav in k sami gradnji napačni, številna dela je bilo potrebno prekiniti in so ostala nedokončana. Največkrat se je pokazalo, da so bili podatki o trdnostnih in deformacijskih lastnostih mulja precenjeni oz. preoptimistični. Pomemben prispevek naloge h geotehničnim znanostim je naslednji:

1. Za preiskovanje muljev v akumulacijskih bazenih je potrebno uporabljati opremo (CPT, DMT) z natančno opredeljeno natančnostjo meritev. Konuse in DMT sonde bi morali prilagoditi nizkim trdnostim mulja s povečanjem površine merilne sonde.
2. Tudi pri bolj gostih muljih je treba upoštevati specifično naravo mulja (gostoto zrnja, efektivni trenjski kot, ki je pri muljih lahko zelo visok) in veljavne empirične relacije, vgrajene v standardno opremo, modificirati za realne vhodne podatke. Razvili smo model, ki deluje na izbranem mulju sadre, potrditi ga bo potrebno še na drugih materialih.
3. Pokazali smo, da imajo nekateri mulji izrazito lezenje. To je tako veliko, da ga ni moč ločiti od primarne konsolidacije. V takih muljih so terenske meritve za potrebe računanja posredkov neuporabne. Pri laboratorijskih raziskavah pa je potrebno paziti, da se med preiskavo nanos obtežbe izvaja v enakem časovnem zaporedju in v stalno enako velikih inkrementih. Čas trajanja bremenskih stopenj je potrebno ustrezno podaljšati.
4. Potrdili smo široko uporabnost velikega koaksialnega reometra ConTec Viscometer 5, ki je prvenstveno namenjen za preiskave reoloških lastnosti malt in betonov tudi na področju raziskovanja muljev. S tem smo odprli nove možnosti raziskav drobirskih tokov in plazov in pridobivanja realnih vstopnih podatkov pri njihovem modeliranju.
5. Pokazali smo, da z reološkimi raziskavami lahko dobro identificiramo občutljivost materiala in s tem povezano tiksotropijo.
6. Pokazali smo, da lahko podatke edometriških raziskav dovolj dobro uporabimo tudi pri modeliranju tlačne filtracije.

12.5 Smernice za nadaljnje delo

Ta naloga je odgovorila na številna odprta vprašanja, pokazala pa je tudi, da z obstoječimi metodami merjenja in modeliranja ni moč pridobiti nekaterih prepotrebnihih podatkov, da bi z njihovo pomočjo lahko izboljšali obstoječe modele. Pri analizi poteka sušenja smo ugotovili, da objavljeni enostavni 1D modeli (npr. Znidarčič, 2007 (program CONDENSE); Maček, 2012) ne delujejo za realne, v tej nalogi obravnavane primere. Da bi pridobili potrebne podatke o sušenju muljev v globino, bo treba v prihodnje zgraditi ustrezne visoke kolone in jih opremiti z merilniki vlage, sukcije in deformacij.

Analiza edometriških raziskav ter diskusija z izdelovalci programa Plaxis je pokazala, da obstoječe rešitve, vgrajene v program Plaxis ne morejo simulirati dogajanj v času sedimentacije suspenzije - to je v času, ko se struktura mulja šele formira. Ta čas je pomemben pri načrtovanju iztokov v akumulacijske bazene ter rabe flokulantov. Na tem področju bo treba povezati znanja iz mehanike tal in reologije sedimentov in jih artikulirati v razvoj nove merilne opreme in materialnih modelov.

Veliko vprašanj ostaja odprtih v povezavi z rabo veziv za stabilizacijo muljev z visokimi koncentracijami soli in dolgoročno volumsko stabilnostjo takšnih mešanic. Ta vprašanja je treba nasloviti tako na tehnični vidik vplivov potencialnega nabrekanja na funkcionalnost objektov kot tudi na okoljski vidik v povezavi z izluževanjem soli.

13 POVZETEK

V vodnih plovnih poteh in umetnih akumulacijah na kopnem se kopičijo sedimenti, ki izvirajo iz naravnega geološkega zaledja in so po mineralni in zrnastostni sestavi podobni zemljinam. Nakopičeni sedimenti zmanjšujejo obratovalno in funkcionalno varnost teh objektov, zato jih je potrebno redno odstranjevati in odlagati na drugem mestu. Odlaganje se lahko izvaja s premeščanjem znotraj vodnega telesa ali s skladiščenjem na kopnem. V umetnih akumulacijah na kopnem so uskladiščeni tudi industrijski mulji. Zaradi visoke vlage in rahle strukture je trdnost muljev praviloma nižja od trdnosti zemljin pri vlagi na meji židkosti, številni mulji imajo tiksotropen značaj.

V nalogi smo raziskovali ali so terenske in laboratorijske raziskave ter materialni modeli, uveljavljeni opisovanje lastnosti in obnašanja zemljin, primerni tudi za identifikacijo lastnosti in napoved obnašanja muljev. Preiskovali smo dva sedimenta iz vodnih okolij; morski sediment – reful iz Luke Koper in industrijski mulj kemične sadre iz Cinkarne. Mulja sta skladiščena na kopnem, v umetnih akumulacijah. V porni vodi obeh muljev so raztopljene soli. Akumulacije refula so zgrajene za nizkimi obodnimi nasipi, akumulaciji mulja sadre pa za dvema visokima nasutima pregradama Za Travnikom in Bukovžlak, ki sta objekta visokega tveganja. Akumulacije refula pokrivajo velike površine kopnega in močno zavirajo razvoj luške infrastrukture.

In situ lastnosti obeh muljev smo določili z uporabo CPTu, DMT in terensko krilno sondo, identificirali in situ lastnosti obeh muljev. Iz vrtin in razkopov smo odvzeli vzorce za laboratorijske preiskave. Opravili smo klasične geomehanske laboratorijske preiskave in specifične preiskave, ki smo jih prilagodili ali na novo vpeljali za potrebe raziskovanja muljev. V okviru naloge smo prvič v Sloveniji izvedli primerjalne terenske meritve lastnosti muljev s CPTu standardno konico in s kroglo. Laboratorijske preiskave reoloških lastnosti muljev smo izvedli z uporabo dveh koaksialnih valjastih reometrov (DV3T HB, Brookfield in ConTec Viscometer 5).

Z identifikacijskimi laboratorijskimi preiskavami smo pokazali, da slana porna voda v refulu, ne vpliva na klasifikacijo po USCS sistemu. Vplivi lastnosti porne tekočine na indeksne lastnosti se izrazijo šele v materialih z mejo židkosti višjo od 110% (npr. bentonit). Titracijska metoda organskega kationa metilen modro pa je pokazala, da se aktivnost zrn refula v slanem okolju zmanjša. Sol v porni vodi ima vpliv tudi na sušenje. V s slano porno vodo zasičenih glinah se proces zračnega sušenja upočasni in se lahko po določenem času in pri relativno visoki vsebnosti vlage, tudi povsem ustavi.

Z raziskavami stisljivosti v edometru smo potrdili predhodno že zaznano zrazito lezenje sadre. Ugotovili smo, da v mulju sadre, ni moč ločiti primarne in sekundarne faze konsolidacije. V primarni fazi konsolidacije so prisotni močni učinki lezenja, ki so tudi ključni za realno ocenitev računskih posedkov mulja pod obtežbami na površini. Da lahko ustrezno ovrednotimo učinke lezenja, je potrebno čas trajanja posamezne bremenske stopnje v edometru podaljšati toliko, da krivulja lezenja preide v obliko logaritemske premice. Za bremenske stopnje, ki so trajale prekratek čas in se je prevoj v logaritemsko premico le nakazoval, smo predlagali način določanja materialnih parametrov za opis lezenja.

Z analizami podatkov terenskih CPTu in DMT meritev smo ugotovili, da sta občutljivost in natančnost metod, pri uporabi standardnih merskih senzorjev (konusa in sonde), premajhni za identifikacijo lastnosti najbolj rahlih plasti muljev. Pokazali smo, da tudi za vrednotenje lastnosti konsolidiranega mulja sadre, semiempirične enačbe razvite za zemljine, niso primerne. Predlagali smo korekcije standardnih postopkov vrednotenja. Z upoštevanjem predlaganih korekcij, se izvrednoteni rezultati terenskih meritev, dobro prilegajo rezultatom laboratorijskih analiz. Ugotovili smo tudi, da so terenske metode prehitre in zato neustrezne za oceno deformabilnosti muljev z visokim lezenjem. Primerjave nedrenirane strižne trdnosti, merjene na terenu in v laboratoriju kažejo, da smo v laboratoriju, zaradi poškodovane in deloma preoblikovane strukture preizkušancev iz vrtin, izmerili rezidualne vrednosti trdnosti.

Ugotovili smo, da je pri vrednotenju reoloških parametrov refula pomembno upoštevanje mrtvega toka; t.j. območja do katerega material teče. Na ta način izvrednoteni parametri Binghamovega modela in tokovne krivulje so primerljivi, ne glede na uporabljen reometer in obliko merske sonde in so enakega velikostnega reda kot podatki iz literature. Na podlagi primerjalnih analiz smo zaključili, da je ConTec Viscometer 5, ki je prvenstveno namenjen raziskavam reoloških lastnosti malt in betonov, uporaben tudi za preiskovanje reoloških lastnosti muljev. V laboratoriju smo uspeli tudi dobro identificirati občutljivost in tiksotropijo muljev. Reful je malo občutljiv in ni tiskotropen. Na muljih sadre pa smo opazovali popoln upad strižne odpornosti po poružitvi, ne glede na začetno vlago in vrhunsko trdnost. Pokazali smo visoko občutljivost mulja sadre, z izrazito izraženo tiksotropijo.

Raba anorganskih veziv za izboljšanje lastnosti muljev se je izkazala kot neperspektivna. Pred dodajanjem veziv, je mulj potrebno ožeti ali osušiti na vlago pod mejo židkosti. Tudi v tem primeru so potrebni dodatki veziv, z vidika izboljšanja zemljin, razmeroma visoki (10 m%), dosežene trdnosti mešanic z vezivi pa nizke.

Iz rezultatov laboratorijskih preiskav in iz parametrov poskusnih tlačnih filtracij suspenzij, smo za oba mulja izvrednotili parametre za modelne izračune konsolidacijskega lezenja, sušenja v akumulacijah in tlačne filtracije. Pokazali smo, da lahko konsolidacijsko lezenje dobro opišemo s Soft soil creep modelom v Plaxisu, da lahko z 1D modelom, razvitim za sušenje plazine iz plazu Slano Blato, pokažemo trend, ne moremo pa ustrezno kvantificirati sušenja muljev v akumulacijah in da lahko tako z enostavno enačbo filtracije, kot tudi s preiskavo stisljivosti v edometru zadovoljivo opišemo tlačno filtracijo. Ugotovili smo tudi, da so za ustrezne modelne opise, ključni kakovostni rezultati laboratorijskih raziskav.

14 SUMMARY

Sediments from natural geological hinterland accumulate inside waterways and man made accumulations on land. Their grain size distribution and mineral composition are comparable with soils. Accumulated mud reduces safe operation and functionality of these facilities. Thus, it should be removed and disposed of inside the water body or on land. Industrial muds are also stored in accumulations on land. Due to high water content, the strength of muds is usually lower than strength of soils with water content at liquid limit. Some muds exhibit thixotropic behaviours.

In this thesis, the validity of in situ and laboratory test methods and material models, developed for soils, for the identification of mud properties and for the prediction of their behaviour, were investigated. Two muds were examined: dredged marine sediment – reful from the Port of Koper and red gypsum mud, which is by-product in the production of titanium dioxide in Celje. Both are stored on land, in purpose-built accumulations. Pore water in both muds is salty. Reful is deposited in shallow lagoons, while red gypsum mud is stored behind two large embankments dam Za Travnikom and Bukovžlak, which represents high risk facilities. The lagoons with reful cover large onshore area of the Port territory and hindering the development of port infrastructure for many years.

In the scope of this research, in situ properties of muds were evaluated from CPTu, DMT and field vane tests. Samples for laboratory investigations were obtained from boreholes and investigation pits. In the laboratory classical and special geotechnical investigations were performed. Special geotechnical investigations were adapted or introduced to determine mud behaviour. In this thesis, in situ CPTu tests were carried out comparatively by using standard cone and piezoball for the first time in Slovenia. Also two coaxial cylinder rheometers were introduced for the determination of rheological properties of muds.

Index laboratory tests show that salty pore water has no impact on the USCS classification of reful. The influence of salt on index properties is reflected in soils with liquid limit higher than 110% (e.g. bentonite). Titration method of the organic cation methylene blue shows that the activity of reful particles is lower in salt water than in pure water. Salty pore water also has impact on drying. In clays, saturated with salt water, the process of drying is slower. Due to the presence of salts, after the period of resting, the processes of drying can stop completely, although the clay contains high amount of water.

Investigations of consolidation in oedometer confirmed previously determined creep of red gypsum. In red gypsum mud the boundary between primary and secondary consolidation cannot be determined. In primary consolidation featured creep is observed. Appropriate evaluation of creep is of vital importance for real estimation of red gypsum mud settlements under surface loading (e.g. dry embankment). For adequate evaluation of creep from oedometer tests, the loading stages must last long enough to allow compression curve to pass into the form of logarithmic line. Some compression curves were too short and did not pass into the form of logarithmic line. For these cases, a method for the estimation of creep parameters is suggested.

Analysis of the in situ CPTu and DMT measurements shows that the sensitivity and accuracy of standard sensors (CPTu cone and DMT blade) are too low for the identification of the soft mud properties. The analysis also shows that semi empirical correlations developed for soils are not suitable for the evaluation of the consolidated red gypsum mud properties. Authors suggest corrections of semi empirical correlations. By using the suggested corrections, results of in situ investigations are comparable with laboratory measurements. In situ investigations are rapid. Due to this, measured values not include the effects of creep. As a consequence, calculated parameters are not adequate for the description of deformability parameters of muds with creep. Comparison of undrained shear strength, measured in situ and in the laboratory, shows that all values measured in the laboratory correspond to the residual in situ strength.

In the rheological investigations with two coaxial cylinder rheometers, the importance of plug flow was observed. Bingham rheological parameters and flow curves estimated by taking into account the plug flow are comparable, independent of the type of rheometer and geometry of measuring sensors. Results are in the same range as literature data. Comparison of rheological parameters shows that ConTec Viscometer 5, designed for the rheological investigations of mortars and concrete, is also suitable for the investigations of muds. Sensitivity and thixotropic behaviours of investigated muds were identified in the laboratory. Results show that reful is only slightly sensitive, while thixotropic behaviour was not recognized. Red gypsum mud shows, after the transformation of the structure, rapid decrease of undrained shear strength, which is independent of the initial water content and residual shear strength. Results of this investigations indicate that red gypsum mud is a very sensitive material with thixotropic behaviours.

Improvement of reful with inorganic binders is shown as not promising. Before the addition of binders, the water content of mud must be reduced at values significantly lower than its liquid limit. In comparison with soil stabilization, even after the decrease of mud water content, the amount of binders in mixtures was high (10 m%) and the achieved compressive strength of mixtures was low.

From the results of laboratory tests and from trial pressure filtration tests, technological and material parameters for model description of consolidation creep, drying and pressure filtration, were estimated. Results of numerical analysis show that Soft soil creep model (Plaxis) is suitable for the description of consolidation creep. Basic 1D model, developed for the computation of drying of the Slano Blato landslide, is not completely appropriate for the description of mud drying in the accumulation. The calculated values show the same trend of water content along the depth as laboratory tests, but for the long period of resting numerical model overestimates drying. Pressure filtration of mud suspensions can be described with basic filtration equation and also with laboratory oedometer tests. Analysis also shows the importance of appropriate laboratory data as the input parameters in the numerical modelling.

VIRI

Abuhajar, O., El Naggari, M.H., Newson, T. 2010. Review of Available Methods for Evaluation of Soil Sensitivity for Seismic Design, V: Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor I.M. Idriss. Presented at the International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Missouri, Missouri University of Science and Technology, paper 27.

Abu-Hejleh, A.N., Znidarčič, D. 1995. Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils. *J. Geotech. Eng.* 121: 493–502.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:6(493)

Acquavita, A., Predonzani, S., Mattassi, G., Rossin, P., Tamberlich, F., Falomo, J., Valic, I. 2010. Heavy Metal Contents and Distribution in Coastal Sediments of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea, Italy). *Water. Air. Soil Pollut.* 211: 95–111.
doi:10.1007/s11270-009-0284-5

Adami, G., Barbieri, P., Piselli, S., Predonzani, S., Reisenhofer, E. 2000. Detecting and characterising sources of persistent organic pollutants (PAHs and PCBs) in surface sediments of an industrialized area (harbour of Trieste, northern Adriatic Sea). *J. Environ. Monit. JEM* 2: 261–265.

Agus, S.S., Schanz, T. 2007. Errors in Total Suction Measurements. V: Schanz, T. (ur.), *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Berlin, Heidelberg, Springer: 59–70.

Aitchison, G.D. (ur.), 1965. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas; a symposium in print. Sydney, Butterworths.

Ajalloeian, R., Mansouri, H., Sadeghpour, A.H. 2013. Effect of saline water on geotechnical properties of fine-grained soil. *Electron. J. Geotech. Eng.* 2013: 1419–1435.

Allison, L.E., Bernstein, L., Bower, C.A., Brown, J.W., Fireman, M., Hatcher, J.T., Hayward, H.E., Pearson, G.A., Reeve, R.C., Richards, L.A., Wilcox, L.V. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, *Agriculture Handbook No. 60*. United States Department of Agriculture, Washington.

Amiralian, S., Chegenizadeh, A., Nikraz, H. 2012. A Review on The Lime and Fly ash Application in Soil Stabilization. *Int. J. Biol. Ecol. Environ. Sci.* 2012: 124–126.

Anson, R.W.W., Hawkins, A.B. 1998. The effect of calcium ions in pore water on the residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite. *Géotechnique* 48: 787–800.
doi:10.1680/geot.1998.48.6.787

Armstrong, R.J., Malvick, E.J. 2015. Practical Considerations in the Use of Liquefaction Susceptibility Criteria. *Earthq. Spectra* 32(3):1941-1950.
doi:10.1193/071114EQS100R

ARSO 2016.

<http://www.arso.gov.si/> (Pridobljeno 8. 1. 2016).

ASTM D 6276-99a, Withdrawn, no replacement: 2006. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

ASTM D6836-02(2008)e2:2008. Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge.

ASTM D4648 / D4648M - 16:2016. Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil.

Bailey, C., Smith, D., Yeates, M., Stevens, H. 2013. Improved Dredge Material Management for the Great Barrier Reef Region, APPENDIX A: Literature Review and Cost Analysis of Land-based Dredge Material Re-use and Disposal Options, Revision 2.4. Commonwealth of Australia, Sinclair Knight Merz Pty Ltd (SKM).

Barbier, P., Adami, G., Predonzani, S., Reisenhofer, E. 1999. Heavy metals in surface sediments near urban and industrial sewage discharges in the gulf of Trieste. *Toxicol. Environ. Chem.* 71: 105–114.
doi:10.1080/02772249909358785

Barbour, S.L., Yang, N. 1993. A review of the influence of clay–brine interactions on the geotechnical properties of Ca-montmorillonitic clayey soils from western Canada. *Can. Geotech. J.* 30: 920–934.
doi:10.1139/t93-090

Barden, L., McGown, A., Collins, K. 1973. The collapse mechanism in partly saturated soil. *Eng. Geol.* 7: 49–60.
doi:10.1016/0013-7952(73)90006-9

Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. 1989. *An Introduction to Rheology*. Oxford, Elsevier.

Basma, A.A., Tuncer, E.R. 1992. Evaluation and Control of Collapsible Soils. *J. Geotech. Eng.* 118: 1491–1504.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:10(1491)

Bates, M.E., Fox-Lent, C., Seymour, L., Wender, B.A., Linkov, I. 2015. Life cycle assessment for dredged sediment placement strategies. *Sci. Total Environ.* 511: 309–318.
doi:10.1016/j.scitotenv.2014.11.003

Benson, C.H. 1999. *Environmental Geotechnics in the New Millennium*. V: Wardle, G.R. (ur.), Blight, G.E. (ur.), Founé, A.B. (ur.). Proceedings of the 12th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Presented at the Geotechnics for Developing Africa, Durban, South Africa. Rotterdam, A.A. Balkema: 9–22.

Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., Winterwerp, J. 1993. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coast. Eng.* 21: 105–128.
doi:10.1016/0378-3839(93)90047-C

Bjerrum, L. 1967. Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. *Géotechnique* 17: 83–118.
doi:10.1680/geot.1967.17.2.83

Bjerrum, L., Rosenqvist, I.T. 1956. Some Experiments With Artificially Sedimented Clays. *Géotechnique* 6: 124–136.
doi:10.1680/geot.1956.6.3.124

Boodt, M. 1993. Soil conditioning: a modern procedure for restoring physical soil degradation. *Pedologie* 43:157-195

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. 2006. Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 132: 1413–1426.
doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1413)

Boutouil, M., Levacher, D. 2005. Effect of high initial water content on cement-based sludge solidification. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Ground Improv.* 9: 169–174.

doi:10.1680/grim.2005.9.4.169

Bowders, J.J., Daniel, D.E. 1987. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to Dilute Organic Chemicals. *J. Geotech. Eng.* 113: 1432–1448.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:12(1432)

Brandt, G.H. 1972. Soil physical property modifiers. V: Goring, C.A.I., Hamaker, J.W. (ur.). *Organic Chemicals in the Soil Environment*, vol. 2. New York, Marcel Dekker, pp: 692–729.

Brookfield Engineering Labs., Inc. 2014. *More Solutions to Sticky Problems*. Middleboro, Brookfield.

Brooks, R.H., Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers* 3. Colorado, Colorado state university.

Bulut, R. 1996. A Re-evaluation of the filter paper method of measuring soil suction, A Thesis in civil engineering. Texas, Graduate Faculty of Texas Tech University.

Bulut, R., Lytton, R., and Wray, W. 2001. Soil Suction Measurements by Filter Paper. *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*: 243-261.
doi: 10.1061/40592(270)14

BV Kalk. (Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.) 2004. *Bodenverbesserung, Bodenverfestigung mit Kalk*. Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e. V., Köln, p: 47.

Campbell, G.S. 1985. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems*. Amsterdam, Elsevier.

Casado-Martínez, M.C., Buceta, J.L., Belzunce, M.J., DelValls, T.A. 2006. Using sediment quality guidelines for dredged material management in commercial ports from Spain. *Environ. Int.* 32: 388–396.
doi:10.1016/j.envint.2005.09.003

Chamberlain, P. 1988. Polymer as soil conditioners. *Chem. Br.*: 144–146.

Chiappone, A., Marelllo, S., Scavia, C., Setti, M. 2004. Clay mineral characterization through the methylene blue test: comparison with other experimental techniques and applications of the method. *Can. Geotech. J.* 41: 1168–1178.
doi:10.1139/t04-060

Cibic, T., Acquavita, A., Aleffi, F., Bettoso, N., Blasutto, O., De Vittor, C., Falconi, C., Falomo, J., Faresi, L., Predonzani, S., Tamberlich, F., Fonda Umani, S. 2008. Integrated approach to sediment pollution: A case study in the Gulf of Trieste. *Mar. Pollut. Bull.* 56: 1650–1657.
doi:10.1016/j.marpolbul.2008.05.009

Cokca, E. 2002. Relationship between Methylene Blue Value, Initial Soil Suction and Swell Percent of Expansive Soils. *Turk. J. Eng. Env. Sci.* 2002: 521–529.

Colreavy, C., O'loughlin, C.D., Randolph, M.F. 2016. Estimating consolidation parameters from field piezoball tests. *Géotechnique* 66: 333–343.
doi:10.1680/jgeot.15.P.106

Coussot, P., Piau, J.-M. 1995. A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *J. Rheol.* 39: 105 str.
doi:10.1122/1.550693

Covelli, S., Faganeli, J., Horvat, M., Brambati, A. 2001. Mercury contamination of coastal sediments as the result of long-term cinnabar mining activity (Gulf of Trieste, northern Adriatic sea). *Appl. Geochem.* 16: 541–558.

doi:10.1016/S0883-2927(00)00042-1

Covelli, S., Fontolan, G., Faganeli, J., Ogrinc, N. 2006. Anthropogenic markers in the Holocene stratigraphic sequence of the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Mar. Geol.* 230: 29–51.

doi:10.1016/j.margeo.2006.03.013

Covelli, S., Piani, R., Acquavita, A., Predonzani, S., Faganeli, J. 2007. Transport and dispersion of particulate Hg associated with a river plume in coastal Northern Adriatic environments. *Mar. Pollut. Bull., Measuring and Managing Changes in Estuaries and Lagoons* 55: 436–450.

doi:10.1016/j.marpolbul.2007.09.006

Četina, M., Zakrajšek, M., Krzyk, M., Rajar, R. 2010. Dodatni izračuni hidravličnih posledic morebitne porušitve pregrade "Bukovžlak" za določitev potrebne višine varnostnega nasipa nad peto DTO, Končno poročilo (No. 23/09-KMTe/Če). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Katedra za mehaniko tekočin in laboratorij.

Dade, W., Nowell, A.R., Jumars, P. 1992. Predicting erosion resistance of muds. *Mar. Geol.* 105: 285–297.

doi:10.1016/0025-3227(92)90194-M

Das, B.M. 1993. Principles of geotechnical engineering, Third edition, 3rd ed. Boston, PWS Publishing Company.

Davies, M., P. 2002. Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical Engineers Listening? *Waste Geotech. Geotech. News*: 31–36.

Deresiewicz, H. 1958. Mechanics of granular matter. *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 5. New York.

Di Maio, C. 1996. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Géotechnique* 46: 695–707.

doi:10.1680/geot.1996.46.4.695

Di Maio, C., Santoli, L., Schiavone, P. 2004. Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mech. Mater.* 36: 435–451.

doi:10.1016/S0167-6636(03)00070-X

Dolar, B. 2000. Odras mineralne sestave zemljin na njihove geomehanske lastnosti. V: Gaberc, A.M., Majes, B. (ur.), *Zbornik Referatov. 1. Šukljjetovi dnevi*. Ljubljana, Slovensko geotehnično društvo: 105–112.

Elmashad, M.E., Ata, A.A. 2015. Effect of seawater on consistency, infiltration rate and swelling characteristics of montmorillonite clay. *HBRC J.* 12(2):175-180.

doi:10.1016/j.hbrcj.2014.12.004

Engels, J., Schönhardt, M., Witt, K.J., Benkovic, I., Berta, Z., Csövári, M., Georgescu, D.P., Radulescu, C.A., Zlagnean, M., Böhm, J., Debreczeni, Á., Gombkőto, I., Koffa, E., Mylona, E., Paspaliaris, I., Xenidis, A. 2004. Tailings Management Facilities - Intervention Actions for Risk Reduction (Report of Workpackage 3 of the RTD project Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities (TAILSAFE) No. EVG1-CT-2002-00066). Leeds, University of Leeds.

ERICO 2014. Študija o vplivu razlitij v morje na kakovost morskih sedimentov (v okviru EU projekta Safeport - Program čezmenjega sodelovanja Slovenija - Italija 2007-2013 (No. DP 59/08/14). Velenje, ERICO d.o.o., Inštitut za ekološke raziskave.

Faganeli, J., Planinc, R., Pezdič, S., Smodiš, B., Stegnar, P., Ogorelec, B. 1991. Marine geology of the Gulf of Trieste (northern Adriatic): Geochemical aspects. *Mar. Geol.* 99: 93–108.
doi:10.1016/0025-3227(91)90085-I

Faganeli, J., Horvat, M., Covelli, S., Fajon, V., Logar, M., Lipej, L., Cermelj, B. 2003. Mercury and methylmercury in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Sci. Total Environ., Pathways and processes of mercury in the environment. Selected papers presented at the sixth International Conference on Mercury as Global Pollutant, Minamata, Japan, Oct. 15-19, 2001*, 304: 315–326.
doi:10.1016/S0048-9697(02)00578-8

Farid, A. and Mosaid, M. 2014. Swelling Potential Prediction of Expansive Soils Using Blue Methylene Value. *Soil Behavior and Geomechanics*: 25-33.
doi: 10.1061/9780784413388.003

Feda, J. 1995. Mechanisms of Collapse of Soil Structure, V: Derbyshire, E., Dijkstra, T., Smalley, I.J. (ur.). *Genesis and Properties of Collapsible Soils*. Dordrecht, Netherlands, Springer: 149–172.

Ferguson, J., Kemblowski, Z. 1991. *Applied Fluid Rheology*. Springer Netherlands.

Feys, D., Wallevik, J.E., Yahia, A., Khayat, K.H., Wallevik, O.H. 2013. Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers. *Mater. Struct.* 46: 289–311.
doi:10.1617/s11527-012-9902-6

Fifer Bizjak, K., Zupančič, A. 2009. Site and laboratory investigation of the Slano blato landslide. *Eng. Geol.* 105: 171–185.
doi:10.1016/j.enggeo.2009.01.006

Foucher, D., Ogrinc, N., Hintelmann, H. 2009. Tracing mercury contamination from the Idrija mining region (Slovenia) to the Gulf of Trieste using Hg isotope ratio measurements. *Environ. Sci. Technol.* 43: 33–39.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D. 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, Inc.

Fukue, M., Nakamura, T., Kato, Y., Yamasaki, S. 1999. Degree of pollution for marine sediments. *Eng. Geol.* 53: 131–137.
doi:10.1016/S0013-7952(99)00026-5

Garbin, Jr., E.J., Mann, J., McIntosh, K.A., Desai, K.R. 2011. Mass Stabilization for Settlement Control of Shallow Foundations on Soft Organic Clayey Soils. *Geo-Frontiers 2011*: 758–767.
doi:10.1061/41165(397)78

Garlanger, J.E. 1972. The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress. *Géotechnique* 22: 71–78.
doi:10.1680/geot.1972.22.1.71

Gauer, P., Kvalstad, T.J., Forsberg, C.F., Bryn, P., Berg, K. 2005. The last phase of the Storegga Slide: simulation of retrogressive slide dynamics and comparison with slide-scar morphology. *Mar. Pet. Geol.* 22: 171–178.

doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.10.004

Geertsema, M., Torrance, J.K. 2005. Quick clay from the Mink Creek landslide near Terrace, British Columbia: Geotechnical properties, mineralogy, and geochemistry. *Can. Geotech. J.* 42: 907–918.

doi:10.1139/t05-028

Gibbs, H.J., Bara, J.P. 1967. Stability problems of collapsing soil. *J. Soil Mech. Found. Div. Vol 93, No SM4: 577-594.*

Goldberg, R.N. 1981. Evaluated activity and osmotic coefficients for aqueous solutions: thirty-six uni-bivalent electrolytes. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 10, 3: 671-764.

doi:10.1063/1.555646

Goldberg, R.N., Nuttall, R.L. 1978. Evaluated activity and osmotic coefficients for aqueous solutions: The alkaline earth metal halides. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 7,1: 263-310.

doi:10.1063/1.555569

Hamer, W.J., Wu, Y.-C. 1972. Osmotic Coefficients and Mean Activity Coefficients of Uni-univalent Electrolytes in Water at 25°C. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 1,4: 1047-1100.

doi:10.1063/1.3253108

Harbeck, G.E. 1955. The effect of salinity on evaporation (Report No. 272A), Professional Paper. USA, U.S. Geological Survey Circular, 6p.

Hardin, B.O. 1989. 1-D Strain in Normally Consolidated Cohesive Soils. *J. Geotech. Eng.* 115: 689–710.

doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:5(689)

Havel, F. 2004. Creep in soft Soils. Doctoral thesis. Trondheim, Norwegian University of Science and technology, The Faculty of Engineering Science and Technology.

Heath, E., Ogrinc, N., Faganeli, J., Covelli, S. 2006. Sedimentary Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea), V: Kronvang, B., Faganeli, J., Ogrinc, N. (ur.), *The Interactions Between Sediments and Water*. Netherlands, Springer: 241–250.

Helle, T.E., Nordal, S., Aagaard, P., Lied, O.K. 2016. Long-term effect of potassium chloride treatment on improving the soil behavior of highly sensitive clay — Ulvensplitten, Norway. *Can. Geotech. J.* 53, 410–422.

doi:10.1139/cgj-2015-0077

Hillel, D. 1980. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, Inc.

Hines, M.E., Horvat, M., Faganeli, J., Bonzongo, J.-C.J., Barkay, T., Major, E.B., Scott, K.J., Bailey, E.A., Warwick, J.J., Lyons, W.B. 2000. Mercury Biogeochemistry in the Idrija River, Slovenia, from above the Mine into the Gulf of Trieste. *Environ. Res.* 83: 129–139.

doi:10.1006/enrs.2000.4052

Hočevar, A. 2013. Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju. Doktorska disertacija. Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Holdich, R.G. 2002. *Fundamentals of Particle Technology*. Loughborough, U.K., Midland Information Technology and Publishing.

Horvat, M., Covelli, S., Faganeli, J., Logar, M., Mandić, V., Rajar, R., Širca, A., Žagar, D. 1999. Mercury in contaminated coastal environments; a case study: the Gulf of Trieste. *Sci. Total Environ.* 237–238, 43–56.

doi:10.1016/S0048-9697(99)00123-0

Ilstad, T., Elverhøi, A., Issler, D., Marr, J.G. 2004. Subaqueous debris flow behaviour and its dependence on the sand/clay ratio: a laboratory study using particle tracking. *Mar. Geol.* 213: 415–438.

doi:10.1016/j.margeo.2004.10.017

Ingles, O.G., Metcalf, J.B. 1972. *Soil Stabilization: Principles and Practice*. London, Butterworth and Company Publishers Limited. 374 p.

Jeong, S.W. 2006. Influence of physico-chemical characteristics of fine-grained sediments on their rheological behavior, Ph.D. Thesis. Quebec, Canada, Université Laval.

Jeong, S.W., Locat, J., Leroueil, S., Malet, J.-P. 2010. Rheological properties of fine-grained sediment: the roles of texture and mineralogy. *Can. Geotech. J.* 47: 1085–1100.

doi:10.1139/T10-012

Jeong, S.W. 2013. Determining the viscosity and yield surface of marine sediments using modified Bingham models. *Geosci. J.* 17: 241–247.

doi:10.1007/s12303-013-0038-7

Joksič, A. Š., Katz, S.A., Horvat, M., Milačič, R. 2005. Comparison of Single and Sequential Extraction Procedures for Assessing Metal Leaching from Dredged Coastal Sediments. *Water, Air, Soil Pollut.* 162: 265–283.

doi:10.1007/s11270-005-7031-3

Jung, B.-C., Gardoni, P., Biscontin, A. 2008. Probabilistic soil identification based on cone penetration tests. *Géotechnique* 58: 591–603.

doi:10.1680/geot.2008.58.7.591

Juszczak, L., Fortuna, T. 2006. Rheology of selected Polish honeys. *J. Food Eng.* 75: 43–49.

doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.03.049

Kamei, T., Iwasaki, K. 1995. Evaluation of Undrained Shear Strength of Cohesive Soils Using a Flat Dilatometer. *Soils and Foundations.* 35(2): 111–116.

doi:10.3208/sandf1972.35.2_111

Kaya, A., Fang, H.-Y. 2000. The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Can. Geotech. J.* 37: 943–950.

doi:10.1139/t00-023

Kinter, E.B. 1975. Development and evaluation of chemical soil stabilizers, FHWA-RD-75- 17 Final Rpt. USA, National Technical Information Service.

Kotnik, J., Horvat, M., Ogrinc, N., Fajon, V., Žagar, D., Cossa, D., Sprovieri, F., Pirrone, N. 2015. Mercury speciation in the Adriatic Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 96: 136–148.

doi:10.1016/j.marpolbul.2015.05.037

Krahn, J., Fredlund, D.G. 1972. On total, matric and osmotic suction. *Soil Sci.* 114: 339–348.

Kramer, S.L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey, Prentice Hall.

Kronimus, A., Schwarzbauer, J., Dsikowitzky, L., Heim, S., Littke, R. 2004. Anthropogenic organic contaminants in sediments of the Lippe river, Germany. *Water Res.* 38: 3473–3484.
doi:10.1016/j.watres.2004.04.054

Ku, C.S., Juang, C.H., Ou, C.Y. 2010. Reliability of CPT I_c as an index for mechanical behaviour classification of soils. *Géotechnique* 60: 861–875.
doi:10.1680/geot.09.P.097

Kuder, S., Logar, J. 2008. Numerični model za analizo obnašanja tlačno obremenjenih, vtisnjenih jeklenih pilotov v Luki Koper = Numerical model for the prediction of behaviour of driven steel piles under axial compression loading in the Port of Koper. *Gradb. Vestn.* 57: 207–214.

Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., Poulos, H.G., et al. 1977. Stress deformation and strength characteristics. Presented at the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 9th, 1977, Tokyo, Japan.

Lahalih, S.M., Ahmed, N. 1998. Effect of new soil stabilizers on the compressive strength of dune sand. *Constr. Build. Mater.* 12: 321–328.
doi:10.1016/S0950-0618(98)00024-5

Leu, W. 1986. Principles of compressible cake filtration, V: Encyclopedia of Fluid Mechanics. Houston, Gulf Publishing.

Li, P., Vanapalli, S., Li, T. 2016. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 8: 256–274.
doi:10.1016/j.jrmge.2015.12.002

Liddel, P.V., Boger, D.V. 1996. Yield stress measurements with the vane. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 63: 235–261.
doi:10.1016/0377-0257(95)01421-7

Little, D.N., Nair, S. 2009. Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. Texas, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).

Liu, J., Znidarčič, D. 1991. Modeling One-Dimensional Compression Characteristics of Soils. *J. Geotech. Eng.* 117: 162–169.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(162)

Locat, J. 1997. Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime, V: Cheng-lung Chen (ur.), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. First International Conference, American Society of Civil Engineers. New York, American Society of Civil Engineers: 260–269.

Locat, J., Demers, D. 1988. Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Can. Geotech. J.* 25: 799–806.
doi:10.1139/t88-088

Logar, J. 2010a. Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja - 1. del: raziskave tal. *Gradb. Vestn.* 2010: 97–105.

Logar, J. 2010b. Geotehnika v Luki Koper na začetku 21. stoletja - 2. del: nedavno izvedeni projekti. *Gradb. Vestn.* 2010: 106–116.

Logar, J., Kuder, S., Robas, A., Battelino, L., Strniša, G. 2007. Flat dilatometer in Port of Koper and observed ground behaviour, V: Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Rotterdam. Madrid, Millpress Science Publishers: 609–613.

Long, M., Colreavy, C., Ward, D., Quigley, P. 2014. Piezoball tests in soft Irish clays, V: 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, CPT 14.

Lorenzo, G.A., Bergado, D.T. 2004. Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay—New Approach. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 130: 1042–1050.
doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042)

Luka Koper. 2015. Okoljsko poročilo za leto 2015. <http://www.zivetispristaniscem.si/index.php?page=static&item=14> (Pridobljeno 22.11.2016).

Maček, M. 2012. Vpliv matrične sukcije na pomike plazu Slano blato. Doktorska disertacija. Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Maček, M., Bebar, M., Petkovšek, A. 2010a. Kontrola kakovosti in monitoring nasipov iz glin z uporabo zemljinske sukcije. V: 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož. Ljubljana, DRC: 891–900.

Maček, M., Bebar, M., Petkovšek, A. 2010b. High embankments from highly plastic, stiff clays in North-East Slovenia, V: Proceedings of the XIVth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering. XIVth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering. Bratislava, Slovaška, Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

Maček, M., Mauko, A., Mladenovič, A., Majes, B., Petkovšek, A. 2013a. A comparison of methods used to characterize the soil specific surface area of clays. *Appl. Clay Sci.* 83–84, 144–152.
doi:10.1016/j.clay.2013.08.026

Maček, M., Smolar, J., Bebar, M., Petkovšek, A. 2013b. Soil matric suction as an indicator of volume changes in compacted clays modified with lime. V: Boussafir, Y., Puiatti, D., Adbo, J., Chardard P. (ur.). *TerDOUEST 2013 : Colloque Le Traitement Des Sols Pour Un Terrassement Durable*. Seminar Treated soils for sustainable earthwork, Marne La Vallée, TerDOUEST: 263–271.

Maček, M., Smolar, J., Petkovšek, A. 2013c. Extension of measurement range of dew-point potentiometer and evaporation method. V: Delage, P., Jean Marie Desrues, J., Frank, R., Puech, A., Schlosser, F. (ur.), *Proceedings of the 18 Th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Paris, France, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: 1137–1142.

Maček, M., Smolar, J., Petkovšek, A., Logar, J. 2014. Poročilo o rezultatih geomehanskih laboratorijskih raziskav : vzorcev mulja, odvzetih iz vrtin v ojezernem delu akumulacije Za Travnikom (L-08-14). Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.

Maček, M., Smolar, J., Petkovšek, A. 2015. Kako se pripravljamo na rabo alternativnih materialov v inženirskih nasipih. V: Referati 12. slovenski kongres o cestah in prometu. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije.

Maček, M., Ločniškar, A., Bebar, M., Petkovšek, A. 2016. Experience with lime treated soils in Slovenia, V: *Zbornik Radova*. Beograd, Srpsko društvo za puteve “Via-Vita”: pp. 1–11.

Maher, A., Bennert, T., Jafari, F., Douglas, W., Gucunski, N. 2004. Geotechnical Properties of Stabilized Dredged Material from New York-New Jersey Harbor. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1874: 86–96.
doi:10.3141/1874-10

Major, J.J., Pierson, T.C. 1992. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour. Res.* 28: 841–857.

doi:10.1029/91WR02834

Malačič, V., Čermelj, B., Bajt, O., Ramšak, A., Petelin, B., Žagar, D., Vodopivec, M., Forte, J. 2009. Cirkulacija in okoljske razmere v Koprskem zalivu in Luki Koper. *Fazno poročilo 3* (MBP št. 113). Piran, Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja.

Malkin, A.I.A., Malkin, A.Y., Isayev, A.I. 2006. *Rheology: Concepts, Methods & Applications*. Toronto, ChemTec Pub.

Malvern, L.E. 1969. *Introduction to the mechanics of a continuous medium*, Prentice-Hall series in engineering of the physical sciences. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.

Manap, N., Voulvoulis, N. 2015. Environmental management for dredging sediments – The requirement of developing nations. *J. Environ. Manage.* 147: 338–348.
doi:10.1016/j.jenvman.2014.09.024

Mansouri, H., Ajalloeian, R., Sadeghpour, A. 2013. The Investigation of Salinity Effects on Behavioral Parameters of Fine-Grained Soils. *Int. Conf. Case Hist. Geotech. Eng. Missouri, University of Science and Technology*.

Marchetti, S. 1980. In Situ Tests by Flat Dilatometer. *J. Geotech. Eng. Div.* 1980: 299–321.

Marchetti, S. 1999. The flat dilatometer (DMT) and its applications to geotechnical design. Lecture notes at the International Seminar on the DMT held at the Japanese Geotechnical Society. Tokyo, Japanese Geotechnical Society.

Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M. 2001. The Flat Dilatometer Test DMT in Soil Investigations. A Report by the ISSMGE Committee TC16 on Ground Property Characterisation from In-situ Testing. V: Proc. IN SITU 2001. Intl. Conf. On In situ Measurement of Soil Properties, Graduate Program. Bali, Indonesia, Parahyangan Catholic University: 7–48.

Maslov, N.N. 1968. Long-term stability and displacements of retaining structures (in Russian). Moscow, Energiya.

Mastin B., Lebster G. E., Salley J. R. 2007. Use of Geotube® dewatering containers in environmental dredging. *Proceedings of GeoAmericas*. Cancun, Mexico, IFAI, 390–399.

Mehta, A.J. 1986. Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Processes in Estuaries. V: Mehta, A.J. (ur.), *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. New York, Springer NY: 290–325.

Meschyan, S.R. 1995. *Experimental Rheology of Clayey Soils*. USA, Taylor & Francis.

Mesri, G. 1975. New design procedure for stability of soft clays. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 101.

Mitchel, J.K., Soga, K. 2005. *Fundamentals of soil behavior*, 3rd Edition. Hoboken, NJ, John Wiley & sons.

Mladenovič, A., Pogačnik, Ž., Milačič, R., Petkovšek, A., Cepak, F. 2013. Dredged mud from the Port of Koper - Civil engineering applications. *Mater. Technol.* 47: 353–356.

Mladenovič, A., Turk, J., Mauko, A., Šprinzer, M. 2014. Sedimenti v vodnih okoljih: geokemična in mineraloška karakterizacija, remediacija ter njihova uporabnost kot sekundarna surovina (Projekt

ARRS L1-4311, 1.7.2011 do 30.6.2014), Priročnik o vrednotenju okoljskih vplivov pri recikliranju sedimentov iz vodnih teles v gradbeništvo na podlagi LCA analize. Ljubljana, ZAG.

Monkul, M.M., Yamamuro, J.A. 2011. Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands. *Can. Geotech. J.* 48: 931–942.
doi:10.1139/t11-001

Morales Romero, E.E. 1999. Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Doctoral thesis. Catalonia, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica.

Morelli, C., Mosetti, F. 1968. Rilievo sismico continuo nel golfo di Trieste: andamento della formazione arenacea (Flysch) sotto il fondo marino nella zona tra Trieste, Monfalcone. *Boll. Della Soc. Adriat. Sci.* 1968: 42–57.

Mouldenhauer, W.C., Gabriels, D.M. 1972. Some uses of soil stabilizers in the USA. *Ghent Rijksfac Landbouwetensch Meded* 37: 1076–1085.

Ni, L.A., Yu, A.B., Lu, G.Q., Howes, T. 2006. Simulation of the cake formation and growth in cake filtration. *Miner. Eng.* 19, 1084–1097.
doi:10.1016/j.mineng.2006.03.012

Notar, M., Leskovšek, H., Faganeli, J. 2001. Composition, Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments of the Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 42: 36–44.
doi:10.1016/S0025-326X(00)00092-8

Ogorelec, B., Mišič, M., Faganeli, J., Stegnar, P., Vrišer, B., Vukovič, A. 1987. Recentni sediment Koprškega zaliva. *Geologija*, letnik 30.

Ogorelec, B., Mišič, M., Faganeli, J. 1991. Marine geology of the Gulf of Trieste (northern Adriatic): Sedimentological aspects. *Mar. Geol.* 99: 79–92.
doi:10.1016/0025-3227(91)90084-H

Ogorelec, B., Faganeli, J., Mišič, M., Čermelj, B. 1997. Reconstruction of paleoenvironment in the Bay of Koper: (Gulf of Trieste, northern Adriatic). *Ann. Ser. Hist. Nat.* 7: 187–200.

Ogrinc, N., Faganeli, J., Ogorelec, B., Čermelj, B. 2007a. The origin of organic matter in Holocene sediments in the Bay of Koper (Gulf of Trieste, northern Adriatic Sea). *Geologija* 2007: 179–187.

Ogrinc, N., Monperrus, M., Kotnik, J., Fajon, V., Vidimova, K., Amouroux, D., Kocman, D., Tessier, E., Žižek, S., Horvat, M. 2007b. Distribution of mercury and methylmercury in deep-sea surficial sediments of the Mediterranean Sea. *Mar. Chem., Mercury Cycling in Surface and Deep Waters of the Mediterranean Sea* 107: 31–48.
doi:10.1016/j.marchem.2007.01.019

Ogrinc, N., Covelli, S., Ogorelec, B., Faganeli, J., Budja, M. 2012. Rekonstrukcija paleookolja Tržaškega zaliva v Holocenu z uporabo geokemijskih metod. V: Andrič, M. (ur.), *Dolgoročne Spremembe Okolja 1. opera instituti archaeologici sloveniae*: 81–88.

Ohtsubo, M., Egashira, K., Takayama, M. 1996. Mineralogy and chemistry, and their correlations with the geotechnical properties of marine clays in Ariake bay, Japan: Comparison of quick and nonquick clay sediments. *Mar. Georesources Geotechnol.* 14: 263–282.
doi:10.1080/10641199609388316

Ollson, M. 2010. Calculating long-term settlement in soft clays – with special focus on the Gothenburg region. Göteborg, Chalmers university of technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering.
doi:10.1023/A:1022839215231

OSPAR 1998. OSPAR Guidelines for the Management of Dredged Material (Reference Number: 1998-20) (OSPAR 98/14/1-E, Annex 43), Ministerial Meeting of the OSPAR Commission. OSPAR Convention for the protection of the marine environment, Sintra.

Otsubo, K., Muraoka, K. 1988. Critical Shear Stress of Cohesive Bottom Sediments. *J. Hydraul. Eng.* 114: 1241–1256.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1241)

Ören, A.H., Kaya, A. 2003. Some Engineering Aspects of Homoionized Mixed Clay Minerals. *Environ. Monit. Assess.* 84: 85–98.

Parsons, J.D., Whipple, K.X., Simoni, A. 2001. Experimental Study of the Grain-Flow, Fluid-Mud Transition in Debris Flows. *J. Geol.* 109: 427–447.
doi:10.1086/320798

Partheniades, E. 2009. Chapter 3 - Forces between Clay Particles and the Process of Flocculation. V: *Cohesive Sediments in Open Channels*. Butterworth-Heinemann. Boston, Elsevier: 47–88.

Pathak, S.R., Purandare, A.S. 2016. Liquefaction susceptibility criterion of fine grained soil. *Int. J. Geotech. Eng.*: 1–15.
doi:10.1080/19386362.2016.1160588

Peroni, N., Tarantino, A. 2005. Measurement of osmotic suction using the squeezing technique. V: Schanz, T. (ur.), *Unsaturated Soils: Experimental Studies*. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag: 159–168.

Petkovšek, A. 2006a. Vpliv matrične sukucije na trdnostno deformacijske lastnosti zemljin (Doktorska disertacija). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Petkovšek, A. 2006b. Stabiliziranje zemljin pri gradnji avtocest v severovzhodni Sloveniji. V: *Gradnja Avtocest v Pomurju: Zbornik Referatov*. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 13–35.

Petkovšek, A. 2009. Suho zapolnjevanje titanske sadre v ojezerjeni del akumulacije “Za Travnikom”, Tehnološka navodila za varno in prostorsko učinkovito gradnjo suhih nasipov iz ožete sadre (Elaborat E-06-09). Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.

Petkovšek, A. 2012. Sintetične sadre (gipsi): obnašanje pri zgoščanju in stabilnost na odlagališčih - slovenske izkušnje: *Inženjerstvo okoliša 2012*. Varaždin Geotehnički fakultet Varaždin 9. in 10.5.2012.

Petkovšek, A. 2014. Use of marginal geomaterials and industrial by-products as fill for embankments: past experiences and future perspectives. V: Adam, D., Brandl, H. (ur.). *Geotechnics of Roads and Railways. 15th Danube - European Conference on Geotechnical Engineering*. Dunaj, Avstrija, ÖIAV - Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein: 5–31.

Petkovšek, A., Majes, B. 2007. Načrt izvedbe poskusnih polj za določitev tehnoloških parametrov suhega zapolnjevanja akumulacije Za Travnikom z ožeto sadro (E-48-07-dopolnjen). Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.

- Petkovšek, A., Bebar, M., Ločniškar, A. 2008a. Stabiliziranje zemljin pri gradnji avtocest v Sloveniji - pretekle izkušnje in nove perspektive. V: Zbornik Referatov 9. slovenski kongres o cestah in prometu. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 89–99.
- Petkovšek, A., Majes, B., Mladenovič, A. 2008b. The influence of the mineralogical and physical properties of chemical gypsum on the compaction behavior and stability of the gypsum mono-landfill - a case study from Slovenia. V: Telekes, G. (ur.), 1st Middle European Conference on Landfill Technology. Budapest, DGGT - German Geotechnical Society, Hungarian National Committee of the ISSMGE.
- Petkovšek, A., Maček, M., Majes, B. 2009. A laboratory characterization of soils and clay-bearing rocks using the Enslin-Neff water-adsorption test. *Acta Geotech. Slov.* 6(2):4-13.
- Petkovšek, A., Maček, M., Pavšič, P., Bohar, F. 2010. Fines characterization through the methylene blue and sand equivalent test: comparison with other experimental techniques and application of criteria to the aggregate quality assessment. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 69: 561–574.
doi:10.1007/s10064-010-0274-2
- Petkovšek, A., Mladenovič, A., Majes, B. 2012. Sintetične sadre v Sloveniji – kako in kam z njimi. V: Petkovšek, A., Klopčič, J. (ur.). Zbornik 6. posvetovanje Slovenskih geoteknikov. Ljubljana, Slovensko geotehnično društvo: 227–288.
- Petkovšek, A., Pulko, B. 2015. Jalovinske pregrade – zanesljivost delovanja in obvladovanje tveganj porušitev. *UJMA* 2015: 293–304.
- Phillips, C.J., Davies, T.R.H. 1991. Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology* 4: 101–110.
doi:10.1016/0169-555X(91)90022-3
- Placer, L., Košir, A., Popit, T., Šmuc, A., Juvan, G. 2004. The Buzet Thrust Fault in Istria and overturned carbonate megabeds in the Eocene flysch of the Dragonja Valley (Slovenia). *Geologija*, 47(2): 193-198.
- Plaxis 2015. *Plaxis Materials Models Manual*. Netherland, Plaxis.
- Pleničar, M., Strmole, D., Leder, Z., et al. 2006. *Geološki terminološki slovar, Zbirka Slovarji*. Ljubljana, Založba ZRC SAZU.
- Prakash, S., Puri, V.K. 2010. Recent advances in liquefaction of fine grained soils. Presented at the International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California.
- Rajar, R., Četina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediterranean Sea. *Mar. Chem., Mercury Cycling in Surface and Deep Waters of the Mediterranean Sea* 107: 89–102.
doi:10.1016/j.marchem.2006.10.001
- Ranjan, G., Rao, A.S.R. 2007. *Basic and Applied Soil Mechanics*. New Delhi, New Age International Publishers Ltd.
- Rao, S.M., Sridharan, A., Chandrakaran, S. 1993. Consistency limits behavior of bentonites exposed to sea water. *Mar. Georesources Geotechnol.* 11: 213–227.
doi:10.1080/10641199309379919
- Rekik, B., Boutouil, M. 2009. Geotechnical properties of dredged marine sediments treated at high water/cement ratio. *Geo-Mar. Lett.* 29: 171–179.
doi:10.1007/s00367-009-0134-x

Rhoades, J.D., Chanduvi, F., Lesch, S.M., Nations, F. and A.O. of the U. 1999. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Robas, A., Logar, J. 2008. Prve izkušnje s seizmičnim dilatometrom v Sloveniji, V: Razprave Petega Posvetovanja Slovenskih Geotehnikov, Nova Gorica. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo. 155–162.

Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Can. Geotech. J.* 27: 151–158.
doi:10.1139/t90-014

Robertson, P.K. 2009a. CPT-DMT Correlations. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 135: 1762–1771.
doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000119

Robertson, P.K. 2009b. Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. *Can. Geotech. J.* 46: 1337–1355.
doi:10.1139/T09-065

Robertson, P.K., Cabal, K.L. 2010. Estimating soil unit weight from CPT. Presented at the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.

Robertson, P.K., Cabal, K.L. 2015. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. California, Gregg Drilling & Testing, Inc.

Sağlam, S. 2015. A critical assessment on seismic liquefaction potential of fine-grained soils. *Nat. Hazards* 79: 1847–1865.
doi:10.1007/s11069-015-1936-y

Satellite imaging corporation 2010. FORMOSAT-2 Satellite Image of Toxic Sludge in Kolontar, Ajka, Hungary.
<http://www.satimagingcorp.com/gallery/more-imagery/formosat-2/formosat-2-ajka-hungary-toxic-spill>. (pridobljeno 11.9.2016)

Schatzmann, M., Fischer, P., Bezzola, G.R. 2003. Rheological Behavior of Fine and Large Particle Suspensions. *J. Hydraul. Eng.* 129: 796–803.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:10(796)

Schmertmann, J.H. 1991. The Mechanical Aging of Soils. *J. Geotech. Eng.* 117: 1288–1330.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1288)

Schramm, G. 2000. A Practical Approach to Rheology and Rheometry, 2nd Edition. Karlsruhe, Germany, Gebrueder HAAKE GmbH.

Sharma, B., Bora, P.K. 2003. Plastic Limit, Liquid Limit and Undrained Shear Strength of Soil-Reappraisal. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 129: 774–777.
doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(774)

Sharma, S., Singh, D.N. 2015. Characterization of Sediments for Sustainable Development: State of the Art. *Mar. Georesources Geotechnol.* 33: 447–465.
doi:10.1080/1064119X.2014.953232

Sheehan, C., Harrington, J. 2012. Management of dredge material in the Republic of Ireland - A review. *Waste Manag.* 32: 1031–1044.
doi:10.1016/j.wasman.2011.11.014

- Sherwood, P. 1993. Soil stabilization with cement and lime. State of the art review. Transp. London, Res. Lab. HMSO.
- Siham, K., Fabrice, B., Edine, A.N., Patrick, D. 2008. Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. *Waste Manag.* 28: 919–928.
doi:10.1016/j.wasman.2007.03.027
- Silitonga, E., Levacher, D., Mezazigh, S. 2009. Effects of the use of fly ash as a binder on the mechanical behaviour of treated dredged sediments. *Environ. Technol.* 30: 799–807.
doi:10.1080/09593330902990089
- Singh, S. 1996. Liquefaction characteristics of silts. *Geotech. Geol. Eng.* 14: 1–19.
doi:10.1007/BF00431231
- SIST-TS CEN ISO/TS 22476-11:2008. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Preskušanje na terenu - 11. del: Ploskovni dilatometriški preskus (ISO 22476-11:2005).
- SIST ISO/TS 17892-5:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 5. del: Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem.
- SIST ISO 10390:1996. Kakovost tal - Ugotavljanje pH.
- Sivapullaiah, P., Savitha, S. 1999. Index Properties of Illite-Bentonite Mixtures in Electrolyte Solutions. *Geotech. Test. J.* 22: 257.
doi:10.1520/GTJ11116J
- Smolar, J. 2015. Raziskave in napoved obnašanja sedimentov iz vodnih okolij. V: Jovičić, V. (ur.), Zbornik Referatov 16. Šukljetov dan. Ljubljana, SLOGED.
- Smolar, J., Mladenovič, A., Petkovšek, A. 2009. So morski sedimenti iz Luke Koper lahko alternativni surovinski vir? *Ekolist* 2009: 33–38.
- Smolar, J., Maček, M., Petkovšek, A., Merc, M., Logar, J. 2015. Poročilo o kontrolnih raziskavah in ocena zgoščenosti in togosti nasipov : iz na suho odložene rdeče sadre v akumulaciji Za Travnikom - stanje september 2015 (L-08/15). Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.
- Smolar, J., Maček, M., Petkovšek, A. 2016. Vloga lizimetrov pri vrednotenju okoljske sprejemljivosti rabe alternativnih materialov v geotehnikih. V: Jovičić, V. (ur.) Zbornik sedmega posvetovanja slovenskih geotehnikov. Ljubljana, Slovensko geotehnično društvo: 217–225.
- Soga, K., Kumar, K., Biscontin, G., Kuo, M. 2015. Geomechanics from Micro to Macro: Proceedings of the TC105 ISSMGE International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, Cambridge, UK, 1-3 September 2014. USA, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Sovinc, I. 1993. Ocenitev začetnih usedkov morskih glinastih sedimentov, V: Razprave Prvega Posvetovanja Slovenskih Geotehnikov, Bled. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 41–48.
- Sovinc, I. 1994. Istražni radovi pri izgradnji luka. V: Geotehnika prometnih građevina: znanstvenostručno savjetovanje, Zagreb. Novigrad, Institut građevinarstva Hrvatske: 47–54.
- Sovinc, I., Likar, J., Vogrinčič, G., Žigman, F. 1985. Loading tests on closed and open ended pure piles, V: Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam, Boston, San Francisco, A.A.Balkema: 1475–1478.

Sovinc, I., Vogrinčič, G. 1994. Geotechnical properties of marine sediments from Koper Bay, V: Proceedings of 13th ICSMFE. New Delhi, Oxford & IBH: 263–266.

Sreedeeep, S., Singh, D.N. 2006. Methodology for determination of osmotic suction of soils. *Geotech. Geol. Eng.* 24: 1469–1479.

doi:10.1007/s10706-005-1882-7

Sridharan, A. 1991. Engineering behaviour of fine grained soils - a fundamental approach. *Indian Geotech. J.* 21: 1–136.

Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N. 2002. Mechanisms Controlling the Undrained Strength Behavior of Remolded Ariake Marine Clays. *Mar. Georesources Geotechnol.* 20: 21–50.

doi:10.1080/106411902753556843

Stamatakis, K., Tien, C. 1991. Cake formation and growth in cake filtration. *Chem. Eng. Sci.* 46, 1917–1933.

doi:10.1016/0009-2509(91)80153-P

Stolle, D., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. 1999. A consolidation model for a creeping clay. *Can. Geotech. J.* 36, 754–759.

doi:10.1139/t99-034

Suits, L.D., Sheahan, T.C., Abedi-Koupai, J., Mehdizadeh, H. 2008. Estimation of Osmotic Suction from Electrical Conductivity and Water Content Measurements in Unsaturated Soils. *Geotech. Test. J.* 31, 100322.

doi:10.1520/GTJ100322

Ščančar, J., Zuliani, T., Turk, T., Milačič, R. 2006. Organotin Compounds and Selected Metals in the Marine Environment of Northern Adriatic Sea. *Environ. Monit. Assess.* 127: 271–282.

doi:10.1007/s10661-006-9278-6

Šelekar, N. 2015. Vpliv stopnje prekonsolidacije in hitrosti striženja v direktnem strižnem aparatu na strižne karakteristike zemljin, Diplomaska naloga, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo. Ljubljana, UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Širca, A., Rajar, R., Harris, R.C., Horvat, M. 1999. Mercury transport and fate in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) - a two-dimensional modelling approach. *Environ. Model. Softw.* 14: 645–655.

doi:10.1016/S1364-8152(99)00006-7

Šuklje, L. 1957. The analysis of the consolidation process by the isotaches method. V: Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London, Butterworths scientific publications: 200–206.

Šuklje, L. 1967. *Mehanika tal*. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.

Šuklje, L. 1969. *Rheological aspects of soil mechanics*. London, Wiley-Interscience.

Tanner, R.I., Walters, K. 1998. *Rheology: An Historical Perspective*. Amsterdam, Elsevier.

Tarleton, S., Wakeman, R. 2006. *Solid/Liquid Separation Equipment Selection and Process Design*. Burlington, Elsevier.

Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey, John Wiley & Sons.

Texas Department of Transportation 2005. Guidelines for Modification and Stabilization of Soils and Base for Use in Pavement Structures.

<https://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cmd/tech/stabilization.pdf> (Pridobljeno 11.9.2016)

Theiliander, H., Fathi-Najafi, M. 1996. Simulation of the build-up of a filter cake. *Filtr. Sep.* 33: 417–421.

doi:10.1016/S0015-1882(97)84302-9

Torrance, J.K. 1984. A comparison of marine clays from Ariake Bay, Japan and the South Nation River landslide site, Canada. *Soils Found.* 24, 75–81.

doi:10.3208/sandf1972.24.2_75

UNEP 2006. Methods for sediment sampling and analyses (Mediterranean Action Plan). Athens, Greece, United Nations Environment Programme (UNEP).

Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh. Uradni list RS, št. 68/96 in 41/04.

Uredba o odlagališčih odpadkov. Uradni list RS, št. 10/14 in 54/15.

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo. Uradni list RS, št. 64/12, 64/14 in 98/15, 2014.

USEPA 1993. Solidification/stabilization and its application to wastes material, Technical resource document, EPA/530/R-93/012.

Velde, B. 1995. Composition and Mineralogy of Clay Minerals. V: Velde, B. (ur.). Origin and Mineralogy of Clays. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. 8–42.

Vermeer, P.A., Stolle, D., Bonnier, P.G. 1997. From the classical theory of secondary compression to modern creep analysis, V: Computer Methods and Advances in Geomechanics. International conference; 9th, Computer methods and advances in geomechanics, Wuhan, China. Netherland, Balkema: 2469–2478.

Wairagu, R.M. 2012. Numerical investigation of constant pressure filtration (Master's Thesis). Ronald Maina Wairagu. Longborough, Longborough University.

Wakeman, R.J. 1981. The formation and properties of apparently incompressible filter cakes under vacuum on downward facing surfaces. *Chem. Eng. Res. Des.*: 260–270.

Wakeman, R.J., Tarleton, E.S. 1999. Filtration: Equipment Selection, Modelling and Process Simulation. Oxford, UK, Elsevier.

Wang, D.X., Abriak, N.E., Zentar, R., Xu, W. 2012. Solidification/stabilization of dredged marine sediments for road construction. *Environ. Technol.* 33: 95–101.

doi:10.1080/09593330.2011.551840

West, T.R. 2010. Geology Applied to Engineering. Illinois, Waveland Press.

Whipple, K.X., Dunne, T. 1992. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 104: 887–900.

doi:10.1130/0016-7606(1992)104<0887:TIODFR>2.3.CO;2

Whorlow, R.W. 1992. Rheological techniques. UK, Ellis Horwood Limited.

Wilson, G.W., Fredlund, D.G., Barbour, S.L. 1997. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Can. Geotech. J.* 34: 145–155.
doi:10.1139/t96-078

Winterwerp, J.C., van Kesteren, W.G.M. 2004. *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment Dynamics in the Marine Environment, Developments in Sedimentology.* Oxford, UK, Elsevier Science.

WISE Uranium Project 2009. The Stava tailings dam failure (Trento, Italy) (last updated 13 May 2009), <http://www.wise-uranium.org/mdafst.html>. (Pridobljeno 11.9.2016)

Wroth, C.P. 1984. The interpretation of in-situ soil tests. *Géotechnique* 34, No. 4, 449-489.

Yan, W.M., Chang, J. 2015. Effect of pore water salinity on the coefficient of earth pressure at rest and friction angle of three selected fine-grained materials. *Eng. Geol.* 193: 153–157.
doi:10.1016/j.enggeo.2015.04.025

Yukselen, Y. in Kaya, A. 2008. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering geology*, 102(1-2), 38–45.
doi:10.1016/j.enggeo.2008.07.002

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Ören, A.H. 2008. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Eng. Geol.* 102: 54–61.
doi:10.1016/j.enggeo.2008.07.005

Zentar, R., Abriak, N., Dubois, V. 2009. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments. *Appl. Clay Sci.* 42: 391–397.
doi:10.1016/j.clay.2008.04.003

Znidarčič, D. 2007. *Soil and water: The essence of soil mechanics*, V: 8. Šukljeto Dnevi, Strunjan, Zbornik. Slovensko geotehnično društvo, Ljubljana.

Zuliani, T., Mladenovič, A., Ščančar, J., Milačič, R. 2016. Chemical characterisation of dredged sediments in relation to their potential use in civil engineering. *Environ. Monit. Assess.* 188: 1–12.
doi:10.1007/s10661-016-5239-x

Zupančič-Valant, A. 2007. *Uvod v reologijo.* Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo.

ZZV 2011. *Ocena odpadkov, klasifikacija odpadkov, možnost ravnanja z morskim sedimentom iz luških kaset za Luko Koper d.d. (78–69/10_1).* Novo Mesto, Zavod za zdravstveno varstvo.

Žagar, D., Knap, A., Warwick, J.J., Rajar, R., Horvat, M., Četina, M. 2006. Modelling of mercury transport and transformation processes in the Idrijca and Soča river system. *Sci. Total Environ., Selected papers from the 7th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Ljubljana, Slovenia June 27 - July 2, 2004* 368: 149–163.
doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.068

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G., Četina, M. 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. *Mar. Chem., Mercury Cycling in Surface and Deep Waters of the Mediterranean Sea* 107: 64–88.
doi:10.1016/j.marchem.2007.02.007