

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

MATEJ MAČEK, univ. dipl. inž. grad.

**VPLIV MATRIČNE SUKCIJE NA POMIKE
PLAZU SLANO BLATO**

Doktorska disertacija štev.: 226

**INFLUENCE OF MATRIC SUCTION ON THE
MOVEMENTS OF SLANO BLATO LANDSLIDE**

Doctoral thesis No.: 226

Temo doktorske disertacije je odobrila Komisija za doktorski študij na 8. redni seji,
8. julija 2010. Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Bojan Majes.

Ljubljana, 10. oktober 2012

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Bojan Majes,
- izr. prof. dr. Janko Logar,
- prof. dr. Breda Mirtič, UL NTF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 9. redni seji, dne 31. marca 2010.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Janko Logar,
- doc. dr. Ana Petkovšek,
- prof. dr. Breda Mirtič, UL NTF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 32. redni seji, dne 20. junija 2012.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- prof. dr. Bojan Majes, mentor,
- izr. prof. dr. Janko Logar,
- doc. dr. Ana Petkovšek,
- prof. dr. Breda Mirtič, UL NTF,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 33. redni seji, dne 26. septembra 2012.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATEJ MAČEK**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom:
»**VPLIV MATRIČNE SUKCIJE NA POMIKE PLAZU SLANO BLATO**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 10. oktober 2012

.....
(podpis)

Stran za popravke

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**UDK: 551.435.6: 624.131 (043.3)**

Avtor: Matej Maček
Mentor: prof. dr. Bojan Majes
Naslov: Vpliv matrične sukcije na pomike plazu Slano blato
Tip dokumenta: Doktorska disertacija
Obseg in oprema: 210 str., 22 pregl., 162 sl., 260 en.
Ključne besede: mehanika zemljin, nezasičene zemljine, laboratorijske preiskave, terenske preiskave, lezenje zemljin

Izveček:

V doktorski disertaciji je obravnavan vpliv matrične sukcije na pomike plazu Slano blato. V prvem delu disertacije je predstavljena retencijska krivulja in empirični materialni modeli za opis inženirskih lastnosti nezasičene zemljine v odvisnosti od matrične sukcije. Opisane so tudi metode merjenja sukcije, vzroki za gibanje vode v vadozni coni zemljine, pojav krčitvenih razpok in reološki modeli za oceno lezenja plazov.

V praktičnem delu naloge je predstavljen plaz Slano blato, ki je z ocenjenim volumnom nestabilne mase preko 10^6 m^3 eden izmed štirih velikih zemeljskih plazov v Sloveniji. Na podlagi meritev sukcije v laboratoriju in izkazane relevantnosti vpliva sukcije na stabilnost plazu so bili na plazu v jeseni 2007 vgrajeni Watermark merilniki sukcije. Za potrebe ocene lezenja plazu pa so bile v letu 2011 vgrajene tudi geodetske točke. V nadaljevanju so predstavljene obsežne laboratorijske preiskave za kvaliteten opis dogajanja v zemljini med sušenjem in ponovnim vlaženjem ter preiskave lezenja zemljine ob konstantni strižni obremenitvi. Na podlagi laboratorijskih raziskav je bil razvit materialni model, ki opisuje retencijsko krivuljo materiala in strižno lezenje zemljine.

S terenskim opazovanjem pridobljene robne pogoje na površini plazu Slano blato (padavine in potencialna evapotranspiracija) smo vstavili v numerični program, ki z že omenjenim materialnim modelom opisuje 1D tok vode. Numerične izračune smo primerjali s terenskimi meritvami sukcije. Podobno, smo na podlagi terenskih meritev in numeričnih izračunov sklepali tudi na pomike plazu Slano blato.

V zaključnem poglavju so predstavljene sklepne ugotovitve ter priporočila za nadaljnje raziskovalno delo.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 551.435.6: 624.131 (043.3)

Author: Matej Maček
Assoc. Supervisor: Prof. dr. Bojan Majes
Title: The influence of matric suction on the movements of Slano blato landslide
Document type: Doctoral Dissertation
Notes: 210 p., 22 tab., 162 fig., 260 eq.
Key words: soil-mechanics, unsaturated soil, laboratory test, field observations, creep

Abstract:

This PhD thesis presents the impact of matric suction on the movements of Slano blato landslide. The first part of the thesis presents water retention curve and the empirical material models which describe the engineering properties of unsaturated soil as a function of matric suction. Methods for suction measurements, water movement in the vadose zone, the occurrence of shrinkage cracks and rheological models for landslide creep description are also presented.

In the practical part of the thesis Slano blato landslide is presented. Slano blato landslide is with an estimated volume of 10^6 m^3 one of the four major landslides in Slovenia. Due to shown contribution of matric suction on landslide stability, Watermark suction sensors were installed in Slano blato landslide in autumn of 2007. For the landslide creep measurements measuring geodetic point were installed in 2011. In the next part the extensive laboratory tests for description of soil during wetting and drying or shearing with constant shear stress are presentment. Based on laboratory studies material model has been developed, which describes the water retention curve and landslide creep.

The obtained boundary conditions on the surface of the Slano blato landslide from the field observations (precipitation and potential evapotranspiration) were inserted into the numerical program. The program describes 1D water flow with the above-mentioned material model. Numerical calculations were compared with field measurements. On the basis of field measurements and numerical calculations the Slano blato landslide were estimated.

The final chapter presents conclusions and recommendations for further research.

ZAHVALA

Za nasvete in pomoč pri nastajanju doktorske naloge se zahvaljujem vsem sodelavcem na Katedri za mehaniko tal z laboratorijem. Še posebej se zahvaljujem doc. dr. Ani Petkovšek za konstruktivne pogovore o nezasičenih zemljinah ter Jasni Smolar in Miranu Mercu za pomoč pri laboratorijskih preiskavah. Brez njune pomoči mi marsikatera preiskava ne bi uspela. Jasni se zahvaljujem tudi za pomoč pri oblikovanju slik v tej nalogi.

Zahvaljujem se Marku Kočevanju in Igorju Benku za posredovanje podatkov iz osebnih arhivov o meritvah in dogajanjih na plazu Slano Blato.

Posebej se zahvaljujem prof. dr. Dobroslavu Znidarčiču iz Boulder University Colorado, ki mi je omogočil prve preiskave v sukcijski triosni celici. Posebna zahvala gre tudi doc. dr. Ani Petkovšek, katere doktorska disertacija je predstavljala dobre temelje tej nalogi. Zahvaljujem se tudi svojemu mentorju prof. dr. Bojanu Majesu za njegovo zaupanje, vztrajanje in vzpodbujanje.

KAZALO

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	III
ZAHVALA	IV
1 UVOD	1
1.1 Predstavitev problema	1
1.2 Zemljinska sukcija	2
1.3 Cilji naloge	3
1.4 Vsebina in struktura naloge	3
2 TEORETSKO OZADJE	5
2.1 Posamezne faze zemljine in njihove značilnosti	5
2.1.1 Trdni delci	5
2.1.2 Voda	5
2.1.3 Zrak	8
2.2 Fazna razmerja v zemljini	9
2.3 Napetosti in deformacije	11
2.3.1 Napetosti	11
2.3.2 Deformacije	12
3 SUKCIJA ZEMLJIN	14
3.1 Vodni potenciali	14
3.1.1 Celotni potencial Φ	15
3.1.2 Tlačni potencial P	15
3.1.3 Matrični potencial Ψ_m ali h_c	15
3.1.4 Osmotski potencial Π	15
3.1.5 Gravitacijski potencial Z	15
3.1.6 Kombinacije potencialov	16
3.2 Načini vezanja vode v strukturo zemljine	16
3.2.1 Kapilarna voda	16
3.2.2 Adsorpcija	19
3.2.3 Razmerje med kapilarno in adsorpcijsko vezano vodo	20
4 RETENCIJSKA KRIVULJA	22
4.1 Funkcije za opis retencijske krivulje	23
4.2 Histereza retencijske krivulje	25
4.3 Vpliv strukture zemljine	26
4.4 Ocena retencijske krivulje iz indeksnih podatkov in gostote	28
5 VPLIV SUKCIJE NA TRDNOST ZEMLJINE	30
5.1 Uvod	30
5.2 Zapis strižne trdnosti s popravkom kohezije	31
5.3 Popravek efektivne napetosti	32

5.4	Neodvisni napetostni spremenljivki	32
5.5	Sukcijska napetost	34
5.6	Natezna trdnost zemljine	35
6	KRČITVENE RAZPOKE	37
7	VPLIV SUKCIJE NA PREPUSTNOST ZEMLJINE	39
7.1	Vodoprepustnost zasičenih zemljin	39
7.2	Vodoprepustnost nezasičenih zemljin	41
7.2.1	Histerezo obnašanje krivulje vodoprepustnost – sukcija	43
7.3	Gibanje zraka in vodne pare	44
7.3.1	Gibanje zraka v zemljini	44
7.3.2	Difuzija zraka skozi vodi	45
7.3.3	Difuzija vodne pare	45
8	VPLIV SUKCIJE NA SPREMEMBE VOLUMNA ZEMLJINE	46
8.1	Modeli za zasičeno zemljino	46
8.1.1	Cam-clay model za zasičeno zemljino	46
8.1.2	Modified Cam-clay model za zasičeno zemljino	50
8.2	Modeli za nezasičeno zemljino	51
8.2.1	Model obnašanja zemljine Fredlund in Morgensterna (1976)	52
8.2.2	BEM model za obnašanje nezasičenih zemljin	53
8.2.3	Cam-clay model za nezasičene zemljine	56
8.3	Zaključek	57
9	MERITVE SUKCIJE	59
9.1	Neposredne metode	59
9.1.1	Neposredno merjenje sukcije	59
9.1.1.1	Peščeni slop	59
9.1.1.2	Merjenje z visečim vodnim stolpcem	60
9.1.1.3	Tenziometer	61
9.1.1.4	HYPROP	63
9.1.2	Osnovna translacijske meritve – tlačni lonec in sukcijna triosna celica	64
9.1.3	Osmotska metoda	66
9.2	Posredne meritve	66
9.2.1	Primarne metode	66
9.2.1.1	Psihrometri s termočlenom	67
9.2.1.2	Psihrometri z ohlajevanjem zrcalca	67
9.2.2	Sekundarne metode	68
9.2.2.1	Metoda filter papirja	68
9.2.3	Terciarne metode	69
9.2.3.1	Merilniki sukcije na principu merjenja elektroprevodnosti	69
9.2.3.2	Merilniki sukcije na principu merjenja toplotne prevodnosti	70
9.2.4	Metoda ekvibracije relativne vlage	70
9.3	Zaključek	71

10	GIBANJE VODE V ZEMLJINI	72
10.1	Stacionarni tok	72
10.2	Nestacionarni tok	73
10.3	Robni pogoji	74
10.4	Evapotranspiracija	74
10.4.1	Ocena evapotranspiracije	76
10.4.1.1	Izračun evaporacije	76
10.4.1.2	Izračun referenčne evapotranspiracije	78
10.4.1.3	Korekcija referenčne evapotranspiracije za golo zemljo	81
10.4.1.4	Vpliv sukcije na evaporacijo	81
11	POBOČNA PREMIKANJA	83
11.1	Opredelevitev in razvrstitev pobočnih premikanj	83
11.2	Stabilnost plazov in sukcija	84
11.3	Lezenje plazu	90
11.3.1	Fenomenološki modeli	92
11.3.2	Lezenje v strižnih pogojih	95
11.3.2.1	Zaključek	97
12	TERENSKÉ PREISKAVE NA PALZU SLANO BLATO	99
12.1	Plaz Slano blato	99
12.1.1	Zgodovina plazu	99
12.2	Geološki opis plazu Slano Blato	101
12.3	Terenske preiskave na plazu Slano blato	103
12.4	Rezultati starega opazovalnega sistema in terenskih meritev	104
12.5	Rezultati novega opazovalnega sistema in LIDAR skeniranje plazu	105
12.6	Nova opazovanja, vzpostavljena v letih 2007 - 2011	107
12.6.1	Meritve sukcije	107
12.6.2	Geodetske meritve na površini	110
12.6.3	Gibanje vode v vodnjaku	111
12.6.4	Primerjava med pomiki plazu in sukcijo	111
12.6.5	Ovojnica sukcije/pornih tlakov	111
13	LABORATORIJSKE PREISKAVE NA PLAZINI IZ PLAZU SLANO BLATO	113
13.1	Uvod	113
13.2	Opisi postopkov in naprav	114
13.2.1	Meja krčenja	114
13.2.2	Vodovpojnost po Enslin-Neff postopku	114
13.2.3	Sukcijski enostavni strižni aparat - SESA	114
13.3	Predstavitev zemljine	117
13.4	Meja krčenja	118
13.5	Vodovpojnost po Enslin-Neff postopku	119
13.6	Edometriške preiskave	120
13.7	Meritve sukcije	121
13.8	Volumenske deformacije v odvisnosti od sukcije	126
13.9	Preiskave strižne trdnosti	127

13.10	Lezenje	131
13.10.1	Preiskave lezenja pri isti stopnji strižne obremenitve in različnih vertikalnih obremenitvah	132
13.10.2	Preiskave lezenja pri isti vertikalni obremenitvi in pri različnih stopnjah strižne obremenitve brez sukcije	132
13.10.3	Preiskave lezenja pri isti vertikalni obremenitvi in isti stopnji strižne obremenitve z in brez sukcije	136
13.10.4	Preiskave lezenja s postopnim strižnim obremenjevanjem	136
13.10.5	Vpliv razbremenitve in ponovne obremenitve	140
13.10.6	Zaključki	142
14	VREDNOTENJE REZULTATOV PREISKAV IN NUMERIČNO MODELIRANJE	143
14.1	Zasičena zemljina	143
14.1.1	Izbira parametra α	144
14.1.2	Popravek strižnega kota φ'	145
14.1.3	Vrednotenje edometriških preiskav	145
14.1.4	Triosne preiskave	147
14.1.5	Enostavne strižne preiskave	149
14.2	Nezasičena zemljina	151
14.2.1	Retencijska krivulja	151
14.2.2	Volumenske spremembe v odvisnosti od sukcije	153
14.2.2.1	Krčenje zemljine.	153
14.2.2.2	Sukcijski edometer (SESA)	157
14.2.2.3	Deviška retencijska krivulja	162
14.2.3	Vpliv sukcije na trdnost zemljine	164
14.2.3.1	Enostavni strig	164
14.2.3.2	Nedrenirana strižna trdnost	166
14.2.4	Lezenje zemljine	167
14.2.4.1	Ocena začetnih deformacij	167
14.2.4.2	Ocena lezenja zemljine	168
14.3	Numerični model	169
14.3.1	Retencijska krivulja	170
14.3.2	Popravek efektivnih napetosti	170
14.3.3	Volumenske deformacije	170
14.3.4	Tok tekočine	171
14.3.4.1	Vodoprepustnost	172
14.3.4.2	Difuzija vodne pare v zraku	172
14.3.5	Sprememba totalne napetosti	173
14.3.6	Diferenčna metoda	173
14.3.6.1	Robni pogoji	175
14.3.6.2	Pogoji natančnosti izračuna	176
14.4	Analize toka vode z numeričnim modelom	176
14.4.1	Primerjave z laboratorijskimi testi	176
14.4.2	Primerjave s terenskimi meritvami	181
14.4.2.1	Vpliv stopnje evaporacije	182

14.4.2.2	Vpliv vodoprepustnosti	183
14.4.2.3	Vpliv tlaka na spodnjem robu	184
14.4.2.4	Primerjava s terenskimi meritvami v obdobju 1.11.2007-1.5.2012	185
14.5	Ocena pomikov plazu Slano blato	187
14.5.1	Postopek vrednotenja	187
14.5.1.1	Zaključek	190
15	ZAKLJUČEK	191
15.1	Predlogi za nadaljnje delo	193
16	POVZETEK	195
17	SUMMARY	197
VIRI		199

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Pogled na plaz Slano blato	1
Slika 2.1: Vodna molekula levo (Lazarini in Brenčič, 1989) in vodikova vez desno (Marshall in Holmes, 1988).	6
Slika 2.2: Smer delovanja posameznih komponent napetostnega tenzorja .	11
Slika 2.3: Pomik točke telesa po komponentah	12
Slika 3.1: Medmolekulske vezi vodne molekule v notranjosti kapljevine in na vodni površini (Fredlund in Rahardjo, 1993).	16
Slika 3.2: Kapilarni dvig (Marshall in Holmes, 1988).	17
Slika 3.3: Skica kontaktnih ploskev omočljive in neomočljive snovi (Kladnik, 1989).	17
Slika 3.4: Površinska napetost na ukrivljeni površini z dvema radijema ukrivljenosti (levo) (Fredlund in Rahardjo, 1993) in primer takšne membrane v primeru vode med dvema kroglama (Cho in Santamarina, 2001).	18
Slika 3.5: Zveza med pornim radijem, sukcijo in kapilarnim dvigom (Fredlund in Rahardjo, 1993).	19
Slika 3.6: Jakost posameznih komponent sil med delci glede na velikost delcev (levo) in stopnjo zasičenosti (desno) (Lu in Likos, 2006).	20
Slika 3.7: Enotska celica (Or in Tuller, 1999).	21
Slika 3.8: Vpliv kapilarno in adsorpcijsko vezane vode na sukcijo zemljine (Or in Tuller, 1999).	21
Slika 4.1: Retencijska krivulja (prirejeno po Fredlund in Xing, 1994, Sillers et al., 2001, Lu et al., 2007)	23
Slika 4.2: Učinek močenja in sušenja na retencijsko krivuljo (Maček, 2006).	25
Slika 4.3: Vpliv naklona, hrapavosti in različnih materialov na omočitveni kot.	25
Slika 4.4: Povezovalne krivulje med retencijsko krivuljo sušenja in vlaženja (Casini et al., 2008).	26
Slika 4.5: Vpliv vlage pri nabijanju in količnika por na retencijsko krivuljo zbite peščene gline (Vanapalli et al., 1999).	27
Slika 4.6: Vpliv količnik por na točko vstopa zraka, točko vstopa vode in rezidualno vlago (Kawai et al., 2000).	27
Slika 4.7: Vpliv vlage pri nabijanju na krčenje zemljine (Birle et al., 2008).	28
Slika 4.8: Primerjava med izmerjeno retencijsko krivuljo in napovedjo modelov (Thakur et al., 2006)	29
Slika 5.1: Strižna trdnost v odvisnost od bočnih pritiskov pri IU testih (Taek Oh et al., 2008).	31
Slika 5.2: Rezultati različnih testnih postopkov na enakih vzorcih (Taek Oh et al., 2008).	31
Slika 5.3: Vrednosti c in φ v odvisnosti od sukcije za primer sušenja ali vlaženja (Gallage in Uchimura, 2010)	32
Slika 5.4: Vrednosti φ' , φ^a in φ^b za nezasičene zemljine (Toll, 2000; cit. po Petkovšek, 2006).	33
Slika 5.5: Koeficient efektivne napetosti glede na prejšnja eksperimentalna in teoretična dela (levo) in eksperimentalno potrjene zveze (desno) (Vanapalli in Fredlund, 2000).	34
Slika 5.6: Zveza med sukcijso napetostjo in volumetrično vlago ter sukcijo (Lu in Likos, 2006).	34
Slika 5.7: Natezna trdnost v odvisnosti od stopnje zasičenosti (Lu et al., 2007).	36
Slika 6.1: Pot totalnih in efektivnih napetosti pri spreminjanju tlaka vode.	38
Slika 7.1: Hitrost vode v zemljini je večja od tiste, določene po Darcyju, zaradi poroznosti in vijugavosti (Reddi, 2003).	40
Slika 7.2: Razlike v posameznih fizikalnih količinah (Cedergren, 1989 po Reddi, 2003).	40

Slika 7.3: Histerezo obnašanje retencijske krivulje, odvisnost vodoprepustnosti od sukucije in odvisnost vodoprepustnosti od volumetrične vlage (Liakopoulos, 1965).	44
Slika 8.1: Rezultat edometriškega testa na zemljini (Schofield in Wroth, 1968).	47
Slika 8.2: Stanje vzorca med tečenjem glede na črto kritičnega stanja (Schofield in Wroth, 1968).	48
Slika 8.3: Elastično obnašanje vzorca in meja tečenja (Schofield in Wroth, 1968).	49
Slika 8.4: Plastifikacija zemljine (levo) in meja tečenja v prostoru v , p' in q (desno) (Schofield in Wroth, 1968).	49
Slika 8.5: Plastifikacija zemljine za različna razmerja p/q (Schofield in Wroth, 1968).	50
Slika 8.6: Meja tečenja v prostoru $p' - q$.	50
Slika 8.7: Količnik por v v odvisnosti od sukucije in sferične napetosti v izotropnem stanju (Matyas in Radhakrishna, 1968, citat po Fredlund in Rahardjo, 1993).	52
Slika 8.8: Konceptualni model obnašanja stisljive zemljine (Nuth in Laloui, 2008).	52
Slika 8.9: Stisljivost zemljine v odvisnosti od sukucije (Alonso et al. 1990).	55
Slika 8.10: Meja tečenja z mejama LC – obremenitev-kolaps in SI – povečanje sukucije (Alonso et al., 1990).	55
Slika 8.11: Tri dimenzionalna ploskev meje tečenja v (p, q, s) prostoru (Alonso et al., 1990).	56
Slika 8.12: Tri dimenzionalna ploskev meja tečenja v (p', q, S_r) prostoru (Casini et al., 2007).	57
Slika 9.1: Primer peščenega slopa (Lins et al., 2009).	60
Slika 9.2: Primer merjenja sukucije z visečim vodnim stolpcem. Levo naprava po Haines (1930), kjer je bilo potrebno višinsko razliko popravljati in desno novejša oblika naprave, ki to odpravlja (ASTM D 6836) (Vanapalli et al., 2008).	60
Slika 9.3: Tenziometer s Hg manometrom (Marshall in Holmes, 1988).	61
Slika 9.4: Pojav vodnih mehurčkov v tenziometru (Marinho et al., 2008).	62
Slika 9.5: Naprava HYPROP.	63
Slika 9.6: Tlačni lonec.	64
Slika 9.7: Prepihanje difuziranega zraka iz spiralnih kanalov ter primer sistema za prepihanje porozne ploščice (Vanapalli et al., 2008).	65
Slika 9.8: Prerez psihrometra z ohlajevanjem zrcalca (Bulut in Leong, 2008).	67
Slika 9.9: Prikaz merjenja totalne in matrične sukucije (Bulut in Leong, 2008).	69
Slika 9.10: Gips blok merilec sukucije (Bulut in Leong, 2008).	70
Slika 9.11: Skica merilnika sukucije s toplotno prevodnostjo, dioda služi kot termometer, bakrena žica pa kot grelna telo (Bulut in Leong, 2008).	70
Slika 10.1: Povprečni K_c v odvisnosti od ET_0 in intervala med padavinami oziroma zalivanjem za vse tipe zemljin (Allen et al., 1998).	81
Slika 10.2: Razmerje med dejansko in potencialno evaporacijo v odvisnosti od vlage zemljine za različne zemljine (Holmes, 1961).	82
Slika 10.3: Razmerje med dejansko in potencialno evaporacijo v odvisnosti od vlage in sukucije zemljine (Wilson et al., 1994).	82
Slika 11.1: Osnovni načini težnostnih premikanj pobočij (Skaberne, 2001).	84
Slika 11.2: Sile na brezkrainem pobočju (Montrasio in Valentino, 2008).	86
Slika 11.3: Skica pobočja: (a) infiltracija vode v okolico makro por, (b) obsežni deli zemljine so zasičeni, (c) deli zasičene zemljine se širijo in so med seboj povezani (Montrasio in Valentino, 2008).	87
Slika 11.4: Diagram razvoja pornih tlakov med infiltracijo z ovojnico tlakov, ki povzročijo nestabilnost (Collins in Znidarcic, 2004)	89
Slika 11.5: Tipičen primer plazu v nezasičeni coni (Springman, 2005, po Petkovšek, 2006)	89

Slika 11.6: Reološki modeli.	91
Slika 11.7: Maxwellov reološki model in odziv na enotsko obremenitev.	91
Slika 11.8: Kelvin in Voightov reološki model in odziv na enotsko obremenitev.	92
Slika 11.9: Binghamov reološki model in odvisnost napetosti od hitrosti deformacij.	92
Slika 11.10: Prikaz primarne, sekundarne in terciarne faze lezenja.	93
Slika 11.11: Diagram $U_v(T_v)$.	94
Slika 11.12: Izotahe za primer suhega peska (Šuklje, 1969).	94
Slika 11.13: Sistem izohron (Bjerrum, 1967).	95
Slika 11.14: Obnašanje gline med preiskavo lezenja v enostavnem strigu (Meschyan, 1995).	95
Slika 11.15: Primeri modelnih inklinometriških profilov za različne materialne podatke, nivo podzemne vode (GWL) in naklon pobočja α (van Asch et al., 2009).	96
Slika 11.16: Primeri krivulj strižnega lezenja (Meschyan, 2006).	97
Slika 11.17: Meritve lezenja na vzorcu zemljine pri različnih sukucijah (Wang in Yin, 2009).	98
Slika 12.1: Mehanizem prehoda plazenja v viskozni blatni tok (Ribičič M., 2002b).	99
Slika 12.2: Geološka karta Vipavske doline z označenimi plazovi.	101
Slika 12.3: Geološki vzdolžni profil čez plaz Slano blato (Logar et al., 2005).	102
Slika 12.4: Poenostavljena geološka karta z označenimi gravitacijskimi bloki A-F, Mala Gora, Lukovec, Gola gorica, Visoko, Križec in Gradišče (Placer et al., 2008).	102
Slika 12.5: Shematski geološki profil preko Velikega Modrasovca in Male Gore ter detajl strukturne kadunje (Placer et al., 2008).	102
Slika 12.6: Deli plazu Slano blato (Ribičič, 2002).	103
Slika 12.7: Meritve na inklinometru B5 na mestu današnjih vodnjakov do uničenja inklinometra (Fifer Bizjak in Zupančič, 2009).	105
Slika 12.8: Hitrost potresnih valov na vzdolžnem profilu plazu Slano blato (Logar et al., 2005).	105
Slika 12.9: Karta naklonov (arhiv Marka Kočevarja).	106
Slika 12.10: Karta razlik ploskev (Kogoj et al., 2007).	106
Slika 12.11: Pomik skale na zgornjem odlomnem robu, ki ga je zaznalo LIDAR skeniranje plazu (arhiv Marka Kočevarja) in pomiki, ki so ga zaznale kamere dva meseca kasneje.	107
Slika 12.12: Lokacija kamer (CAM), merilcev sukucije (MS) in piezometra (P).	108
Slika 12.13: Mesta vgradnje merilcev sukucije in temperature na lokaciji 1 in 2.	108
Slika 12.14: Meritve sukucije na lokaciji MS1 (zgoraj) in MS2 (spodaj).	109
Slika 12.15: Lokacija geodetskih točk in pripadajoči pomiki točk.	110
Slika 12.16: Nihanje nivoja vode v vodnjaku in v zemljini za vodnjakom.	111
Slika 12.17: Spreminjanje hitrosti lezenja plazu in sukucije s časom.	112
Slika 12.18: Ovojnica pornih tlakov in spreminjanje faktorja varnosti z globino.	112
Slika 13.1: Enslin-Neff aparat.	114
Slika 13.2: Enostavni strižni aparat DTA-136.	115
Slika 13.3: Direktni (levo) in enostavni strižni aparat (desno).	115
Slika 13.4: Sukucijski enostavni strižni aparat - SESA.	116
Slika 13.5: Zrnastostne sestave plazine.	117
Slika 13.6: Vpliv vertikalne obtežbe na mejo krčenja.	119
Slika 13.7: Časovni razvoj vertikalnih deformacij med sušenjem v edometru.	120
Slika 13.8: Edometriški testi v različnih napravah.	121
Slika 13.9: Sukucijska bremenska stopnja 200-300 kPa (zgoraj) in 300-150 kPa (spodaj) pri vertikalni napetosti 100 kPa.	122

Slika 13.10: Meritve sukcije na vzorcih plazine. TL – tlačni lonec, MFP-m metoda filter papirja (matrična), MFP-t metoda filter papirja (totalna), WM Watermark senzor, m retencijska krivulja močenja, s retencijska krivulja sušenja. Velja tudi za naslednje slike.	123
Slika 13.11: Meritve sukcije s psihrometrom z ohlajenim ogledalcem WP4-T in metodo filter papirja.	124
Slika 13.12: Meritve sukcije z različnimi metodami v območju sukcije 0-500 kPa.	125
Slika 13.13: Meritve sukcije v napravi SESA.	125
Slika 13.14: Predstavitev vseh meritev na vzorcu iz leta 2010.	126
Slika 13.15: Volumensko obnašanje preizkušanca pri vertikalni obremenitvi 100 kPa med sukcijskim obremenjevanjem. Narejena je približna korekcija zaradi bočnega stiskanja.	127
Slika 13.16: Preiskave v triosni celici.	128
Slika 13.17: Preiskave v direktnem strižnem aparatu.	128
Slika 13.18: Preiskave v direktnem strižnem aparatu.	129
Slika 13.19: Relacija nedrenirana strižna trdnost-vlaga.	131
Slika 13.20: Relacija nedrenirana strižna trdnost-sukcija za fliš (Petkovšek, 2006).	131
Slika 13.21: Lezenje zemljine pri različnih vertikalnih obremenitvah in pri enaki stopnji strižne obremenitve $\tau / \tau_{\max} = 0,56$.	133
Slika 13.22: Lezenje zemljine pri enakih vertikalnih obremenitvah (zgoraj 50 kPa , spodaj 100 kPa) in pri različnih stopnjah strižne obremenitve.	134
Slika 13.23: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja in sekundarne konsolidacije.	135
Slika 13.24: Lezenje zemljine pri vertikalni obremenitvi 50 in 100 kPa, s stopnjo strižne obremenitve 0.49 in 0.61 ter z in brez sukcije.	137
Slika 13.25: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja v odvisnosti od sukcije.	138
Slika 13.26: Lezenje zemljine pri vertikalni obremenitvi 50 kPa za različne načine postopnega obremenjevanja. Zaporedje nizov podaja vrstni red strižnega obremenjevanja.	138
Slika 13.27: Lezenje zemljine pri vertikalni obremenitvi 100 kPa za različne načine postopnega obremenjevanja. Zaporedje nizov podaja vrstni red strižnega obremenjevanja.	139
Slika 13.28: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja za različne stopnje strižne obremenitve z upoštevanjem prispevka sukcije.	140
Slika 13.29: Konsolidacija primarne obremenitve in vseh ponovnih obremenitev, če smo sešteli čas prve obremenitve in ponovnih obremenitev.	141
Slika 13.30: Naklon logaritemske premice sekundarne konsolidacije v primeru, ko smo upoštevali čas stopnje, in v primeru, ko smo sešteli čas vseh obremenitev.	141
Slika 13.31: Primarna obremenitev in ponovna strižna obremenitev za primer vzorca pri stopnji strižne obremenitve 0,61 in sukciiji 50 kPa.	142
Slika 13.32: Primarna obremenitev in ponovna strižna obremenitev za primer vzorca pri stopnji strižne obremenitve 0,95 in sukciiji 0 kPa.	142
Slika 14.1: Meja tečenja za modificiran in originalni Cam clay model. S puščico je prikazan popravek »smeri« tečenja.	145
Slika 14.2: Edometrske meritve in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2005 70 mm, 2010 70 mm vz1, 2010 70 mm vz2, 2010 50 mm in 2010 SESA.	146
Slika 14.2: Edometrske meritve in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2005 70 mm, 2010 70 mm vz1, 2010 70 mm vz2, 2010 50 mm in 2010 SESA.	147
Slika 14.3: CIU meritve v triosni celici in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2002 0.08 mm $w = w_L$ stopnje 100, 200 in 300 kPa.	148

Slika 14.4: CIU meritve v triosni celici in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2002 0.08 mm $w = w_p$ stopnje 100, 200 in 300 kPa.	149
Slika 14.5: Meritve v enostavnem strižnem aparatu. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci pri vertikalni obremenitvi 50, 150 in 200 kPa.	150
Slika 14.6: Meritve sukcije, vlage in stopnje zasičenosti za primer neobremenjenega vzorca.	152
Slika 14.7: Opis meritev z različnimi funkcijami za opis retencijske krivulje.	153
Slika 14.8: Odvisnost parametra popravka efektivne napetosti χ od stopnje zasičenosti.	154
Slika 14.9: Sukcijska napetost v odvisnosti od stopnje zasičenosti.	154
Slika 14.10: Krčenje vzorca med sušenjem in modelne napovedi krčenja.	155
Slika 14.11: Krčenje vzorca med sušenjem v edometru in modelne napovedi krčenja.	156
Slika 14.12: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega s 50 kPa vertikalne napetosti.	158
Slika 14.13: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega s 100 kPa vertikalne napetosti.	159
Slika 14.14: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega z 200 kPa vertikalne napetosti.	160
Slika 14.15: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega z 400 kPa vertikalne napetosti.	161
Slika 14.16: Količnik por zemljine pri različni vertikalni obremenitvi in konstantni sukciji.	162
Slika 14.17: Meritve sukcije pri zanemarljivih totalnih napetostih in modelna napoved.	163
Slika 14.18: Meritve v napravi HYPROP in modelna napoved. Zgoraj preizkušane vgrajen pri vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku, spodaj preizkušane vgrajen pr meji židkosti.	163
Slika 14.19: Modelna deviška retencijska krivulja.	164
Slika 14.20: Meritve v enostavnem strižnem aparatu. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci pri vertikalni obremenitvi 100 kPa in sukciji 20, 50 in 100 kPa.	165
Slika 14.21: Primerjava med merjeno maksimalno horizontalno strižno napetostjo in modelno napovedjo.	166
Slika 14.22: Izmerjena nedrenirana strižna trdnost in modelna napoved.	167
Slika 14.23: Izmerjena nedrenirana strižna trdnost in modelne napovedi.	167
Slika 14.24: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja za različne stopnje strižne obremenitve z upoštevanjem ugodnega prispevka sukcije z označeno zgornjo in spodnjo mejno črto.	169
Slika 14.25: Šablona za izračun problemov po metodi Crank-Nicolson za 1 dimenzionalni problem.	173
Slika 14.26: Presežni porni tlaki med bremensko stopnjo za primer izračuna s korakom od 1 do 60 s (zgoraj) ter za korak 1 s (spodaj).	177
Slika 14.27: Razvoj količnika por s časom za bremenske stopnje v edometru za preizkušane 2010 70 mm vz1.	178
Slika 14.28: Razvoj volumenskih in osnih deformacij s časom za bremenske stopnje sukcije v napravi SESA za vzorec pri vertikalni obremenitvi 100 kPa. Zgoraj so prikazane meritve, spodaj pa rezultat modela.	179
Slika 14.29: Primerjava med meritvijo in rezultati numeričnega modela za primer vzorca HYPROP1.	180
Slika 14.30: Primerjava med meritvijo in rezultati numeričnega modela za primer vzorca HYPROP2.	181
Slika 14.31: Vpliv evaporacije v numeričnem modelu na sukcijo v plazini.	183
Slika 14.32: Vpliv vodoprepustnosti v numeričnem modelu na sukcijo v plazini.	184

Slika 14.33: Vpliv vodoprepustnosti v numeričnem modelu na sukcije v plazini.	185
Slika 14.34: Gibanje sukcije v plazini za obdobje 1.11.2007 – 1.5.2012 (meritve na vrhu in modelni napovedi spodaj).	186
Slika 14.35: Gibanje sukcije v plazini za obdobje 1.11.2007 – 1.5. 2012 ob nepropustni podlagi.	187
Slika 14.36: Ovojnica sukcije v plazini in pogoj lezenja.	188
Slika 14.37: Razvoj pomikov v plazini s časom za obdobje 1.11.2007-1.1.2012 za primer brez upoštevanja ugodnih vplivov sukcije. Zgoraj zgornja meja lezenja, spodaj spodnja meja lezenja.	189
Slika 14.38: Razvoj pomikov v plazini s časom za obdobje 1.11.2007-1.1.2012 za primer z upoštevanjem ugodnih vplivov sukcije. Zgoraj zgornja meja lezenja, spodaj spodnja meja lezenja.	190

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Relativne gostote zrn različnih mineralov (Lambe in Whitman, 1979; citat po: Fredlund in Rahardjo, 1993).	6
Preglednica 2.2: Klasifikacija zemljin glede na velikost zrn - poimenovanje frakcij (SIST EN ISO 14688).	7
Preglednica 2.3: Specifične površine glinenih mineralov (Santamarina et al., 2002).	7
Preglednica 2.4: Jakost medmolekulskih vezi (http://en.wikipedia.org/wiki/Intermolecular_force (10.1.2012)).	7
Preglednica 2.5: Vpliv temperature na viskoznost vode η in površinsko napetost T_s (Marshall and Holmes, 1988).	7
Preglednica 2.6: Henryjeve konstante za vodne raztopine plinov pri temperaturi 298 K.	9
Preglednica 3.1: Trajni strukturni naboj na površini glinenih mineralov (Krauskopf in Bird, 1995).	20
Preglednica 9.1: Pregled merskih metod.	71
Preglednica 11.1: Faktor varnosti v odvisnosti od naklona pobočja β in razmerja med pornimi tlaki in globino porušnice (u_w/h (m/m)) za primer strižnega kota $\phi'=27^\circ$ in $c'=0$.	87
Preglednica 11.2: Osnovni reološki modeli	90
Preglednica 13.1: Pregled uporabljenih standardov.	113
Preglednica 13.2: Indeksne lastnosti plazine.	118
Preglednica 13.3: Kemijska sestava izvirskih vod (Petkovšek, 2006).	118
Preglednica 13.4: Parametri stisljivosti zemljine.	121
Preglednica 13.5: Začetno in končno stanje preizkušancev v napravi SESA.	126
Preglednica 13.6: Rezultati različnih strižnih preiskav različnih vzorcev in/ali različnih metod.	129
Preglednica 13.7: Rezultati naklona logaritemske premice lezenja za preiskovane stopenjske obremenitve.	135
Preglednica 14.1: Parametri modificiranega Cam clay modela.	143
Preglednica 14.2: Meritve sukucije, vlag in stopnje zasičenosti za vzorec 2010.	152
Preglednica 14.3: Parametri Brooks in Coreyeve (1964) funkcije.	152
Preglednica 14.4: Ocena faktorja varnosti in modelne strižne deformacije.	168
Preglednica 14.5: Parametri modificiranega Cam clay modela, Brooksove in Coreyeve retencijske krivulje, ter funkcije za opis vodoprepustnosti zasičene zemljine za preiskovane vzorce finih delcev in za celotno zemljino.	182

LIST OF FIGURES

Figure 1.1: Landslide Slano blato	1
Figure 2.1: Water molecule (left) (Lazarini and Brenčič, 1989) and hydrogen bond (right) (Marshall and Holmes, 1988)	6
Figure 2.2: Stress tensor and suffix notation.	11
Figure 2.3: Separation of displacement components.	12
Figure 3.1: Intermolecular forces inside water and on water surface (Fredlund and Rahardjo, 1993).	16
Figure 3.2: Capillary rise (Marshall and Holmes, 1988).	17
Figure 3.3: Phenomenon of the wetted and non wetted surface (Kladnik, 1989).	17
Figure 3.4: Surface tension on a warped membrane with two different radii of curvature (left) (Fredlund and Rahardjo, 1993) and example of such membrane in case of water between two spheres (Cho and Santamarina, 2001).	18
Figure 3.5: Relationship among pore radius, matrix suction and capillary height (Fredlund and Rahardjo, 1993).	19
Figure 3.6: Contribution of different interparticle forces as a function of particle size (left) and saturation (right) (Lu and Likos, 2006).	20
Figure 3.7: Unit cell (Or and Tuller, 1999).	21
Figure 3.8: Capillary and adsorptive contribution to soil suction (Or and Tuller, 1999).	21
Figure 4.1: Soil water characteristic curve (after Fredlund in Xing, 1994, Sillers et al., 2001, Lu et al., 2007)	23
Figure 4.2: Drying and wetting path of soil water characteristic curve (Maček, 2006).	25
Figure 4.3: Influence of slope, roughness and different materials on wetting angle.	25
Figure 4.4: Scanning curves between main drying and main wetting soil water characteristic curve (Casini et al., 2008).	26
Figure 4.5: Influence of water content at compaction and void ratio on the soil water characteristic curve of sandy clay (Vanapalli et al., 1999).	27
Figure 4.6: Influence of void ration on air entry value, occluded air bubbles point and residual water content (Kawai et al., 2000).	27
Figure 4.7: Influence of water content at compaction on shrinkage deformations (Birle et al., 2008).	28
Figure 4.8: Comparison between measured soil water characteristic curve and prediction by different models (Thakur et al., 2006).	29
Figure 5.1: Variation of shear strength due to confining pressure for IU (Taek Oh et al., 2008)	31
Figure 5.2: Test results for different test procedures (Taek Oh et al., 2008).	31
Figure 5.3: The influence of suction on c in φ for main drying and wetting (Gallage and Uchimura, 2010).	32
Figure 5.4: The φ' , φ^a and φ^b values for unsaturated soil (Toll, 2000; cit. after Petkovšek, 2006).	33
Figure 5.5: Coefficient of effective stress after some previous experimental and theoretical results (left) and experimentally validated forms proposed (right) (Vanapalli and Fredlund, 2000).	34
Figure 5.6: Relationship between suction stress and volumetric water content and suction (Lu and Likos, 2006).	34
Figure 5.7: Relationship between tensile strength and saturation (Lu et al., 2007).	36
Figure 6.1: Total and effective stress paths in respect to water pressure.	38
Figure 7.1: Water velocity is increased by porosity and tortuosity (Reddi, 2003).	40
Figure 7.2: Variability of different engineering properties (Cedergren, 1989 after Reddi, 2003).	40

Figure 7.3: Hysteresis of soil water characteristic curve, relation between water permeability and suction and relation between water permeability and water content (Liakopoulos, 1965).	44
Figure 8.1: Results of oedometer test (Schofield and Wroth, 1968).	47
Figure 8.2: Condition of specimens at yield in relation to critical states line (Schofield in Wroth, 1968).	48
Figure 8.3: Elastic behaviour of soil and yield surface (Schofield and Wroth, 1968).	49
Figure 8.4: Plastification of soil (left) and yield surface in v , p' in q space (Schofield and Wroth, 1968).	49
Figure 8.5: Set of specimen yielding at different stress ratio (Schofield and Wroth, 1968).	50
Figure 8.6: Yield surface in p' - q space.	50
Figure 8.7: Void ratio as function of suction and mean stress (Matyas and Radhakrishna, 1968 cited after Fredlund and Rahardjo, 1993).	52
Figure 8.8: Conceptual model of soil behaviour (Nuth and Laloui, 2008).	52
Figure 8.9: Deformability of soil in respect to soil suction (Alonso et al. 1990).	55
Figure 8.10: Yield surface with Loading collapse (LC) and suction increase (SI) and yield curves (Alonso et al., 1990).	55
Figure 8.11: Three dimensional view of the yield surface in (p, q, s) space (Alonso et al., 1990).	56
Figure 8.12: Three dimensional view of the yield surfaces in (p', q, S_r) space (Casini et al., 2007).	57
Figure 9.1: Soil column (Lins et al., 2009).	60
Figure 9.2: Negative water column. On the left side device by Haines (1930) where constant corrections of water level were needed and on the right side the new ASTM D 6836 device, where no corrections are needed (Vanapalli et al., 2008)	60
Figure 9.3: Tensiometer with Hg manometer (Marshall and Holmes, 1988).	61
Figure 9.4: Formation of air bubbles in tensiometer (Marinho et al., 2008).	62
Figure 9.5: HYPROP device.	63
Figure 9.6: Pressure plate apparatus.	64
Figure 9.7: Flushing diffused air from spiral groove and a system for flushing diffused air from porous stone (Vanapalli et al., 2008).	65
Figure 9.8: Cross section of dew point potentiometer (Bulut and Leong, 2008).	67
Figure 9.9: Schematic drawing of total and matrix suction measurements (Bulut and Leong, 2008).	69
Figure 9.10: Gips block suction sensor (Bulut and Leong, 2008).	70
Figure 9.11: Schematic drawing of thermal conductivity suction sensor (Bulut in Leong, 2008).	70
Figure 10.1: Average K_c as related to the level of ET_0 and the interval between significant rains for all soil types (Allen et al., 1998).	81
Figure 10.2: The ratio between the actual and potential evaporation as a function of soil water content for different soil (Holmes, 1961).	82
Figure 10.3: The ratio between the actual and potential evaporation as a function of soil water content and suction for different soil (Wilson et al., 1994).	82
Figure 11.1: Major types of gravity slope movements (Skaberne, 2001).	84
Figure 11.2: Forces acting on a single slice of an infinite slope (Montrasio and Valentino, 2008).	86
Figure 11.3: Diagram of the slope: (a) infiltration from the zones around the macro-pores; (b) wide portions of soil become saturated; (c) the saturated portions of soil extend and become continuous (Montrasio and Valentino, 2008).	87
Figure 11.4: Results of pore pressure developments during infiltration analysis with superimposed stability envelope (Collins and Znidarcic, 2004)	89

Figure 11.5: Typical landslide in unsaturated zone (Springman, 2005, after Petkovšek, 2006)	89
Figure 11.6: Rheological models.	91
Figure 11.7: Maxwell rheological model and response on unit load.	91
Figure 11.8: Kelvin and Voight rheological model and response on unit load.	92
Figure 11.9: Bingham rheological model and stress dependency on deformation rate.	92
Figure 11.10: Illustration of the primary, secondary and tertiary creep phases.	93
Figure 11.11: $U_v(T_v)$ diagram.	94
Figure 11.12: Isotache set of dry sand (Šuklje, 1969).	94
Figure 11.13: System of isochrones (Bjerrum, 1967).	95
Figure 11.14: Behaviour of clay during creep simple shear tests (Meschyan, 1995).	95
Figure 11.15: Examples of modelled inclinometer profiles for different material strengths, groundwater levels (GWL), and slope conditions α (van Asch et al., 2009).	96
Figure 11.16: Examples of shear creep curves (Meschyan, 2006).	97
Figure 11.17: Unsaturated soil creep test at different suctions (Wang and Yin, 2009).	98
Figure 12.1: Transition of sliding mass into viscose mud flow (Ribičič M., 2002b).	99
Figure 12.2: Geological map of Vipava River valley with landslide locations.	101
Figure 12.3: Geological longitudinal cross section of Slano blato landslide (Logar et al., 2005).	102
Figure 12.4: Simplified geological map with gravity blocks A-F, Mala Gora, Lukovec, Gola gorica, Visoko, Križec and Gradišče (Placer et al., 2008).	102
Figure 12.5: Schematic geologic section across Veliki Modrasovec and Mala Gora and detail from structural depression (Placer et al., 2008).	102
Figure 12.6: Parts of Slano blato landslide (Ribičič, 2002).	103
Figure 12.7: Inclinometer B5 result on the location of today's dowels, before it was destroyed (Fifer Bizjak and Zupančič, 2009).	105
Figure 12.8: Seismic wave velocities at longitudinal profile of Slano blato landslide (Logar et al., 2005).	105
Figure 12.9: Map of slopes (archive of Marko Kočevar).	106
Figure 12.10: Map of differences of two slopes (Kogoj et al., 2007).	106
Figure 12.11: Movements of rock on main scarp as detected by LIDAR scanning and movements observed by TV cameras 2 months later.	107
Figure 12.12: Locations of TV cameras (CAM), suction measuring station (MS) and piezometers (P).	108
Figure 12.13: Suction and temperature profiles at suction measuring station 1 and 2.	108
Figure 12.14: Suction measurements on location MS1 (upper) and MS2 (lower).	109
Figure 12.15: Locations of geodetic points and associated movements.	110
Figure 12.16: Fluctuation of water level in dowel and in soil behind dowel.	111
Figure 12.17: Change in creep rate and suction with time.	112
Figure 12.18: Pore pressure envelope and variation of factor of safety with depth.	112
Figure 13.1: Enslin-Neff apparatus.	114
Figure 13.2: Simple shear apparatus DTA-136.	115
Figure 13.3: Direct (left) and simple shear apparatus (right).	115
Figure 13.4: Suction simple shear apparatus.	116
Figure 13.5: Sieving analysis of landslide body.	117
Figure 13.6: Influence of vertical load on shrinkage limit.	119
Figure 13.7: Development of vertical deformations vs. time in oedometer.	120
Figure 13.8: Oedometer tests performed on different apparatuses.	121

Figure 13.9: Suction load step 200-300 kPa (upper) and 300-150 kPa (lower) at vertical load 100 kPa.	122
Figure 13.10: Suction measurements on soil from landslide body. TL – pressure plate, MFP-m filter paper method (matrix suction), MFP-t filter paper method (total suction), WM watermark sensor, m soil water characteristic curve – wetting, s soil water characteristic curve – drying. Also for the next figures.	123
Figure 13.11: Suction measurement with dew-point potentiometer WP4-T and filter paper method.	124
Figure 13.12: Suction measurements with different methods for range of suction 0-500 kPa.	125
Figure 13.13: Suction measurements in SESA apparatus.	125
Figure 13.14: Presentation of all measurements on the sample from year 2010.	126
Figure 13.15: Void ratio of test sample at 100 kPa vertical stress during suction loading and the approximate correction of void ratio.	127
Figure 13.16: Results of triaxial tests.	128
Figure 13.17: Results of direct shear tests.	128
Figure 13.18: Results of direct shear tests.	129
Figure 13.19: Relation between undrained shear strength and water content.	131
Figure 13.20: Relation between undrained shear strength and suction for flysch samples (Petkovšek, 2006).	131
Figure 13.21: Creep tests at different vertical loads and same shear stress ratio $\tau / \tau_{\max} = 0,56$.	133
Figure 13.22: Creep tests at same vertical loads (upper 50 kPa, lower 100 kPa) and different shear stress ratio.	134
Figure 13.23: Slope of logarithmic line for shear creep and secondary consolidation.	135
Figure 13.24: Creep tests at vertical load of 50 and 100 kPa, shear stress ratio of 0.49 and 0.61 and with or without suction.	137
Figure 13.25: Relation between slope of logarithmic line for shear creep and suction.	138
Figure 13.26: Creep tests at vertical load of 50 kPa and different load paths. The sequence of sets gives the order of shear loading.	138
Figure 13.27: Creep tests at vertical load of 100 kPa and different stress paths. The sequence of sets gives the order of shear loading.	139
Figure 13.28: Slope of logarithmic line for shear creep for different shear stress ratio with calculated suction contribution.	140
Figure 13.29: Consolidation of primary loading and all reloading load steps, if sum of time of primary loading and reloading was used.	141
Figure 13.30: Slope of logarithmic line for secondary consolidation in case when loading time and sum of loading time was used.	141
Figure 13.31: Primary loading and reloading for sample at shear stress ratio 0,61 and suction 50 kPa.	142
Figure 13.32: Primary loading and reloading for sample at shear stress ratio 0,95 and suction 0 kPa.	142
Figure 14.1: Yield surface for original and modified Cam clay model. The corrected flow rule is shown by arrow.	145
Figure 14.2: Odometer measurements and model prediction.	146
Figure 14.2: Odometer measurements and model prediction.	147
Figure 14.3: Results from triaxial cell for CIU test. From the top to bottom are test samples: 2002 0.08 mm $w = w_L$ at 100, 200 in 300 kPa.	148

Figure 14.4: Results from triaxial cell for CIU test. From the top to bottom are test samples: 2002 0.08 mm $w = w_p$ at 100, 200 in 300 kPa.	149
Figure 14.5: Results from simple shear tests. From the top to bottom are test samples with vertical stress 50, 150 in 200 kPa.	150
Figure 14.6: Suction, volumetric and gravimetric water content and saturation measurements for unloaded sample.	152
Figure 14.7: Measured data and different functions for description of the soil water characteristic curve.	153
Figure 14.8: Correlation between effective stress parameter χ and saturation.	154
Figure 14.9: Suction stress correlation with saturation.	154
Figure 14.10: Shrinkage of the sample during drying and shrinkage prediction by different models.	155
Figure 14.11: Shrinkage of the sample during drying in oedometer and shrinkage prediction by different models.	156
Figure 14.12: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 50 kPa vertical load.	158
Figure 14.13: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 100 kPa vertical load.	159
Figure 14.14: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 200 kPa vertical load.	160
Figure 14.15: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 400 kPa vertical load.	161
Figure 14.16: Void ratio at different vertical loads and constant suction.	162
Figure 14.17: Measurement of suction at negligible total stresses and model prediction.	163
Figure 14.18: Measurements in HYPROP device and model prediction for test specimen at maximum water content (top) and at liquid limit (bottom).	163
Figure 14.19: Model virgin soil water characteristic curve.	164
Figure 14.20: Results from simple shear tests. From the top to bottom are test samples with vertical stress 100 kPa and suction 20, 50 and 100 kPa.	165
Figure 14.21: Comparison between the measured maximum horizontal shear stress and the model prediction.	166
Figure 14.22: Measured undrained shear stress and model prediction.	167
Figure 14.23: Measured undrained shear stress and model predictions.	167
Figure 14.24: Slope of logarithmic line for shear creep for different shear stress ratios with suction contribution for upper and lower boundary curve.	169
Figure 14.25: The Crank–Nicolson stencil for a 1D problem.	173
Figure 14.26: Excess pore pressures calculated during load stage for the case with steps of 1 to 60 s (top) and step 1 s with (bottom).	177
Figure 14.27: The development of void ratio with time for loading stages in oedometer for test sample 2010 70 mm vz1.	178
Figure 14.28: The development of volume and axial deformations with time for suction loading stages in SESA apparatus for sample at 100 kPa vertical load. The chart on top presents measured data and the chart below the numerical prediction.	179
Figure 14.29: Comparison between measurements and numerical model results for the case of sample HYPROP1.	180
Figure 14.30: Comparison between measurements and numerical model results for the case of sample HYPROP2.	181

Figure 14.31: Influence of evaporation in numerical model on suction in landslide body.	183
Figure 14.32: Influence of water permeability in numerical model on suction in landslide body.	184
Figure 14.33: Influence of water permeability in numerical model on suction in landslide body.	185
Figure 14.34: Soil suction variation in landslide body between 1.11.2007 – 1.5.2012 (measured data on the top and model prediction below).	186
Figure 14.35: Soil suction variation in landslide body between 1.11.2007 – 1.5.2012 with impermeable lower boundary.	187
Figure 14.36: Suction envelope in landslide body and requirement for creep conditions.	188
Figure 14.37: Displacements in landslide body during 1.11.2007-1.1.2012 without contribution of suction. Upper diagram – upper creep limit, lower diagram – lower creep limit.	189
Figure 14.38: Displacements in landslide body during 1.11.2007-1.1.2012 with contribution of suction. Upper diagram – upper creep limit, lower diagram – lower creep limit.	190

LIST OF TABLES

Table 2.1: Relative densities of different minerals (Lambe and Whitman, 1979; cited after: Fredlund and Rahardjo, 1993).	6
Table 2.2: Soil classification based on grain sizes (SIST EN ISO 14688).	7
Table 2.3: Specific surface areas of different clays (Santamarina et al., 2002).	7
Table 2.4: Relative strength of intermolecular forces.	7
Table 2.5: Influence of temperature on water viscosity η and surface tension T_s (Marshall and Holmes, 1988).	7
Table 2.6: Henry's constant for different gasses in water solutions at 298 K.	9
Table 3.1: Permanent electrical charge of the clay surface (Krauskopf and Bird, 1995).	20
Table 9.1: Overview of measuring methods.	71
Table 11.1: Factor of safety for different slope angles β and ratio between pore water pressure and depth of shear surface (u_w/h (m/m)) for $\phi'=27^\circ$ and $c'=0$.	87
Table 11.2: Basic rheological models	90
Table 13.1: Overview of used standards.	113
Table 13.2: Index properties of landslide body.	118
Table 13.3: Chemical composition of spring water (Petkovšek, 2006).	118
Table 13.4: Soil compressibility parameters.	121
Table 13.5: Initial and final state of the test samples in suction simple shear apparatus.	126
Table 13.6: Shear strength parameters of different samples and/or by different test methods.	129
Table 13.7: The slope of logarithmic line for the creep tests.	135
Table 14.1: Parameters of modified Cam clay model.	143
Table 14.2: Suction, volumetric and gravimetric water content and saturation measurements for sample 2010.	152
Table 14.3: Parameters of Brooks and Corey (1964) function.	152
Table 14.4: Factor of safety and model prediction of shear deformations.	168
Table 14.5: Parameters of modified Cam Clay model, Brooks and Corey soil water characteristic curve and function for saturated permeability for tested samples on fines and for the whole soil.	182

KAZALO POMEMBNEJŠIH SIMBOLOV

simbol	enota	opis
a_f	1/kPa	oblikovni parameter Fredlund in Xingove (1994) funkcije
a_{VG}	1/kPa	oblikovni parameter van Genuchtenove (1980) funkcije
b_{BC}		oblikovni parameter parametra popravka efektivne napetosti
b_M		naklon logaritemske premice strižnega lezenja
c	mol/L	koncentracija
c'	kPa	kohezija (izražena na efektivno napetostno stanje)
c_u	kPa	nedrenirana strižna trdnost
e		količnik por
e_w		količnik z vodo zasičenih por
g	m/s ²	težnostni pospešek
h_c	m	matrični potencial
i		hidravlični gradient
k_s	m/s	vodoprepustnost zasičene zemljine
k_w	m/s	vodoprepustnost nazasičene zemljine
m	kg	masa zemljine
m		oblikovni parameter prirasta strižnega modula
m_a	kg	masa zraka
m_f		oblikovni parameter Fredlund in Xingove (1994) funkcije
m_{VG}		oblikovni parameter van Genuchtenove (1980) funkcije
m_s	kg	masa suhe zemljine
m_w	kg	masa vode
n		poroznost zemljine
n_f		oblikovni parameter Fredlund in Xingove (1994) funkcije
n_{VG}		oblikovni parameter van Genuchtenove (1980) funkcije

simbol	enota	opis
p	kPa	totalna sferna napetost
p'	kPa	efektivna sferna napetost
p_0'	kPa	prekonsolidacijski tlak
p_a	kPa	absolutni zračni tlak
p_v	kPa	delni tlak vodne pare
p_{v0}	kPa	zasičen parni tlak
q	kPa	deviator napetosti
q_v	m/s	tok vodne pare
q_w	m/s	tok vode
r	m	radij ukrivljenosti
r_k	m	radij kapilare
s	kPa	matrična sukcija
u_a	kPa	tlak zraka
u_w	kPa	tlak vode
$(u_a - u_w)$	kPa	matrična sukcija
v		specifični volumen
v_w		specifični volumen z vodo zapolnjenih por
w	%	gravimetrična vlaga zemljine
w_s	%	gravimetrična vlaga zemljine pri popolni zasičenosti
w_L	%	meja židkosti
w_P	%	meja plastičnosti
w_S	%	meja krčenja
C_α		koeficient sekundarne konsolidacije
D	m^2/s	difuzijska konstanta
D_a	m^2/s	difuzijska konstanta toka zraka skozi zemljino

simbol	enota	opis
D_v	m^2/s	difuzijska konstanta toka vodne pare skozi zemljino
E	mm/dan	evaporacija
E_{oed}	kPa	edometrski modul
ET_0	mm/dan	referenčna evapotranspiracija
FS		faktor varnosti
G	kPa	(razbremenilni) strižni modul
G_{ref}	kPa	referenčni strižni modul pri sferični napetosti P'_{ref}
G_s		relativna gostota zrn
H	m	hidravlični potencial
K_0		koeficient mirnega zemeljskega pritiska
K_c		koeficient rastline in stanja tal, ki vpliva na evapotranspiracijo
K_r		relativna vodoprepustnost (razmerje med vodoprepustnostjo nesaturirane zemljine in saturirane zemljine)
M_a	g/mol	molska masa zraka (29 g/mol)
M_w	g/mol	molska masa vode (18 g/mol)
P	m	tlačni potencial
R	J/mol/K	plinska konstanta (8,31 J/mol/K)
RH	%	relativna vlaga zraka
Se		efektivna saturacija
S_r	%	stopnja zasičenosti
S_{r_r}	%	stopnja zasičenosti pri rezidualni vlagi
S_{r_s}	%	stopnja zasičenosti zasičene zemljine (običajno 1)
T	K (°C)	temperatura zraka
T_s	N/m	površinska napetost
V	m^3	volumen zemljine
V_a	m^3	volumen zraka

simbol	enota	opis
V_s	m^3	volumen zrn zemljine
V_v	m^3	volumen por
V_w	m^3	volumen vode
Z	m	gravitacijski potencial
α	$^\circ$	omočitveni kot
α		oblikovni parameter, ki popravlja obliko deformacij (tečenja)
α_{BC}		oblikovni parameter Brooksove in Coreyeve funkcije (1964); točka vstopa zraka
ε_d^p		plastične strižne deformacije
ε_v^p		plastične volumenske deformacije
ε_d^e		elastične strižne deformacije
ε_v^e		elastične volumenske deformacije
γ		inženirske strižne deformacije
η	Pa s	viskoznost
η		$\eta = q / p'$
θ		volumetrična vlaga
θ_a		volumetrični delež zraka v zemljini
θ_r		volumetrična vlaga pri rezidualni vlagi
θ_s		volumetrična vlaga saturirane zemljine
θ_v		volumetrični delež vodnih hlapov v zemljini
κ		naklon logaritemske premice razbremenitve in ponovne obremenitve
λ		naklon logaritemske premice deviške kompresijske krivulje
λ_{BC}		oblikovni parameter Brooksove in Coreyeve funkcije (1964)
μ	J/kg	kemični potencial
π	kPa	osmotska sukucija
ρ	t/m ³	gostota zemljine

simbol	enota	opis
ρ_a	t/m ³	gostota zraka
ρ_d	t/m ³	suha gostota zemljine
ρ_s	t/m ³	gostota zrn
ρ_w	t/m ³	gostota vode pri 4°C
σ_n'	kPa	efektivna napetost normalna na ploskev porušitve
σ_h	kPa	totalna horizontalna napetost
σ_t	kPa	natezna trdnost
σ_v	kPa	totalna vertikalna napetost
τ		vijugavost
τ	kPa	strižna napetost na porušni ploskvi
τ_{\max}	kPa	maksimalna strižna napetost na porušni ploskvi
τ / τ_{\max}		razmerje med strižno obremenitvijo in maksimalna strižna napetost na porušni ploskvi
φ'	°	strižni kot (izražen na efektivno napetostno stanje)
χ		koeficient efektivne napetosti povezan s saturacijo zemljine; Bishopov popravek efektivne napetosti
ψ	kPa	totalna sukcija
ψ_R	kPa	rezidualna sukcija
Γ		specifični volumen zemljine na črti kritičnega stanja pri $p' = 1$ kPa
Θ		normalizirana volumetrična vlaga
Π	m	osmotski potencial
Φ	m	celotni potencial
Ψ	m	vodni potencial
Ψ_m	m	matrični potencial

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

V slovenskem prostoru je ob naravnih katastrofah, povezanih s plazovi in vodo, v zadnjih dvajsetih letih nastala ogromna gospodarska škoda. Življenje je izgubilo osem oseb, od tega sedem v Logu pod Mangartom in ena v Podvolovljeku. V večini primerov so se plazovi ponovno aktivirali na območjih, ki jih kot nestabilna omenjajo že dvesto in več let stari zapisi ali nanje opozarjajo lokalna imena. Čeprav je stiska ljudi ob naravnih dogodkih velika, pa je človeški spomin nanje zelo kratek. Veliko je primerov, ko je »moderen« človek posegel na območja, kjer imajo naravno pogojeni dejavniki tveganja, kot so hudourniške vode, plazovi in blatni tokovi absolutno premoč in na katera naši predniki niso posegali.

Vas Lokavec v Vipavski dolini je značilen primer, ko je človek nepremišljeno posegel v vplivno območje plazu. Rušilna moč plazu Slano blato je bila v strokovni publikaciji opisana že pred več kot 200 leti, ljudsko izročilo in lokalna cerkva sv. Urbana (zavetnika pred neurji), zgrajena na vzhodnem robu plazu pa pričata, da so bili plazovi na tem območju stalnica že veliko pred prvimi zapisi.

Plaz Slano blato (slika 1.1) je eden največjih aktivnih zemeljskih plazov v Sloveniji. Trenutni plaz se je sprožil novembra 2000 ob neobičajno veliki količini padavin, ko so se v Sloveniji sprožili tudi drugi veliki plazovi: Stože, Macesnik in Koseč.



Slika 1.1: Pogled na plaz Slano blato

Figure 1.1: Landslide Slano blato

Značilnost plazu Slano blato je, da so pobočna premikanja posledica različnih procesov, ki se odvijajo na naravnem kontaktu prepustnih mezozojskih karbonatnih kamnin na eocenski, malo prepusten fliš. Pred sanacijo plazu v letu 2004 so se pomiki plazu Slano blato delili na splazitve strmih odlomnih robov, plazenje osrednjega dela ter blatne in drobirske tokove v deževnih obdobjih (Kočevar in Ribičič, 2002). V suhih obdobjih plaz Slano blato navidezno miruje. Na površini se pojavi suha skorja,

ki nakazuje na razvoj sukucije v plazini, mirovanje plazu v času suše pa na njene ugodne stabilizacijske lastnosti.

Zaradi hitrega širjenja plazu so bili med leti 2004 in 2007 na zgornjem delu plazu zgrajeni vodnjaki - mozniki, ki delujejo kot razbremenilniki visokih tlakov podzemne vode in hkrati podpirajo in preprečujejo nadaljnje premike zemeljskih mas nad vodnjaki v osrednji del plazu. Kljub temu je lasersko skeniranje plazu leta 2007 pokazalo na znatne premike plazu (Kogoj et al., 2007).

Leta 2006 so enostavne laboratorijske raziskave pokazale, da sukucija ugodno vpliva na trdnostne karakteristike plazine (Petkovšek, 2006). V letih 2007 in 2008 so bili na plazu trije merski profili opremljeni z merilniki sukucije do globine 3 m pod površino plazu. Kontinuirano merjenje sukucije ter redna geološka opazovanja površine so pokazala, da obdobja hitrejših premikov mas za vodnjaki sovpadajo z obdobji nizke sukucije v opazovanih profilih sukucije (arhiv Marko Kočevčarja).

Na velikih plazovih, ki se gibljejo kot počasni viskozni tokovi ali počasi lezejo, je smiselno raziskati in ovrednotiti dejavnike, ki vplivajo na hitrost in spremembe hitrosti lezenja. Kot smo že enkrat poudarili, je Slano blato velik in kompleksen plaz in ga ni možno opisati samo z enim ali dvema mehanizmoma premikanja zemeljskih mas.

V tej nalogi se bomo osredotočili na raziskavo dejavnikov, ki vplivajo na lezenje plazine na plazu Slano blato in razvoj modela za opis lezenja.

1.2 Zemljinska sukucija

Padavine napajajo vodonosnike, dvigujejo nivo podzemne vode ter zmanjšujejo sukucijo zemljine v vadozni coni. Napajanje ni nujno vezano samo na padavine. Lahko je tudi posledica podzemnih dotokov, ki imajo napajalno zaledje v veliki oddaljenosti. Gravitacija, daljša sončna obdobja in rastline pa poskrbijo za evapotranspiracijo vode iz vadozne cone. Voda tako kroži v odvisnosti od vremenskih vplivov, rastlin, gravitacije in geološke zgradbe.

Različne zemljine se različno odzivajo na vremenske vplive. Peski se na primer hitro sušijo ob zanemarljivih volumenskih spremembah. Gline pa nasprotno, med sušenjem ostajajo večji del popolnoma zasičene in se močno volumensko krčijo. Med sušenjem tudi pokajo, razpoke pa predstavljajo prioritete poti za tok vode ob ponovnih padavinah.

Retencijska krivulja je temeljna zveza, ki opisuje razmerja med negativnim tlakom porne vode (sukucijo) in stopnjo zasičenja, gravimetrično vlago ali volumetrično vlago. Retencijska krivulja ni konstanta za določeno zemljino. Potek krivulje je odvisen od zgoščenosti, od preteklih in sedanjih napetostnih stanj in od tega, ali se zemljina suši ali vlaži.

Sukucija pomembno vpliva na volumske deformacije in na strižno trdnost zemljine. V zemljinah s sukucijo lahko pride ob vlaženju do povečanja volumna, do kolapsa, lahko pa se nič ne zgodi. Sukucija prispeva k strižni trdnosti zemljine. Strižno trdnost v odvisnosti od sukucije lahko zapišemo na tri različne načine, ki bodo opisani v kasnejših poglavjih. V tej nalogi bomo uporabili Bishopov popravek efektivne napetosti (1959).

V Sloveniji smo meritve sukcije pričeli uvajati v geotehniko šele v letu 2004 (Petkovšek, 2006). Vpeljali smo različne metode merjenja sukcije v laboratoriju in na terenu ter spoznali karakteristične retencijske krivulje slovenskih zemljin. Na vplive sukcije na trdnost in deformabilnost smo sklepali posredno, preko retencijske krivulje. Direktna merjenja trdnosti ali deformabilnosti zemljin v pogojih znane sukcije niso bila možna, saj za to ni bilo primerne opreme. Zato smo za potrebe te naloge preuredili obstoječo laboratorijsko opremo tako, da omogoča merjenje volumenskih deformacij in strižne trdnosti v kontroliranih pogojih sukcije.

1.3 Cilji naloge

Glede na opisana izhodišča, so cilji naše naloge naslednji:

- s terenskimi meritvami poiskati zvezo med sukcijo zemljine in pomiki na površini plazju Slano blato,
- z laboratorijskimi in terenskimi raziskavami ter izdelavo računskega modela ugotoviti, kakšen vpliv ima sukcija na hitrost lezenja plazine.

Da bi dosegli zastavljene cilje naloge moramo, v laboratoriju:

- določiti retencijsko krivuljo plazine,
- ugotoviti vpliv sukcije na volumenske spremembe plazine,
- ugotoviti vpliv sukcije na strižno trdnost plazine,
- ugotoviti vpliv sukcije na hitrost lezenja plazine,
- izmeriti vodoprepustnost plazine.

Če želimo opraviti opisane meritve, moramo kupiti ali modificirati obstoječo laboratorijsko opremo tako, da bomo lahko merili vpliv sukcije na hitrost lezenja in vpliv sukcije na volumenske spremembe.

Na terenu pa moramo opraviti naslednja dela:

- spremljati in analizirati vremenske pogoje na plazju
- meriti in analizirati rezultate kontinuiranih meritev sukcije v že vgrajenih merilcih
- na površini plazju vgraditi geodetske točke in opraviti GPS meritve v določenih časovnih zaporedjih.

Z izdelavo numeričnega modela bomo nato poskušali opisati rezultate laboratorijskih in terenskih meritev in na njihovi osnovi ugotoviti, kako sukcija vpliva na lezenje plazju.

1.4 Vsebina in struktura naloge

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

- V **poglavjih od 2 do 9** so podana teoretska ozadja in osnove razumevanja strukture zemljine in interakcije zemljina – voda. Opisani so različni modeli za opisovanje retencijske krivulje ter vplivi sukcije na trdnost zemljine. Podan je obsežen pregled literature.
- V **poglavju 10** obravnavamo teoretske osnove gibanja vode v zemljini ter robne pogoje.
- V **poglavju 11** so obravnavani pobočni premiki.
- V **poglavju 12 in 13 je** in podan kratek pregled zgodovine in razmer na plazju Slano blato, predstavljeni so rezultati laboratorijskih in terenskih preiskav vključno z novo napravo SESA, ki smo jo izdelali s preureditvijo enostavnega strižnega aparata.

- V **poglavju 14** so izvednoteni rezultati terenskih in laboratorijskih preiskav, predstavljen je numerični model in izdelana analiza toka vode ter pomikov plazu zaradi lezenja. Rezultati računskega modela so primerjani s terenskimi in laboratorijskimi meritvami.
- V **poglavju 15** so podani zaključki in predlogi za nadaljnje delo.

2 TEORETSKO OZADJE

Zemljino v geotehniki obravnavamo kot homogen zasičen ali nezasičen material (makro nivo). Dejansko pa zemljina ni homogena, temveč je sestavljena iz treh faz: trdnih zrn, vode in zraka (mikro nivo). Voda in zrak se nahajata v porah (prazninah) med zrn, ki sestavljajo matrico zemljine. V prvem delu poglavja predstavljamo posamezne faze in njihove lastnosti, v drugem delu predstavljamo zveze med posameznimi fazami, v tretjem delu pa uporabljene oznake za napetosti in deformacije.

2.1 Posamezne faze zemljine in njihove značilnosti

2.1.1 Trdni delci

Trdni delci predstavljajo ogrodje oziroma matrico zemljine. Običajno privzamemo, da so zrna inertna, toga ter da se med obremenjevanjem ne drobijo. Količina trdnih delcev na volumensko enoto zemljine je definirana s suho gostoto, volumen trdnine pa z gostoto zrn.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{\rho}{1+w} \quad (2.2)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.3)$$

Kjer je ρ gostota zemljine, ρ_d suha gostota zemljine, ρ_s gostota zrn, m masa zemljine, m_s masa suhe zemljine, V volumen zemljine, V_s volumen zrn zemljine, w gravimetrična vlaga zemljine.

Pogosto se gostota zrn izraža kot relativna gostota zrn, G_s . Relativna gostota je brezdimenzijska količina, ki jo dobimo, če gostoto zrn delimo z gostoto vode pri 4 °C.

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2.4)$$

Kjer je ρ_w gostota vode pri 4°C (1,00 t/m³).

Zrna opišemo še glede na mineralno sestavo ali izvor (npr. organska zrna, karbonatna zrna) ter velikost delcev. V preglednici 2.1 so podajane relativne gostote najbolj pogostih mineralov, ki se nahajajo v zemljinah. Pomembna je tudi velikost zrn in zastopanost posameznih frakcij, saj le ti vplivajo na obnašanje zemljine. Drobnozrnate zemljine (melj, glina) so slabo prepustne in imajo manjši strižni kot od debelo-zrnatih zemljin (pesek in gramoz), vendar ima lahko gramoz z znatnim deležem glinene frakcije tudi nizko vodoprepustnost. V preglednici 2.2 navajamo poimenovanja posameznih frakcij v skladu s SIST EN ISO 14688. Kadar med drobnimi zrn prevladujejo minerali glin, je obnašanje zemljine ob stiku z vodo odvisno od specifične površine zrn (preglednica 2.3).

2.1.2 Voda

Voda (H₂O) je polarna molekula (slika 2.1 a). Polarnost molekule je posledica nesimetričnosti razporeditve vodikovih atomov (H) in prostih elektronskih parov okoli kisikovega atoma (O).

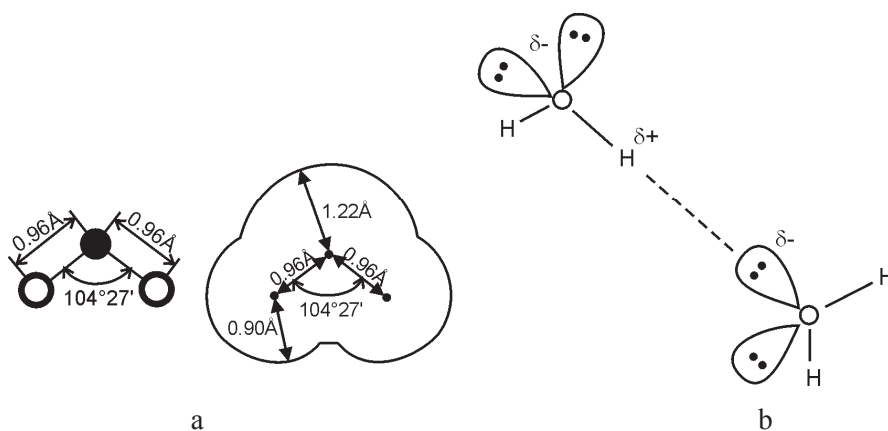
Molekula vode namreč tvori nekakšen nepravilni tetraeder, ki ga sestavlja kisikov atom v središču ter prosta elektronska para kisikovega atoma in vodikova atoma v ogljičih. Kot med vodikovima atomoma je $104,5^\circ$ in ne 180° . Višek elektronov pri kisiku povzroči negativno nabitost, na drugi strani pa je primanjkljaj elektronov pri vodiku in posledično pozitivna nabitost. Zaradi tega se vodne molekule orientirajo, privlačijo glede na električno polje ter med seboj tvorijo medmolekulske vezi. Voda je sposobna tvoriti tudi vodikove vezi (slika 2.1 b). Vodikova vez je vez med vodikom, ki je vezan na majhen atom fluora (F), dušika (N) ali kisika in prostim elektronskim parom na dušiku, fluoru ali kisiku. Ta vez je najmočnejša med medmolekulskimi vezmi (preglednica 2.4) in ima za posledico unikatno obnašanje vode (skupke vodnih molekul v vodi ali pari, manjšo gostoto ledu, ...).

Pri vodi je pomembna tudi dinamična viskoznost, saj je viskoznost odvisna od temperature vode. Tega se moramo zavedati, saj v laboratorijih pogosto opravljamo preskuse pri višjih temperaturah kot so v tleh. Merjene količine je potrebno popraviti za vpliv viskoznosti. Vpliv temperature na viskoznost podajamo v preglednici 2.5. Na viskoznost vode dodatno vpliva tudi količina raztopljenih soli, vendar ta vpliv običajno zanemarimo (Fredlund in Rahardjo, 1993).

Preglednica 2.1: Relativne gostote zrn različnih mineralov (Lambe in Whitman, 1979; citat po: Fredlund in Rahardjo, 1993).

Table 2.1: Relative densities of different minerals (Lambe and Whitman, 1979; cited after: Fredlund and Rahardjo, 1993).

mineral	G_s
kremen	2,65
kalcit	2,72
dolomit	2,85
klorit	2,6-2,9
illit	2,6-2,86
kaolinit	2,62-2,66
montmorillonit	2,75-2,78
voda	1,0



Slika 2.1: Vodna molekula levo (Lazarini in Brenčič, 1989) in vodikova vez desno (Marshall in Holmes, 1988).

Figure 2.1: Water molecule (left) (Lazarini and Brenčič, 1989) and hydrogen bond (right) (Marshall and Holmes, 1988)

Preglednica 2.2: Klasifikacija zemljin glede na velikost zrn - poimenovanje frakcij (SIST EN ISO 14688).

Table 2.2: Soil classification based on grain sizes (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
Droben pesek	0,06 – 0,2
Debel melj	0,02 – 0,06
Droben melj	0,002 – 0,02
Glina	< 0,002

Preglednica 2.3: Specifične površine glinenih mineralov (Santamarina et al., 2002).

Table 2.3: Specific surface areas of different clays (Santamarina et al., 2002).

mineral	specifična površina (m ² /g)
kaolinit	10-20
illit	80-100
montmorillonit	400-800

Preglednica 2.4: Jakost medmolekulskih vezi (http://en.wikipedia.org/wiki/Intermolecular_force (10.1.2012)).

Table 2.4: Relative strength of intermolecular forces.

Vez	Relativna jakost vezi (kJ)
kovalentna vez	400
vodikova vez	12-16
polarna vez	0,5-2
van der Waalsove medmolekulske vezi	<1

Preglednica 2.5: Vpliv temperature na viskoznost vode η in površinsko napetost T_s (Marshall and Holmes, 1988).

Table 2.5: Influence of temperature on water viscosity η and surface tension T_s (Marshall and Holmes, 1988).

T (°C)	η (mPa s)	T_s (mN·m ⁻¹)
0	1,787	75,7
5	1,519	
10	1,307	74,2
20	1,002	72,3
30	0,798	71,2

Pod pojmom voda v geotehniki razumemo vodo v kateri so raztopljeni plini in soli in posebej poudarimo, če vodo dodatno očistimo. Postopki čiščenja vode v geotehničnih laboratorijih so

deionizacija ali destilacija, ki očisti vodo raztopljenih soli in deaeracija, ki iz vode izloči raztopljene pline.

Vodo v geotehniki obravnavamo kot nestisljivo tekočino z gostoto $1,00 \text{ t/m}^3$. Vpliv temperature in tlaka na gostoto vode je v geotehničnih izračunih manjši od ostalih nezanesljivosti, zato pogosto predpostavimo, da je voda nestisljiva. Porna voda pomembno vpliva na obnašanje zemljine, saj spreminja efektivne napetosti v zemljini. V primeru zasičene zemljine in pozitivnega tlaka vode, voda deluje vzgonsko in zmanjšuje sile med zrnji. V primeru nezasičene zemljine in negativnega tlaka vode, voda preko vodnih meniskusov med zrnji povečuje sile med zrnji oziroma zvišuje efektivne napetosti.

2.1.3 Zrak

Zrak je mešanica plinov s približno sestavo 78% dušika, 21% kisika, 1-4% vode in 1% drugih plinov. V skladu z Daltonovim zakonom je zračni tlak enak vsoti parcialnih tlakov plinskih komponent v zraku.

$$p_a = \sum_i p_i \quad (2.5)$$

Kjer je p_a absolutni zračni tlak, p_i delni zračni tlak posameznega plina.

Daltonov zakon nam omogoča, da lahko mešanico idealnih plinov nadomestimo z enofaznim plinom z nadomestno molsko maso ($M_a = 29 \text{ g/mol}$). Zrak prav tako lahko opišemo kot idealni plin, ki se obnaša skladno s splošno plinsko enačbo (enačba Clapeyron-Mendelejeva).

$$p_a V_a = \frac{m_a}{M_a} RT \quad (2.6)$$

Kjer je V_a volumen zraka, m_a masa zraka, R plinska konstanta ($8,31 \text{ J/mol/K}$), T absolutna temperatura zraka (K).

Iz enačbe (2.6) lahko zapišemo enačbo za gostoto zraka ρ_a :

$$\rho_a = \frac{p_a M_a}{RT} \quad (2.7)$$

V sestavi zraka najbolj variira delni tlak vodne pare. Delni tlak vodne pare narašča in se ustali pri določenem delnem tlaku, ki ga imenujemo zasičeni delni tlak vodne pare. Pri tem tlaku je število molekul vode, ki se vrača v tekočino, enako številu molekul, ki se odtrgajo iz gladine vode. Če je delni tlak vodne pare nižji od zasičenega, voda hlapi. V kolikor pa bi bil delni tlak vodne pare višji od zasičenega, pa pride do pojava kondenzacije. Iz zraka se izloči toliko vode, da je delni tlak vodne pare enak zasičenemu. Če zračni tlak znižamo do zasičenega tlaka vodne pare, voda zavre. Zasičen parni tlak lahko izračunamo po Clausius-Clapeyronovi enačbi:

$$p_{v,0} = p_{v,0,ref} e^{\bar{q}_i \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2.8)$$

Kjer je $p_{v,0}$ zasičen parni tlak pri temperaturi T , $p_{v,0,ref}$ referenčni tlak pri temperaturi T_{ref} ($101,3 \text{ kPa}$), \bar{q}_i povprečna specifična izparilna toplota ($40,6 \text{ kJ/mol}$), T_{ref} referenčna temperatura (373 K).

Količino vodne pare v zraku najbolj pogosto izrazimo kot relativno vlago zraka RH .

$$RH = \frac{p_v}{p_{v0}} 100\% \quad (2.9)$$

Kjer je p_v delni tlak vodne pare v zraku.

Prav tako, kakor voda izhlapeva ob stiku s suhim zrakom, se tudi zrak topi v vodi. Slednje opiše Henryjev zakon. Henryjev zakon velja le za razredčene raztopine plinov, ne velja pa za pline, ki tvorijo kemične reakcije s topilom (npr. CO₂ v H₂O)

$$p_i = k_H c \quad (2.10)$$

Kjer je p_i delni zračni tlak posameznega plina, k_H Henryjeva konstanta za posamezen plin pri dani temperaturi (preglednica 2.6), c koncentracija (mol/L).

Preglednica 2.6: Henryjeve konstante za vodne raztopine plinov pri temperaturi 298 K.

Table 2.6: Henry's constant for different gasses in water solutions at 298 K.

plin	k_H (L atm/mol)
O ₂	769,2
N ₂	1639,34
CO ₂	29,1

Z zrakom so v zemljini zapolnjene vse pore, ki niso zapolnjene z vodo. Glede na majhno gostoto zraka, maso zraka v geotehniki zanemarimo. Prav tako pogosto zanemarimo tudi viskoznost zraka, saj je približno 100 krat manjša od viskoznosti vode.

2.2 Fazna razmerja v zemljini

Zemljino v geotehniki obravnavamo kot homogeno snov (makro nivo), delež posamezne frakcije pa opredelimo z medsebojnimi razmerji (brezdimenzijskimi količinami). Razmerja med posameznimi fazami v geotehniki lahko opišemo z različnimi pojmi. Katere od količin se uporabijo v praksi je odvisno od lokalnih praks, specifičnosti problema, numeričnih nastavkov v programih, itd.

Gravimetrična vlaga w

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.11)$$

Kjer je m_w masa vode, m_s masa suhe zemljine.

Volumetrična vlaga θ

Volumetrična vlaga θ je definirana kot volumensko razmerje med volumnom vode in volumnom zemljine. Uporablja se predvsem v agronomiji.

$$\theta = \frac{V_w}{V} = Sr n \quad (2.12)$$

Kjer je V volumen zemljine, V_w volumen vode, Sr stopnja zasičenosti zemljine, n poroznost zemljine.

Normalizirana volumetrična vlaga Θ

Normalizirano volumetrično vlago je definirala van Genuchten (1980). Normalizirana volumetrična vlaga je delež vode, ki ga je možno zemljini še odvzeti glede na zasičeno zemljino.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.13)$$

Kjer je θ volumetrična vlaga, θ_r volumetrična vlaga pri rezidualni vlagi, θ_s volumetrična vlaga zasičene zemljine.

Stopnja zasičenosti Sr

Stopnja zasičenosti Sr pove kolikšen delež por je zapolnjen z vodo. 100% zasičena zemljina je sestavljena samo iz trdnine in vode, 0% zasičena pa smo iz trdnine in zraka.

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.14)$$

Kjer je V_v volumen por, V_w volumen vode.

Efektivna stopnja zasičenosti Se

Efektivno stopnjo zasičenosti sta definirala Brooks in Corey (1964). Pove nam koliko še lahko osušimo zemljino glede na popolnoma zasičeno zemljino.

$$Se = \frac{Sr - Sr_r}{Sr_s - Sr_r} \quad (2.15)$$

Kjer je Sr stopnja zasičenosti, Sr_r stopnja zasičenosti pri rezidualni vlagi, Sr_s stopnja zasičenosti popolnoma zasičenega vzorca (običajno 1).

Poroznost n

Poroznost ali delež por je definirana kot volumen por na volumen zemljine, vendar se v geotehniko pogosteje uporablja količnik por.

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e} \quad (2.16)$$

Kjer je V volumen zemljine, V_v volumen por, e količnik por.

Količnik por e

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.17)$$

Kjer je V_v volumen por, V_s volumen zrn zemljine, ρ_s gostota zrn zemljine, ρ_d suha gostota zemljine.

Količnik z vodo zasičenih por e_w

$$e_w = \frac{V_w}{V_s} = Sr \cdot e \quad (2.18)$$

Kjer je V_w volumen vode, V_s volumen zrn zemljine, e količnik por, Sr stopnja zasičenosti.

Specifični volumen v

$$v = 1 + e = 1 + \frac{wG_s}{Sr} \quad (2.19)$$

Kjer je e količnik por, w gravimetrična vlaga, G_s relativna gostota zrn, Sr stopnja zasičenosti.

Specifični volumen z vodo zapolnjenih por v_w

$$v_w = 1 + e_w = 1 + wG_s \quad (2.20)$$

Kjer je e_w količnik z vodo zasičenih por, w gravimetrična vlaga, G_s relativna gostota zrn.

2.3 Napetosti in deformacije

V tem poglavju so predstavljene definicije napetosti in deformacij, ki jih bom uporabil v nalogi.

2.3.1 Napetosti

V mehaniki definiramo napetostni tenzor $[\sigma]$. Slika 2.2 prikazuje smeri delovanja posamezne komponente. Tlak označujemo s pozitivnimi komponentami normalnih napetosti.

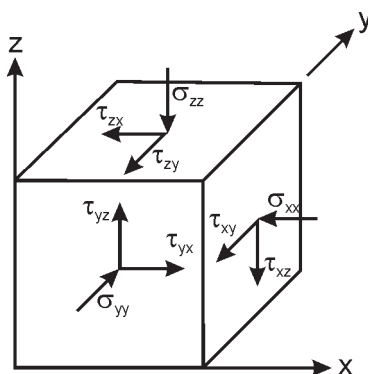
$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Prvi indeks (i) pove smer »vlakna« materiala, drugi (j) pa smer delovanja napetosti (slika 2.2). Pogosto strižne komponente napetosti ($i \neq j$) označimo z grško črko τ .

Zaradi tlaka porne vode v zasičeni zemljini definiramo efektivne napetosti $[\sigma']$:

$$[\sigma'] = \begin{bmatrix} \sigma'_{xx} & \sigma'_{yx} & \sigma'_{zx} \\ \sigma'_{xy} & \sigma'_{yy} & \sigma'_{zy} \\ \sigma'_{xz} & \sigma'_{yz} & \sigma'_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_w & & \\ & u_w & \\ & & u_w \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Kjer je u_w tlak vode.



Slika 2.2: Smer delovanja posameznih komponent napetostnega tenzorja .
 Figure 2.2: Stress tensor and suffix notation.

Prav tako lahko definiramo vektor prirastka efektivne napetosti $[d\sigma']$.

$$[d\sigma'] = \begin{bmatrix} d\sigma'_{xx} & d\sigma'_{yx} & d\sigma'_{zx} \\ d\sigma'_{xy} & d\sigma'_{yy} & d\sigma'_{zy} \\ d\sigma'_{xz} & d\sigma'_{yz} & d\sigma'_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

V mehaniki tal pogosto pretvorimo problem v prostor glavnih napetosti. V prostoru glavnih napetosti ima napetostni tenzor samo normalne napetosti in je brez strižnih napetosti.

$$[\sigma_1'] = \begin{bmatrix} \sigma'_1 & & \\ & \sigma'_2 & \\ & & \sigma'_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Prav tako razdelimo napetosti na sferne in deviatorične:

$$\begin{bmatrix} \sigma'_1 & & \\ & \sigma'_2 & \\ & & \sigma'_3 \end{bmatrix} = p' \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + t_3 \begin{bmatrix} 1 & & \\ & -1 & \\ & & 0 \end{bmatrix} + t_2 \begin{bmatrix} -1 & & \\ & 0 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + t_1 \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 1 & \\ & & -1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Kjer je:

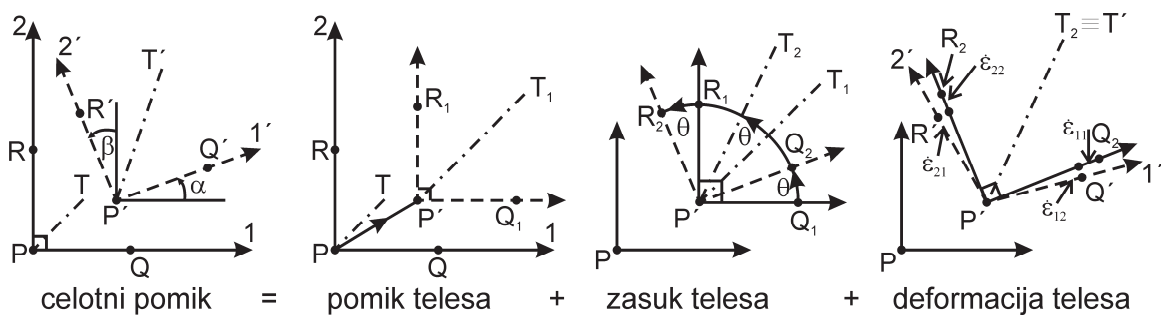
$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad t_1 = \frac{1}{3}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \quad t_2 = \frac{1}{3}(\sigma'_3 - \sigma'_1) \quad t_3 = \frac{1}{3}(\sigma'_1 - \sigma'_2) \quad (2.26)$$

V nalogi prav tako predpostavljamo, da je tenzor napetosti simetričen (ima 6 in ne 9 komponent) in da ga lahko zapišemo kot vektor.

2.3.2 Deformacije

Pomik zemljine lahko razdelimo na pomik telesa, zasuk telesa in deformacijo telesa $[\varepsilon]$ (slika 2.3). Deformacijo telesa lahko zapišemo kot volumenske deformacije in strižne deformacije.

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$



Slika 2.3: Pomik točke telesa po komponentah
Figure 2.3: Separation of displacement components.

V doktoratu bom uporabil inženirsko definicijo strižnih deformacij:

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx} \quad (2.28)$$

Prav tako lahko definiramo vektor prirastka deformacij.

$$[d\varepsilon] = \begin{bmatrix} d\varepsilon_{xx} & d\varepsilon_{yx} & d\varepsilon_{zx} \\ d\varepsilon_{xy} & d\varepsilon_{yy} & d\varepsilon_{zy} \\ d\varepsilon_{xz} & d\varepsilon_{yz} & d\varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Tudi za tenzor deformacij predpostavljamo, da je simetričen in da ga lahko zapišemo kot vektor.

3 SUKCIJA ZEMLJIN

Teoretične osnove sukcije so razvili na koncu 19. stoletja oziroma v začetku 20. stoletja in so bile večinoma razvite za potrebe agronomije. Vse rastline rastejo v vadozni coni zemljine, kjer se sukcija spreminja glede na vremenske vplive. Agronomi so se predvsem orientirali na vplive sukcije na rast rastlin, količino vode, ki jo zemljina pri določeni sukciji ima in kako in kdaj je potrebno namakanje pridelovalnih površin. Za potrebe agronomije so definirali dve točki na retencijski krivulji:

- poljsko kapaciteto oziroma volumetrično vlago pri sukciji 10-30 kPa,
- točko venenja oziroma vlago pri sukciji 1500 kPa.

Iz razlike med vlago pri poljski kapaciteti in točko venenja določimo količino vode, ki je razpoložljiva rastlini v enem kubičnem metru zemljine.

V geotehniki je bila sukcija omenjena že na prvi konferenci ISSMFE (današnji ISSMGE) leta 1936, kjer sta bila predstavljena dva članka iz področja nezasičene zemljine. Šele v 50 letih prejšnjega stoletja so se v Road Research Laboratory (Anglija) začeli zavedati pomena sukcije v zemljinah aridnega področja (po Fredlund in Rahardjo, 1993). Kasneje so na Imperial College-u (Anglija) s popravkom učinkovitih napetosti zaradi vpliva sukcije (Bishop, 1959) pričeli preiskovati vpliv sukcije na strižno trdnost in volumenske spremembe. Kljub temu, da se je mehanika nezasičene zemljine začela šele v poznih petdesetih letih, so v obdobju do leta 1959 naredili kar nekaj raziskav nezasičene zemljine na vseh področjih vpliva sukcije (po Fredlund in Rahardjo, 1993).

V hidrogeologiji se namesto tlaka vode uporabljajo vodni potenciali, ki so izraženi v metrih vodnega stolpca. Omenili bomo matrični potencial, osmotski potencial in vodni potencial, ki so ekvivalentni matrični, osmotski in totalni sukciji, le da so različnega predznaka. V doktoratu je sukcija izražena kot tlak (kPa), sicer pa jo lahko izrazimo še kot delo, potrebno za izvlek majhnega dela vode iz zemljine (J/kg) (kemični potencial μ).

Aitchison (1965) je definirala 3 različne sukcije, ki imajo svoj ekvivalent v vodnih potencialih:

- matrična sukcija ($u_a - u_w$) – je sukcija, ki jo zaznamo kot spremembo delnega parnega tlaka vodne pare nad zemljino glede na raztopino vode, ki je identična porni vodi v zemljini,
- osmotska sukcija (π) – je sukcija, ki jo zaznamo kot spremembo delnega parnega tlaka vodne pare nad raztopino vode, ki je identična porni vodi v zemljini, glede na destilirano vodo,
- totalna sukcija (ψ) – je sukcija, ki jo zaznamo kot spremembo delnega parnega tlaka vodne pare nad zemljino glede na destilirano vodo.

Povezave med posameznimi sukcijami podaja naslednja enačba:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (3.1)$$

3.1 Vodni potenciali

Voda v zemljini se giblje iz mest z višjim celotnim potencialom proti mestom z nižjim celotnim potencialom. Celotni potencial lahko razdelimo na več potencialov glede na vzrok potenciala.

3.1.1 Celotni potencial Φ

Celotni potencial je potrebno delo na enoto količine (volumna ali mase ali teže), da prenesemo neskončno majhen volumen destilirane vode izotermno (brez spremembe temperature), reverzibilno (brez trenja), pri standardnem zračnem tlaku in iz neke višine do točke v zemljini, ki nas zanima. Proces mora biti izotermen in reverzibilen, da naše delo ne vključuje še notranje energije in trenja. Prav tako mora biti volumen vode neskončno majhen, da ne spremeni slanosti vode (Marshall in Holmes, 1988).

3.1.2 Tlačni potencial P

Tlačni potencial je posledica tlaka v vodi. Če je referenčni tlak kar zračni tlak in se voda ne giblje, potem je tlačni potencial kar globina vode h_p .

$$P = \frac{u_w}{\rho_w \cdot g} = h_p \quad (3.2)$$

Kjer je u_w tlak vode, ρ_w gostota vode, g težnostni pospešek.

Iz zgornje definicije vidimo, da je tlačni potencial večji od 0, če je zemljina pod nivojem talne vode in manjši od 0, če je nad nivojem talne vode.

3.1.3 Matrični potencial Ψ_m ali h_c

Matrični potencial je posledica interakcije vode s strukturo zemljine in njenimi delci. Sile, s katerimi je voda vezana v strukturo zemljino, so lahko precejšnje in jih ne smemo zanemariti. Matrični potencial vključuje sile, ki so posledica površinske napetosti oziroma kapilarne sile in sile, ki so posledica adsorpcije vode na površino delcev. V obeh primerih so povzročitelji vezanja vode medmolekulske vezi. Zaradi svoje privlačne narave je matrični potencial vedno negativen. Definiran je podobno kot tlačni potencial, le da ne vključuje dela zaradi nestandardnega zračnega tlaka.

$$\Psi_m = \frac{(u_a - u_w)}{\rho_w g} = h_c \quad (3.3)$$

Kjer je u_a zračni tlak, u_w tlak vode, ρ_w gostota vode, g težnostni pospešek, h_c višina nad gladino proste vode.

3.1.4 Osmotski potencial Π

Osmotski potencial je posledica raztopljenih snovi v vodi. Izmerimo ga s pomočjo tenziometra in polprepustne membrane. Membrana prepušča le vodo, ne pa raztopljenih snovi, zato je višina čiste vode v tenziometru višja od višine vodne raztopine (porne vode). Razlika potencialov je osmotski potencial. Tudi ta potencial je vedno negativen.

3.1.5 Gravitacijski potencial Z

Gravitacijski potencial je delo na enoto količine, ki je potrebno za premik vode iz neke višine na neko drugo višino. Enak je razliki glede na referenčno ravnino.

3.1.6 Kombinacije potencialov

Tlačni, matrični, osmotski in gravitacijski potencial so povezani v naslednje kombinacije:

- Celotni potencial je seštevek tlačnega (matričnega), osmotskega in gravitacijskega potenciala.
- Hidravlični potencial H je seštevek tlačnega in gravitacijskega potenciala. Njegov gradient nam pove smer toka vode v zemljini in je sorazmeren s hitrostjo.
- Vodni potencial Ψ je seštevek matričnega in osmotskega potenciala. Le-ta nas v tej nalogi še posebej zanima, saj je njegova pozitivna vrednost ekvivalentna totalni sukiji.

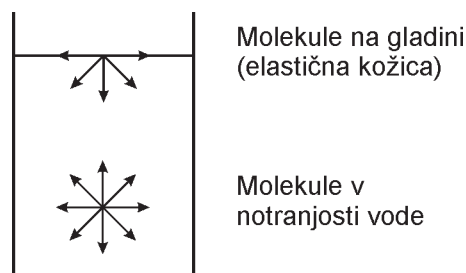
3.2 Načini vezanja vode v strukturo zemljine

Voda se veže v strukturo zemljine na dva načina. Lahko je adsorbirana na površini delcev zemljine ali pa zapolni porni prostor med zrni. Vodi, ki zapolni prostor med zrni, pravimo kapilarna voda. Oba pojava vezanja vode v strukturo zemljine sta povezana z medmolekulskimi vezmi. V primeru adsorpcijske vode so pomembne medmolekulske vezi med vodnimi molekulami in nabitimi delci zemljine, v primeru kapilarne vode pa vodikove vezi med molekulami vode.

3.2.1 Kapilarna voda

Površinska napetost je lastnost kapljevine, ki omogoča odpor kapljevine na delovanje zunanje sile. Posledica površinske napetosti so dežne kapljice, plavanje objektov težjih od vode (vodni drsalci) ter kapilarna voda. Površinska napetost je posledica medmolekulskih vezi, saj imajo vodne molekule na površini kapljevine v večini medmolekulske vezi usmerjene le proti kapljevini. Površina kapljevine se zaradi tega prične obnašati kot tanka membrana – elastična kožica.

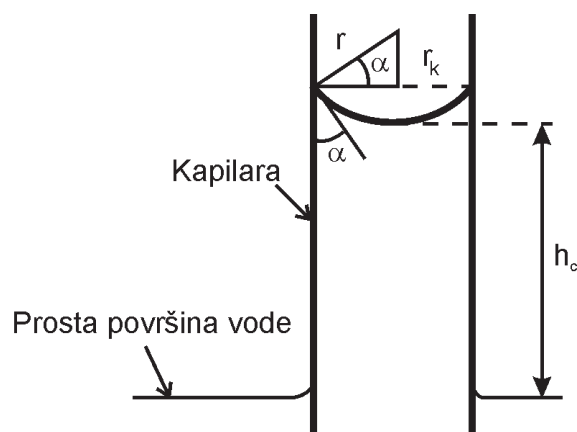
Površinska napetost vode znaša 73 mN/m pri 20 °C, njeno odvisnost od temperature pa podajamo v preglednici 2.5.



Slika 3.1: Medmolekulske vezi vodne molekule v notranjosti kapljevine in na vodni površini (Fredlund in Rahardjo, 1993).

Figure 3.1: Intermolecular forces inside water and on water surface (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Če bi pazljivo opazovali vodne drsalce, bi ugotovili, da se je voda pod njihovimi nožicami upognila. Podobno se voda upogne tudi v tanki kapilari – tvori meniskus. Poleg tega pa se voda v kapilari tudi dvigne glede na prosto gladino vode (slika 3.2). Dvigu vode pravimo kapilarni dvig, tlaku vode, ki je posledica kapilarnega dviga pa pravimo kapilarni tlak.



Slika 3.2: Kapilarni dvig (Marshall in Holmes, 1988).
Figure 3.2: Capillary rise (Marshall and Holmes, 1988).

Sile, ki delujejo na površino vode, lahko zapišemo kot sile, ki vodo vlečejo navzgor in kot sile, ki vlečejo vodo navzdol. Ker je voda v mirovanju, mora biti vsota vseh sil enaka 0.

$$2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot T_s \cdot \cos \alpha - \pi \cdot r_k^2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot h_c = 0 \quad (3.4)$$

Kjer je r_k radij kapilare, T_s površinska napetost, α omočitveni kot, h_c višina vodnega stolpca.

Ker iščemo kapilarni tlak, enačbo (3.4) preuredimo. Pri tem pogosto predpostavimo omočitveni kot 0° .

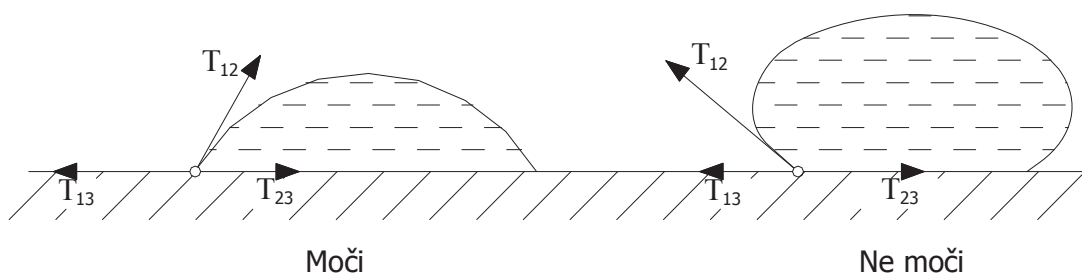
$$-u_w = \rho_w \cdot g \cdot h_c = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{r_k} = -\frac{2 \cdot T_s}{r} \quad (3.5)$$

Kjer je r radij ukrivljenosti, u_w tlak vode.

Iz slike 3.2 vidimo, da površinska napetost ne nastane samo na stiku kapljevine s plinom ampak nastane tudi na stiku kapljevine, plina in trdne snovi. Na robu imamo tako tri mejne površine: plin – kapljevina, plin – trdna snov in kapljevina – trdna snov. Vsota vseh horizontalnih sil v tej točki mora biti enaka 0 (slika 3.3).

$$T_{13} = T_{23} + T_{12} \cos \alpha \quad (3.6)$$

Vidimo, da je omočitveni kot odvisen od razmerja površinskih napetosti. Pravimo, da kapljevina moči površino, če je omočitveni kot $\alpha < 90^\circ$, oziroma ne moči površine, če je $\alpha > 90^\circ$.



Slika 3.3: Skica kontaktnih ploskev omočljive in neomočljive snovi (Kladnik, 1989).
Figure 3.3: Phenomenon of the wetted and non wetted surface (Kladnik, 1989).

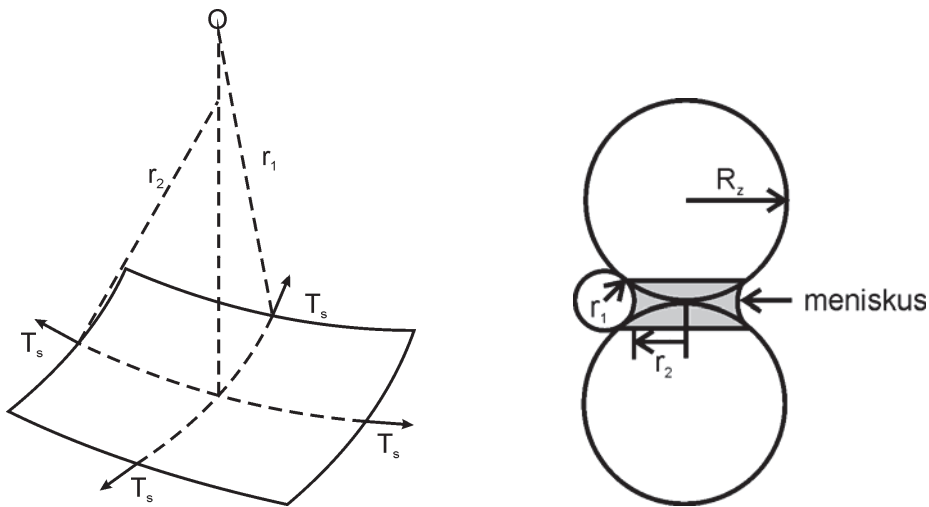
Ker pore v zemljini niso okrogle, ima površina vode dva radija ukrivljenosti (r_1 , r_2) (slika 3.4). Enačbo (3.5) za takšne primere zapišemo kot:

$$-u_w = T_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.7)$$

Za primer dveh krogel pa lahko izpeljemo relacijo med obema radijema ukrivljenosti (Cho in Santamarina, 2001) in radijem zrna (krogle) (slika 3.4). Takšna enačba velja le za peske pri rezidualni vlagi.

$$r_1 = \frac{r_2^2}{(2R_z - 2r_2)} \quad (3.8)$$

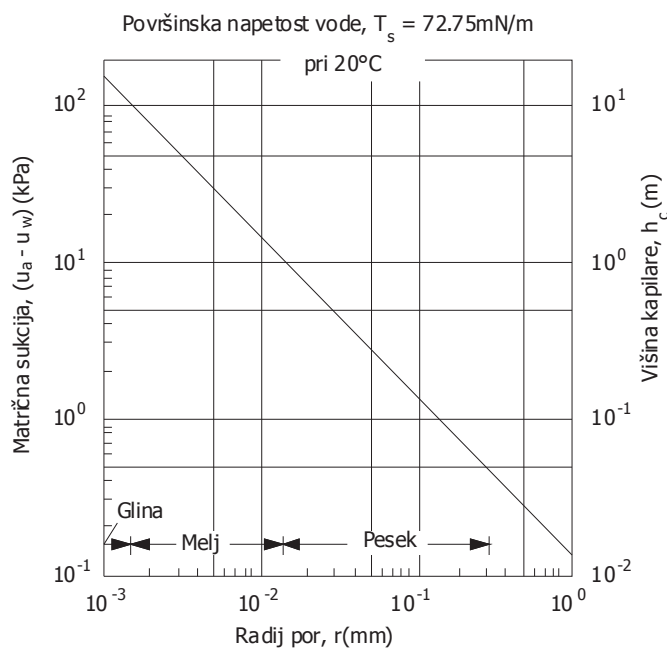
Kjer je R_z polmer krogel (zrna zemljine).



Slika 3.4: Površinska napetost na ukrivljeni površini z dvema radijema ukrivljenosti (levo) (Fredlund in Rahardjo, 1993) in primer takšne membrane v primeru vode med dvema krogelama (Cho in Santamarina, 2001).

Figure 3.4: Surface tension on a warped membrane with two different radii of curvature (left) (Fredlund and Rahardjo, 1993) and example of such membrane in case of water between two spheres (Cho and Santamarina, 2001).

Če iz merjene sukcije sklepamo na radij por, običajno upoštevamo le en radij ukrivljenosti in omočitveni kot enak 0° (slika 3.5). Omočitveni kot 0° pomeni, da se voda popolnoma razleže po zemljini, izhaja pa iz predpostavke, da je zemljina zasičena.



Slika 3.5: Zveza med pornim radijem, sukcijo in kapilarnim dvigom (Fredlund in Rahardjo, 1993).

Figure 3.5: Relationship among pore radius, matrix suction and capillary height (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Maksimalni dvig vodnega stolpca v kapilari bi moral biti omejen na približno 8,5 m zaradi pojava kavitacije vode. Vendar se kavitacija v primeru majhnih prostorov zgodi kasneje. Natezna »napetost« vode je izmerjena do 22,6 MPa (oziroma po teoriji ocenjena na 100 MPa pri 20°C) (Marshall in Holmes, 1988). Leta 1991 pa so izmerili natezno trdnost vode 140 MPa na enem samem kristalu vode (Marinho et al., 2008). Iz tega lahko sklepamo, da velikost kapilarne sukcije ni omejena le na 85 kPa, temveč je lahko precej višja, saj so kapilare pri velikih sukcijah tudi zelo majhne.

Pri meritvah sukcije moramo upoštevati, da površinska napetost upada z naraščanjem temperature vode (preglednica 2.5). Marshall in Holmes (1988) sta na podlagi laboratorijskih meritev opazila, da je hitrost upadanja sukcije višja od hitrosti upadanja površinske napetosti. Razliko lahko pripišemo ujetemu zraku med zrn, ki se zaradi spremembe temperature in tlaka širi ali krči.

3.2.2 Adsorpcija

Adsorpcijska voda je vezana na površino delcev in tvori nekakšen ovoj okoli delcev zemljine. Adsorpcijski ovoj je posledica različnih interakcij med zrn zemljine in vodo: vodikove vezi, hidratacije izmenljivih kationov, privlačnosti zaradi osmoze, privlačnosti zaradi površinskega naboja in privlačnosti zaradi površinskih disperzijskih sil (Mitchell, 1993). V zgodnji fazi vlaženja gline (nizke vlage) je pomembno raztapljanje »zamenljivih« kationov iz zemljine, nato pa so pomembne medmolekulske vezi, šibke medmolekulske vezi in vodikove vezi. Posledica vodikovih vezi je oblak vode okoli zrn širok tudi do 5 nm (velikost vodne molekule je 0,14 nm) (Marshall in Holmes, 1988).

Različne zemljine vežejo nase različne količine adsorpcijske vode pri enaki sukciji. Količina adsorpcijsko vezane vode je odvisna od velikosti zrn oziroma specifične površine zrn, velikosti električnega naboja površine zrn in vrste »zamenljivih« kationov. Inertni minerali (npr. kremen, kalcit)

nimajo električno nabite površine in so površinsko neaktivni. Drugi, predvsem glineni, minerali pa so površinsko negativno nabiti in privlačijo pozitivno nabito stran vode. Velikost električnega naboja je odvisna od vrste glinenega materiala (preglednica 3.1).

Pri glinenih mineralih je potrebno ločevati tudi med paketno vezano vodo, ki je vezana med pakete glinenih mineralov, in eksterno vezano vodo, ki je vezana na površino zrn. Specifična površina glinenih zrn je med 50 in 120 m²/g, če pa upoštevamo tudi interno specifično površino pa tudi do 840 m²/g.

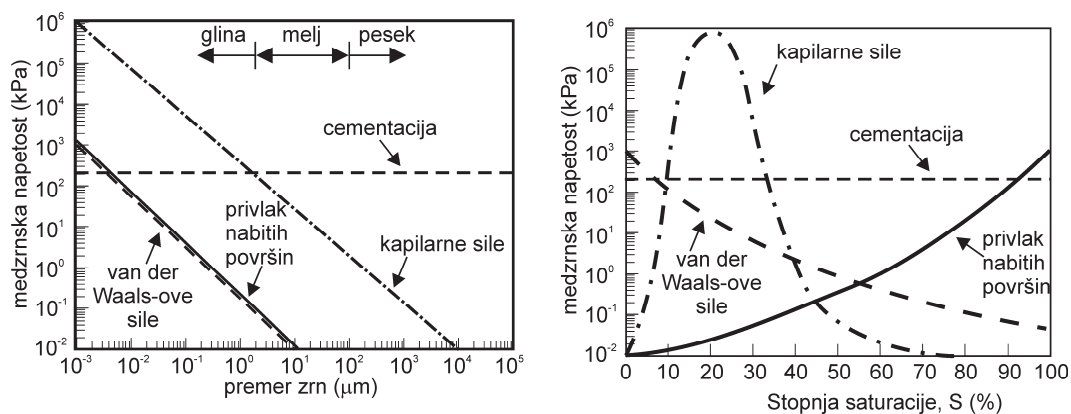
Preglednica 3.1: Trajni strukturni naboj na površini glinenih mineralov (Krauskopf in Bird, 1995).

Table 3.1: Permanent electrical charge of the clay surface (Krauskopf and Bird, 1995).

Mineral gline	Permanentni strukturni naboj (mol PSN)/kg
Kaolinit	Blizu 0
Montmorillonit	- (0,7 – 1,7)
Illit	- (1,9 – 2,8)

3.2.3 Razmerje med kapilarno in adsorpcijsko vezano vodo

Lu in Likos (2006) sta razdelila sile med dvema delcema zemljine na sile, ki so posledica cementacije, van der Waalsovih sil, privlaka nabitih površin in kapilarnih sil. Posamezne sile sta primerjala glede na velikost zrn in stopnja zasičenosti zemljine (slika 3.6). Iz diagrama vidimo, da so v primeru peska najbolj pomembni kapilarni vplivi, v primeru gline pa na pomembnosti pridobijo tudi drugi načini vezanja vode (adsorpcija).

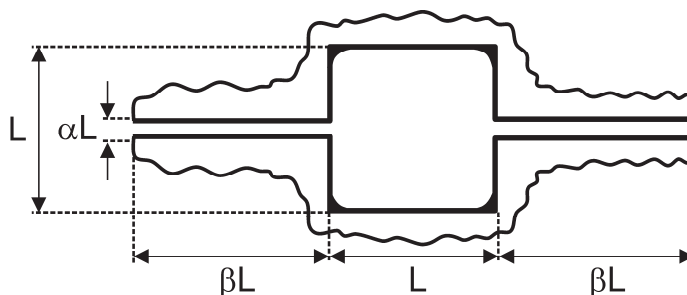


Slika 3.6: Jakost posameznih komponent sil med delci glede na velikost delcev (levo) in stopnjo zasičenosti (desno) (Lu in Likos, 2006).

Figure 3.6: Contribution of different interparticle forces as a function of particle size (left) and saturation (right) (Lu and Likos, 2006).

Lu in Likos (2006) sta sicer razdelila in primerjala posamezne komponente sukucije, vendar sta izhajala iz stališča prispevka različno vezane vode k sukucijski napetosti, nasprotno pa sta Or in Tuller (1999) primerjala pomembnost kapilarne in adsorpcijsko vezane vode na sukucijo zemljine. Or in Tuller (1999) sta predlagala, da bi se zemljina predpostavila kot skupek različno velikih enotskih celic sestavljenih iz tanke kapilare in večje pore (slika 3.7). Pri tem je oblika enotske celice odvisna od

razmerja med velikostjo pore in velikostjo kapilare (β) ter razmerjem med volumnom kapilare in volumnom pore ($\alpha\beta$) (v računih preneseno na razmerje dolžin).



Slika 3.7: Enotska celica (Or in Tuller, 1999).

Figure 3.7: Unit cell (Or and Tuller, 1999).

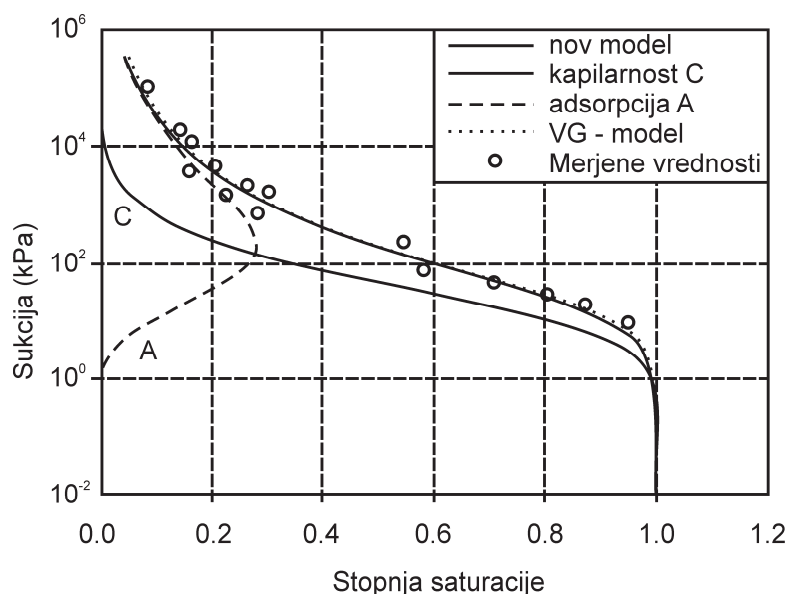
Sukcijo zemljine sta predpostavila kot seštevek kapilarne in adsorpcijske komponente:

$$(u_a - u_w) = A(h) + C(r) \quad (3.9)$$

$$(u_a - u_w) = \frac{A_{svl}}{6\pi h^3} + \frac{2T_s}{r}$$

Kjer je A prispevek adsorpcijsko vezane vode, C prispevek kapilarno vezane vode, A_{svl} Hamakerjeva konstanta (privlak tekočine na trdno snov zaradi van der Waalsovih sil) ($-6 \cdot 10^{-20}$ J), h višina adsorpcijskega obroča, r radij ukrivljenosti.

Z vpeljavo gama porazdelitve takšnih por in z določenimi omejitvami parametrov takšnih enotskih celic sta prišla do modela zemljine. Na sliki 3.8 vidimo količino adsorpcijsko in kapilarno vezane vode pri različnih sukcijah zemljine. Prispevek kapilarno in adsorpcijsko vezane vode je močno odvisen od vrste materiala vendar za izbrani primer iz slike 3.8 vidimo, da je prispevek adsorpcijsko vezane vode zanemarljiv pri visoki stopnji zasičenosti (>90%), pri stopnji zasičenosti nižji od rezidualne (<30-40%) pa je zanemarljiv prispevek kapilarne vode.



Slika 3.8: Vpliv kapilarno in adsorpcijsko vezane vode na sukucijo zemljine (Or in Tuller, 1999).

Figure 3.8: Capillary and adsorptive contribution to soil suction (Or and Tuller, 1999).

4 RETENCIJSKA KRIVULJA

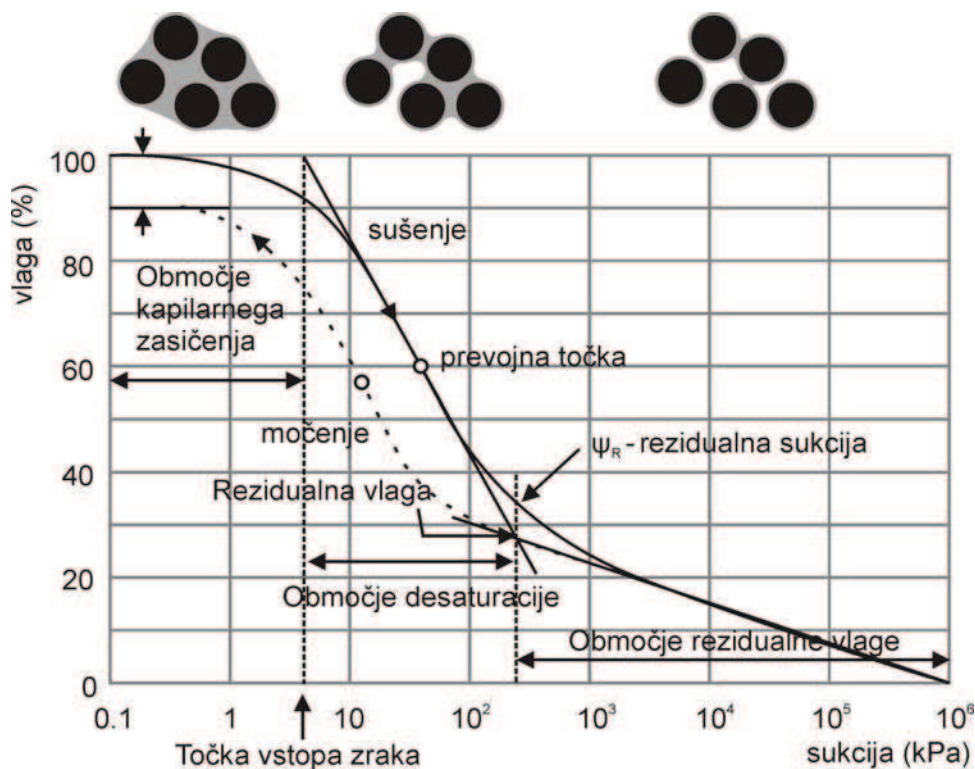
V prejšnjem poglavju smo obravnavali načine vezanja vode v strukturo zemljine. Funkcijo, ki opisuje zvezo med sukcijo zemljine in količino vode v zemljini, imenujemo retencijska krivulja. Merilo za količino vode v zemljini je lahko gravimetrična vlaga, volumetrična vlaga, normalizirana volumetrična vlaga, stopnja zasičenosti, efektivna stopnja zasičenosti ali količnik z vodo zasičenih por. Z efektivno stopnjo zasičenosti in normalizirano volumetrično vlago opišemo kolikšen delež vode zemljina še lahko odda med sušenjem glede na zasičeno zemljino. Za razliko od vlage ali stopnje zasičenosti vrednost 0 ne pomeni popolnoma suhe zemljine ampak zemljino pri rezidualni vlagi (poglavje 2). Za sukcijo pa lahko uporabimo matrično ali totalno sukcijo. Razlike med totalno in matrično sukcijo so lahko pri nizki sukciji znatne, nato pa se zmanjšujejo in se pri visoki sukciji izničijo (Fredlund in Xing, 1994).

Oblika retencijske krivulje pove, kako se bo zemljina obnašala med vlaženjem ali sušenjem ter tudi kako je voda vezana na strukturo zemljine. Retencijsko krivuljo lahko glede na obnašanje zemljine razdelimo na več območij (Bardner, 1965):

- **Območje kapilarnega zasičenja** – je območje retencijske krivulje, kjer je efektivna stopnja zasičenosti 100%. **Točka vstopa zraka** je točka, kjer se prične zemljina sušiti med sušenjem. Analogno tej točki obstaja **točka vstopa vode** ali **točka ujetih zračnih mehurčkov**. To je sukcija, kjer stopnjo zasičenosti povečujemo le s povečevanjem pornega pritiska in posledično manjšanjem zračnih mehurčkov ter brez iztiskanja zraka iz vzorca. Ujeti zračni mehurčki lahko predstavljajo do 20% volumna por. Obliko obnašanja zemljine v tem navidezno zasičenem stanju podajata Bicalho in Znidarcic (2002) ter Fredlund in Rahardjo (1993).
- **Območje desaturacije** – V območju desaturacije so v zemljini zvezne z zrakom ali vodo zapolnjene pore. Z višanjem sukcije se niža vlažnost zemljine in posledično zmanjšuje vodoprepustnost. Obratno pa se v zemljini večja količina por zapolnjenih z zrakom in posledično se zvišuje prepustnost za zrak. Za območje desaturacije je značilna histereza med krivuljo sušenja in krivuljo vlaženja (slika 4.1 črtkano vlaženje in polna črta sušenje).
- **Območje rezidualne vlage** – Območje rezidualne vlage so različni avtorji definirali različno. Van Genuchten (1980) je označil rezidualno vlago kot vlago, pri kateri ima zemljina sukcijo 1500 kPa. To velja samo za peščene ali meljne zemljine, podvržene samo hidravličnem transportu. Sukcija 1500 kPa je hkrati tudi točka venenja v agronomiji. Točko rezidualne vlage so kasneje opredelili kot mesto, kjer se vode iz zemljine ob povečevanju sukcije ne da več izvleči s hidravličnim transportom (Bishop, 1960, Luckner et al., 1989). Fredlund in Xing (1994) sta definirala točko rezidualne vlage kot presečišče dveh logaritemskih premic. Prva logaritemska premica je značilna za visoke sukcije druga pa za območje desaturacije. Vanapalli et al. 1998 so točko rezidualne vlage opredelil kot sukcijo, v kateri prehaja voda iz območja, v katerem prevladujejo kapilarne sile, v območje adsorpcijskih sil. V doktoratu uporabljamo definicijo rezidualne vlage, kot tisto vlago v zemljini, pri kateri ni več zveznih z vodo zapolnjenih por. Pri takšni zemljini ni več hidravličnega transporta vode, vode iz zemljine ni možno več odstraniti s hidravličnim transportom, je pa še možno sušenje zemljine z difuzijo vodne pare.

Bardner (1965) je na retencijski krivulji določil še prehodna območja. V prehodnem območju med območjem kapilarnega zasičenja in območjem desaturacije imamo zvezne in nezvezne pore zapolnjene z zrakom. Zato je za takšno območje značilno, da ne moremo dobro opisati dogajanja v zemljini.

Prav tako velja, da so pri nizkih sukcijah vplivi zgoščenosti, poroznosti in napetostnega stanja na merjene vrednosti veliki, pri visokih sukcijah pa majhni do zanemarljivi, če retencijsko krivuljo opišemo z relacijo vlaga-sukcija (Fredlund in Xing, 1994, Thakur et al., 2006, Birlle et al., 2008).



Slika 4.1: Retencijska krivulja (prirejeno po Fredlund in Xing, 1994, Sillers et al., 2001, Lu et al., 2007)

Figure 4.1: Soil water characteristic curve (after Fredlund in Xing, 1994, Sillers et al., 2001, Lu et al., 2007)

4.1 Funkcije za opis retencijske krivulje

Obstaja več materialnih funkcij za opis retencijske krivulje. Nekatere uporabljajo 2 parametra in so bolj toge, druge uporabljajo 3 ali 4 parametre in se načeloma bolj prilagajajo meritvam. Zaželeno pa je, da so parametri fizikalno razložljivi in neodvisni med seboj. V nadaljevanju bomo našteali le najbolj znane funkcije za opis retencijske krivulje:

- Gardner (1958)

$$\Theta = \frac{1}{1 + \frac{\psi^{b_G}}{a_G}} \tag{4.1}$$

Kjer sta a_G , b_G oblikovna parametra funkcije.

- Visser (1969)

$$\psi = \alpha_V \cdot w^{\beta_V} \quad (4.2)$$

Kjer sta α_V , β_V oblikovna parametra funkcije.

- Brooks in Corey (1964)

$$Se = \min \left(1, \left[\frac{\alpha_{BC}}{\psi} \right]^{\lambda_{BC}} \right) \quad (4.3)$$

Kjer sta α_{BC} , λ_{BC} oblikovna parametra funkcije, α_{BC} je hkrati točka vstopa zraka, λ_{BC} je odvisen od razporeditve por.

- van Genuchten (1980)

$$\Theta = \left[\frac{1}{\left(1 + (a_{VG} \cdot \psi)^{n_{VG}} \right)^{m_{VG}}} \right] \quad (4.4)$$

Kjer so a_{VG} , n_{VG} , m_{VG} oblikovni parametri funkcije. $1/a_{VG}$ je prevojna točka funkcije, n_{VG} parameter razporeditve por, m_{VG} parameter asimetričnosti krivulje.

- Fredlund in Xing (1994)

$$w = w_s \cdot \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_R} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_R} \right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\left(\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right) \right)^{m_f}} \right] \quad (4.5)$$

Kjer so a_f , n_f , m_f oblikovni parametri funkcije, w_s vlaga zasičene zemljine, ψ_R rezidualna sukucija (kPa), a_f je prevojna točka funkcije, n_f parameter razporeditve por, m_f parameter asimetričnosti krivulje.

Pri zgornjih enačbah za opis retencijskih krivulj velja omeniti, da:

- Visserjev (1969) model opisuje le območje desaturacije,
- Gardner (1958), Brooks in Corey (1964) in van Genuchten (1980) z modeli opisujejo območje desaturacije in območje kapilarne zasičenosti, vendar za območje kapilarne zasičenosti predpostavijo nestisljivo zemljino, za območje rezidualne vlage pa predpostavijo, da se voda v zemljini prenaša le s hidravličnim transportom (zemljina ima rezidualno vlago),
- Fredlund in Xing (1994) z modelom opisujeta celotno retencijsko krivuljo,
- vse funkcije veljajo le za zemljine z enojnim sistemom por.

Za zemljine z več sistemi por lahko seštevamo različne retencijske krivulje, ki jim dodajamo uteži glede na pomembnost posameznega sistema por (Durner, 1994).

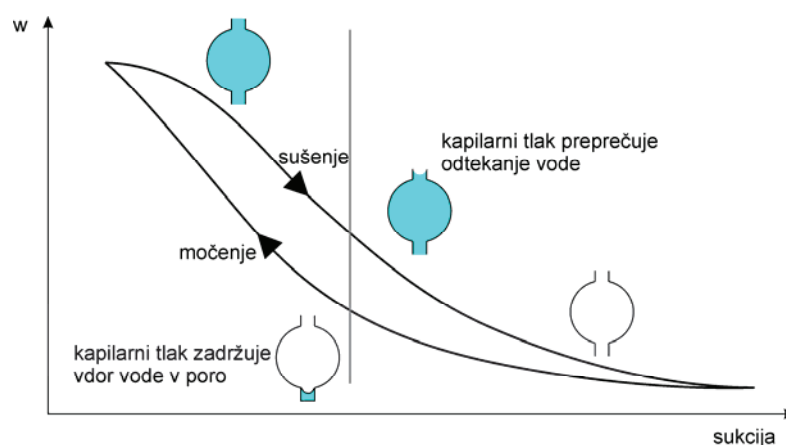
$$\Theta = \sum_{i=1}^n w_i \Theta(\psi) \quad (4.6)$$

Kjer je w_i utež.

4.2 Histereza retencijske krivulje

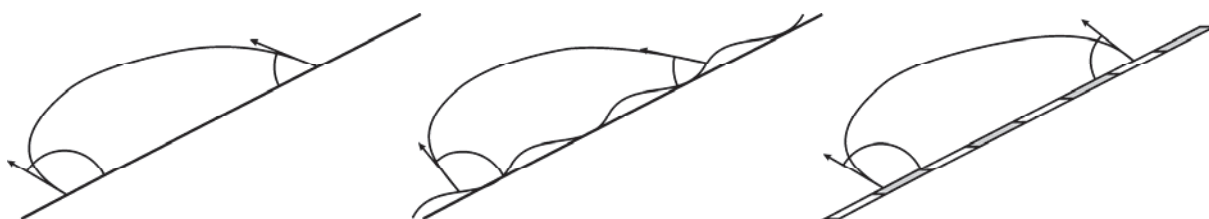
S pomočjo kapilarnega učinka lahko tudi razložimo razliko v vlagi pri retencijski krivulji, če zemljino močimo ali sušimo. Poro si lahko predstavljamo podobno kot tanko kapilaro z razširitvijo (slika 3.7, 4.2). Pri tem imamo opravka z dvema radijema ukrivljenosti. Prvi je radij razširitve, ki bo definiral, koliko vode bo pora sprejela, v kolikor jo predpostavimo okroglo, in kapilarni tlak pri katerem se bo pora napolnila. Drugi manjši radij pa bo definiral kapilarni tlak, pri katerem se bo pora spraznila (slika 4.2). Med sušenjem je predpostavljena pora zapolnjena z vodo dokler ne presežemo tlaka, ki izprazni kapilaro in poro. Med vlaženjem pa razširitev predpostavljene pore prepreči nadaljnji kapilarni dvig in zapolnitev razširitve z vodo. Pora se napolni z vodo šele, ko sukcija dovolj upade.

Poleg tega učinka pa imamo še učinek omočitvenega kota, ki je v mokrem materialu približno enak 0° , v suhem stanju pa je večji od 0° . Na omočitveni kot vplivajo tudi gravitacija, hrapavost in vrsta materiala (slika 4.3). Tudi ti pojavi povzročijo histerezo obnašanje zemljine.



Slika 4.2: Učinek močenja in sušenja na retencijsko krivuljo (Maček, 2006).

Figure 4.2: Drying and wetting path of soil water characteristic curve (Maček, 2006).



Slika 4.3: Vpliv naklona, hrapavosti in različnih materialov na omočitveni kot.

Figure 4.3: Influence of slope, roughness and different materials on wetting angle.

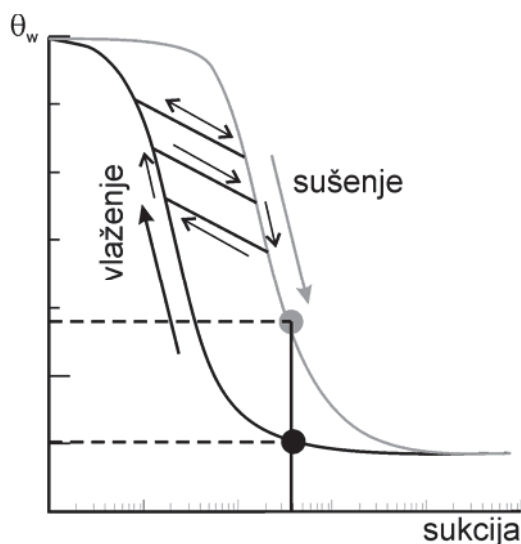
Zaradi histereznega obnašanja zemljine moramo imeti dve retencijski krivulji – retencijsko krivuljo v fazi sušenja in retencijsko krivuljo v fazi močenja. Nuth in Laloui (2008) ter Fredlund et al. (2011) predlagajo, da se razlika med funkcijo sušenja in močenja opiše le s spremembo prevojnne točke, naklon krivulj pa naj ostane enak. Ker pri krivulji močenja nikoli ne dobimo popolne zasičenosti, saj se v zemljino ujamejo zračni mehurčki, Zhou in Yu (2005) predlagata popravek van Genuchtenove

funkcije po enačbi (4.7). Tako popravljena funkcija ima popolnoma zasičeno zemljino le med primarnim sušenjem, med močenjem in ponovnim sušenjem pa ne.

$$Se = \left[\frac{1}{\left(B_0 + (a_{VG} \cdot \psi)^{n_{VG}} \right)^{m_{VG}}} \right] \quad (4.7)$$

Kjer je B_0 faktor, ki zmanjšuje stopnjo zasičenja pri retencijski krivulji močenja.

V vadozni coni se sukcija spreminja glede na okoljske vplive. Pri tem zemljina med fazo sušenja in fazo močenje ne preide od popolnoma mokre do popolnoma suhe zemljine ali obratno, ampak se prične močiti ali sušiti že prej. Zato je potrebno znati opisati obnašanje zemljine pri prehodu iz retencijske krivulje sušenja na retencijsko krivuljo močenja in obratno. Casini et al. (2008) in Nuth in Laloui (2008) predlagajo, da se retencijsko krivuljo sušenja in retencijsko krivuljo vlaženja poveže z logaritemsko premico, ki opiše obnašanje zemljine med prehodom iz ene v drugo retencijsko krivuljo (slika 4.4).



Slika 4.4: Povezovalne krivulje med retencijsko krivuljo sušenja in vlaženja (Casini et al., 2008).

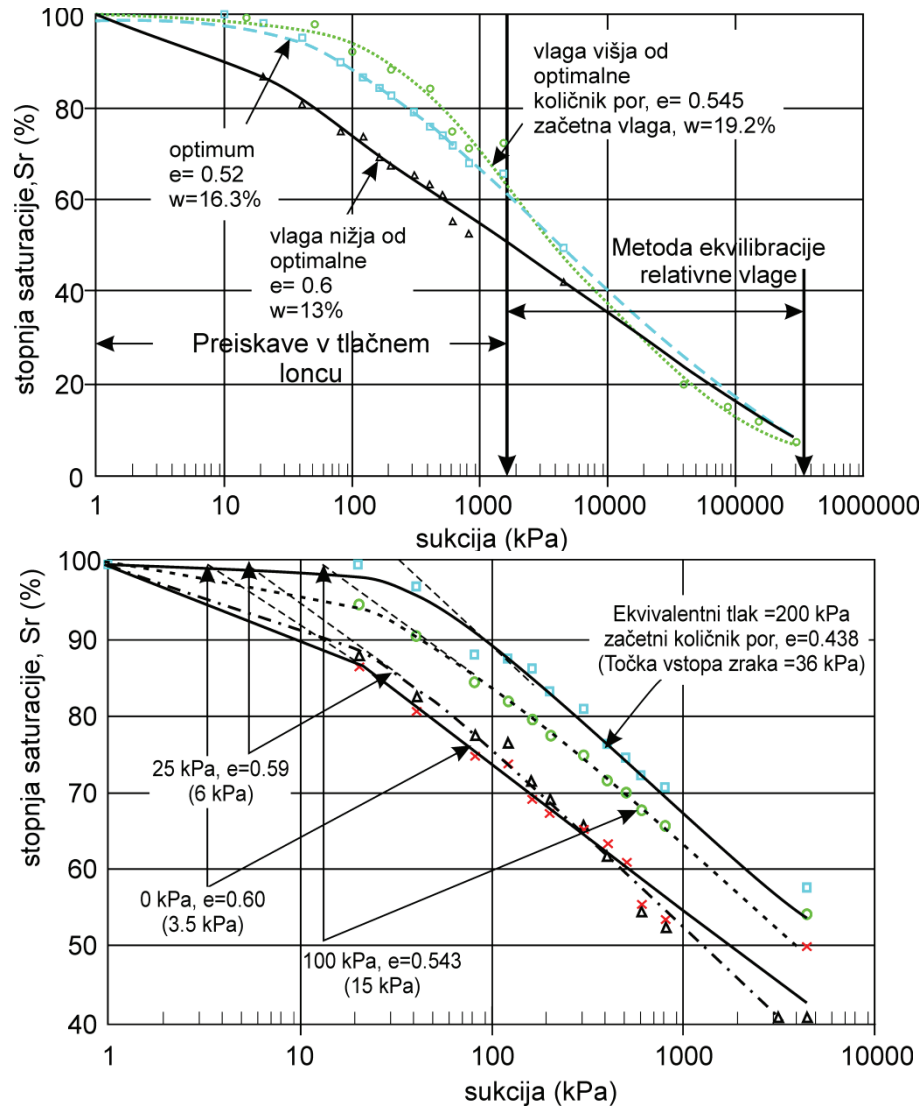
Figure 4.4: Scanning curves between main drying and main wetting soil water characteristic curve (Casini et al., 2008).

4.3 Vpliv strukture zemljine

Pri zbitih zemljinah velja, da imajo zemljine različne retencijske krivulje zaradi različne razporeditve por in količnika por (Romero in Simms, 2008, Romero et al., 2011, Vanapalli et al., 1999) (slika 4.5). Kawai et al. (2000) so opravili študijo obnašanja puste gline zbite na različne količnike por pri različnih stopnjah zasičenja. Ugotovili so močno odvisnost točke vstopa zraka, točke ujetih zračnih mehurčkov in rezidualne vlage od količnika por (slika 4.6). Do podobnega zaključka so prišli tudi Casini et al. (2007), ki so predlagali popravek prevojnne točke van Genuchtenove funkcije:

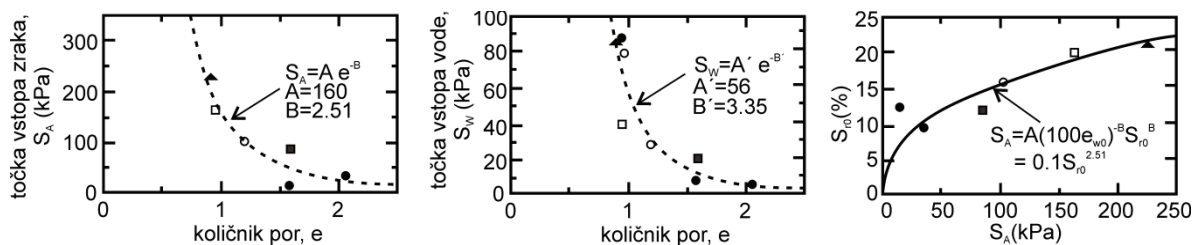
$$a_{VG} = Ane^{Bn_0} \quad (4.8)$$

Kjer sta A , B oblikovna parametra, n poroznost, n_0 poroznost po uravnoveženju na sukcijo 0.



Slika 4.5: Vpliv vlage pri nabijanju in količnika por na retencijsko krivuljo zbite peščene gline (Vanapalli et al., 1999).

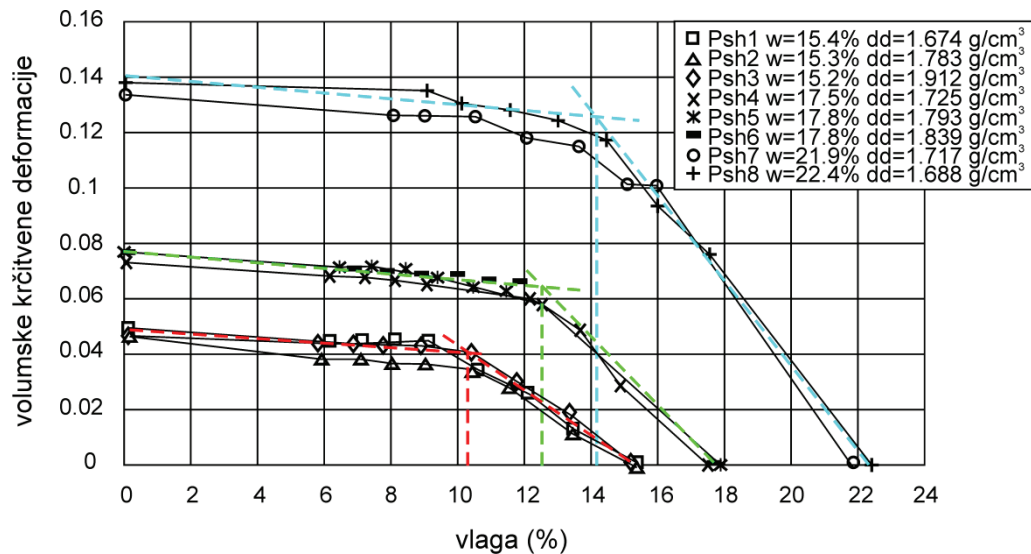
Figure 4.5: Influence of water content at compaction and void ratio on the soil water characteristic curve of sandy clay (Vanapalli et al., 1999).



Slika 4.6: Vpliv količnik por na točko vstopa zraka, točko vstopa vode in rezidualno vlago (Kawai et al., 2000).

Figure 4.6: Influence of void ratio on air entry value, occluded air bubbles point and residual water content (Kawai et al., 2000).

Različna struktura zemljine ne vpliva samo na retencijsko krivuljo zemljine ampak tudi na druge lastnosti zemljine. Birle et al. (2008) so ugotovili, da je sukcija pri meji krčenja odvisna od začetne vlage nabitih zemljin. Bolj vlažne zemljine imajo višjo sukcijo pri meji krčenja ter izkazujejo večje deformacije med sušenjem. Pri tem se moramo zavedati, da meja krčenja zbitih zemljin ni povezana s točko vstopa zraka, saj so zbite zemljine sestavljene iz makro por in »zrn« zemljine. Med sušenjem tako stopnja zasičenja ni nikoli enaka 100%. Nasprotno od njih pa sta Marinho in Chandler (1994) pokazala, da se zemljine prenehajo krčiti pri skoraj enaki sukciji ter da je končni količnik por odvisen od začetne stopnje zasičenosti.



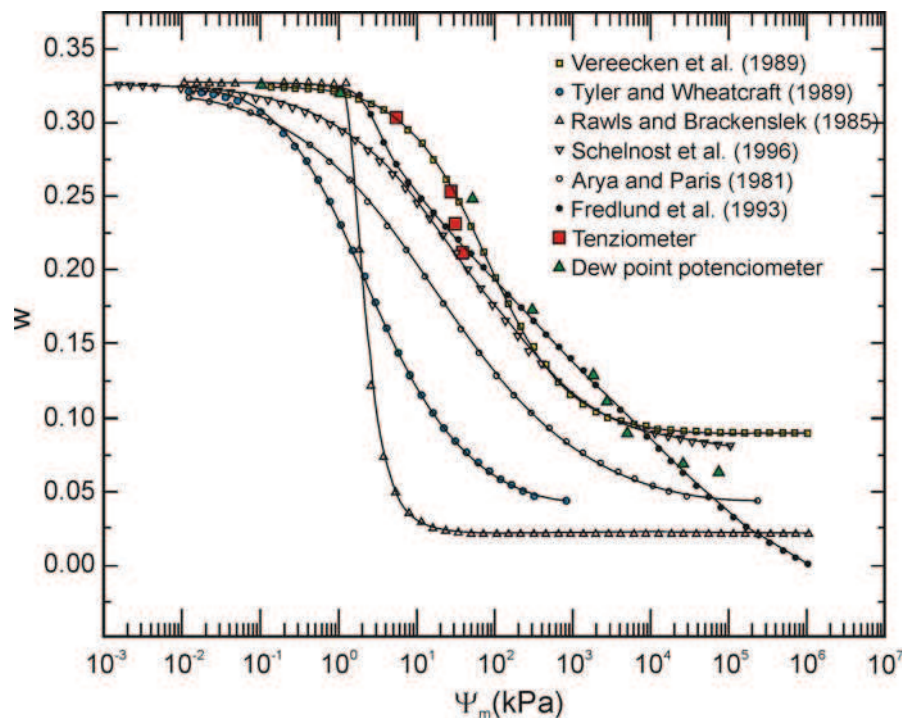
Slika 4.7: Vpliv vlage pri nabijanju na krčenje zemljine (Birle et al., 2008).

Figure 4.7: Influence of water content at compaction on shrinkage deformations (Birle et al., 2008).

4.4 Ocena retencijske krivulje iz indeksnih podatkov in gostote

Merjenje retencijske krivulje je drago in pogosto je rezultat vprašljiv, saj je retencijska krivulja močno odvisna od razporeditve por. Na razporeditev por pa vpliva način priprave vzorca in totalna napetost. Zato so mnogi avtorji predlagali uporabo prenosnih funkcij med osnovnimi preiskavami (zrnavostna sestava, količnik por, indeks plastičnosti) in sukcijo (Visser, 1969, Zapata et al., 2000, Ganjian et al., 2007, Arya in Paris, 1981, Fredlund et al., 1997). Pri tem se je potrebno zavedati, da večina modelov za opis relacije sukcija-relativna vodoprepustnost upošteva razporeditev por (Burdine, 1953, Mualem, 1976, Assouline, 2001). Možnih načinov ocene retencijske krivulje je več: statistična ocena vlage pri dani sukciji (Visser, 1969), povezava med parametri funkcije za opis retencijske krivulje in materialnimi podatki (Zapata et al. 2000, Ganjian et al., 2007), ali pa s pretvorbo zrnavostne krivulje v prostor velikost por – volumen por (Arya in Paris, 1981, Fredlund et al., 1997). Arya in Paris (1981) sta zemljino opisala s kroglastimi zrni in idealnimi kapilarnimi cevki ter vijugavostjo zemljine (tortuoznost).

Vsekakor je potrebno poudariti, da takšni modeli omogočajo približno določitev retencijske krivulje, vendar se je potrebno zavedati, da so meritve vseeno bolj natančne. Thakur et al. (2006) je primerjal rezultate meritev na melju s predpostavljenimi modeli različnih avtorjev. Iz slike 4.8 vidimo do kako velikih razlik lahko pride med različnimi modeli.



Slika 4.8: Primerjava med izmerjeno retencijsko krivuljo in napovedjo modelov (Thakur et al., 2006)
Figure 4.8: Comparison between measured soil water characteristic curve and prediction by different models (Thakur et al., 2006).

5 VPLIV SUKUCIJE NA TRDNOST ZEMLJINE

5.1 Uvod

V drugem poglavju smo že omenili definicije napetosti v geotehniki. V mehaniki zasičenih zemljin poznamo splošno uveljavljeno pravilo efektivnih napetosti (enačba (2.22)) (Terzaghi, 1936). Pravilo efektivnih napetosti se je izkazalo za vsestransko uporabno pri opisu obnašanja zasičene zemljine. Strižno trdnost zemljine zapišemo kot:

$$\tau_{\max} = c' + \sigma_n' \tan \varphi' \quad (5.1)$$

Kjer je τ_{\max} maksimalna strižna napetost na porušni ploskvi, c' kohezija (izražena na efektivno napetostno stanje), φ' strižni kot (izražen na efektivno napetostno stanje), σ_n' efektivna napetost normalna na ploskev porušitve.

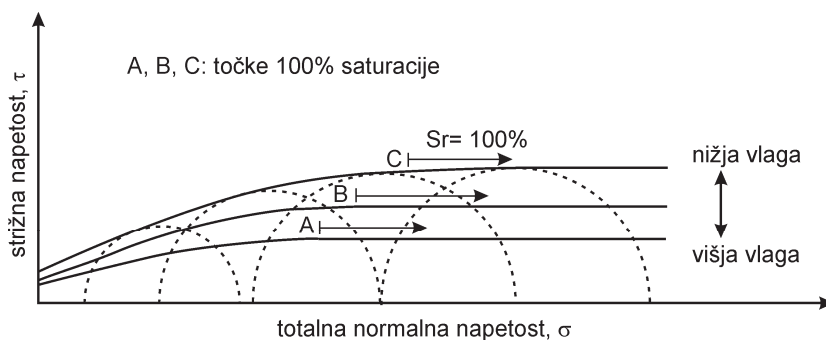
V nezasičeni zemljini pa je tlak vode negativen in povečuje efektivno napetostno stanje, hkrati pa se z višanjem sukucije zemljina suši in vpliv sukucije na napetostno stanje prične upadati. V mehaniki nezasičenih zemljin vpliv sukucije na strižno trdnost zapišemo na tri različne načine:

- kot popravek efektivne napetosti,
- sukucija kot neodvisna napetostna spremenljivka in
- sukucijska napetost.

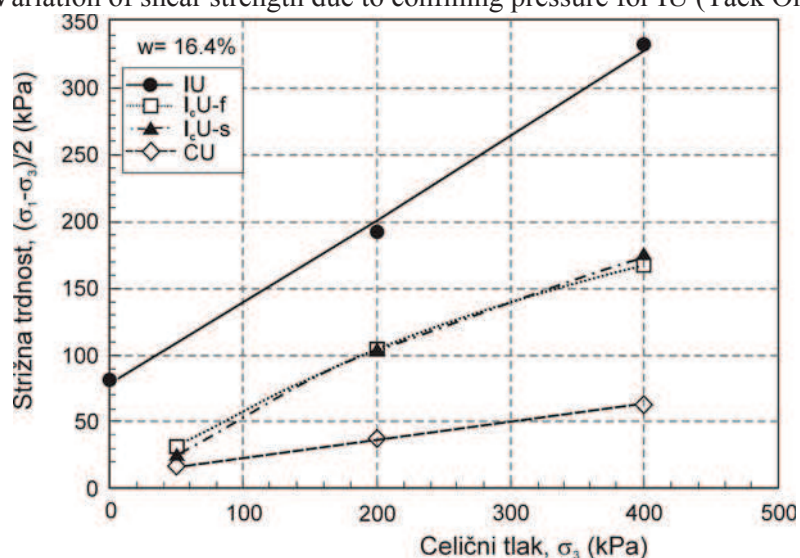
Rezultati vpliva sukucije na strižne karakteristike so močno odvisni od vrste postopka. Volumenske spremembe spremenijo stopnjo zasičenosti zemljine in posledično tudi sukucijo. Tlak zraka in vode v porah pa se pri nedreniranih pogojih ravno tako spreminjata in s tem spreminjata napetostno stanje v zemljini (sukucijo in totalno napetost). Pri preiskavah poskušamo čim bolj realno posnemati stanje kakršno bo v zemljini v našem problemu. Taek Oh et. al. (2008) so opravili serijo testov v triosnem aparatu z različnimi postopki preiskav (slika 5.2): konsolidiran nedreniran triosni test (CU), nekonsolidiran nedreniran test (IU) ter hitri in počasni »konsolidiran« nedreniran test (IeU-f in IeU-s), kjer se je pred testom znižalo presežne zračne tlake, volumen vode pa je ostajal enak. Na podlagi testov so zaključili:

- strižna trdnost vzorcev zbitih na suhi strani je močno odvisna od bočnega pritiska (slika 5.1),
- v primeru vrednotenja strižnih parametrov v totalnih napetostih sukucija povečuje strižni kot in manj kohezijo,
- z višanjem bočnih pritiskov se zmanjšuje vpliv sukucije na trdnost zemljine, vendar je pri nizki sukuciji prispevek sukucije neodvisen od bočnih pritiskov.

Iz slike 5.1 vidimo, da z večanjem totalne napetosti povečujemo nedrenirano strižno trdnost nezasičenih zemljin. Ko dosežemo 100% stopnjo zasičenosti, pa ni opaznega nadaljnjega povečanja nedrenirane strižne trdnosti. V primeru bolj vlažnih zemljin tudi hitreje zasičimo zemljino. Nedrenirana strižna trdnost je odvisna tudi od začetne sukucije oziroma vlage zemljine.



Slika 5.1: Strižna trdnost v odvisnost od bočnih pritiskov pri IU testih (Taek Oh et al., 2008).
Figure 5.1: Variation of shear strength due to confining pressure for IU (Taek Oh et al., 2008)

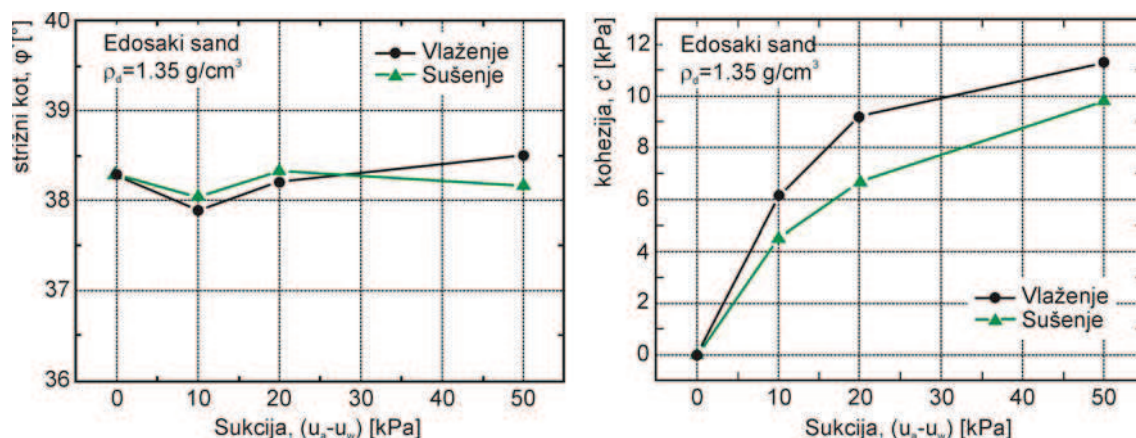


Slika 5.2: Rezultati različnih testnih postopkov na enakih vzorcih (Taek Oh et al., 2008).
Figure 5.2: Test results for different test procedures (Taek Oh et al., 2008).

5.2 Zapis strižne trdnosti s popravkom kohezije

V geotehnični praksi pri vrednotenju strižnih preiskav zapišemo strižno trdnost po enačbi (5.1) ter se ne sprašujemo, kaj je povzročilo kohezijo (sukcija, prekonsolidacija, merska nezanesljivost,...). Na enak način torej lahko vrednotimo tudi strižne preiskave nezasičenih zemljin, kjer namesto sukcije uporabimo kakšen drug parameter stanja zemljine (vlaga, stopnja zasičenja).

Gallage in Uchimura (2010) sta s takšnim principom pokazala, da je strižni kot neodvisen od tega ali se zemljina suši ali vlaži ter da je kohezija pri enaki sukciji večja v primeru vlaženja. Vse meritve sta opravila na peščeni zemljini v direktnem strižnem aparatu. Do enakih rezultatov so prišli tudi Melinda et al. (2004).



Slika 5.3: Vrednosti c in ϕ v odvisnosti od sukcije za primer sušenja ali vlaženja (Gallage in Uchimura, 2010)

Figure 5.3: The influence of suction on c in ϕ for main drying and wetting (Gallage and Uchimura, 2010).

5.3 Popravek efektivne napetosti

Zaradi splošne uporabnosti načela efektivnih napetosti se je zdelo naravno popraviti koncept efektivnih napetosti tako, da bi veljal tudi za nezasičene zemljine. Pri metodi popravka efektivne napetosti popravimo efektivne napetosti tako, da zajemajo vplive sukcije. Materialni parametri zemljine (trdnost, togost) pa ostanejo enaki kot za zasičeno zemljino pri enakem efektivnem napetostnem stanju.

Leta 1958 je bil prvič zapisan popravek efektivne napetosti zaradi vpliva sukcije (Croney et al., 1958), vendar je v mehaniki nezasičene zemljine obveljal Bishopov koncept zapisa (Bishop, 1959) (po Fredlund in Rahardjo, 1993):

$$(\sigma') = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (5.2)$$

Kjer je χ koeficient efektivne napetosti povezan s stopno zasičenosti zemljine.

Parameter χ je enak 1 za zasičene zemljine in enak 0 za suhe zemljine, oziroma zemljine pri rezidualni vlagi. Več avtorjev je predlagalo zvezo med parametrom χ in S_r (Bishop, 1960).

Jennings in Burland (1962) (po Fredlund in Rahardjo, 1993) sta pokazala, da zgornja zveza ne opisuje dobro volumenskih sprememb s spremembami efektivnih napetosti. To velja še zlasti pri nizkih stopnjah zasičenosti. Slednja je okoli 20% za melje in peske ter kar 90% za gline. Pri tem je potrebno omeniti, da je Bishop svoj model naredil za območje na retencijski krivulji, kjer so zvezne zračne in vodne pore. Nekatere izmed nepravilnosti tega modela so dobljene na drugih območjih (na primer v rezidualnem območju) ali za zbite materiale.

5.4 Neodvisni napetostni spremenljivki

Coleman (1962) (po Fredlund in Rahardjo, 1993) je v svoji enačbi za volumenske spremembe uporabil tri neodvisne spremenljivke: totalno sferično napetost $(p - u_a)$, deviator napetosti $(\sigma_1 - \sigma_3)$, matrično sukcijo $(u_a - u_w)$. Morgenstern (1979) je zapisal, da je enačba (5.2) problematična zato, ker naj bi bila omejena samo na ravnovesje sil, parameter χ pa zajema stanje zemljine. Parameter χ lahko dobimo

le tako, da predpostavimo, da je obnašanje zasičene zemljine enako obnašanju nezasičene zemljine pri isti efektivni napetosti. Fredlund in Morgenstern (1977) sta pokazala, da je možno trdnost nezasičenih zemljin opisati z dvema od treh spremenljivk: $(\sigma - u_a)$, $(u_a - u_w)$ ali $(\sigma - u_w)$. Z načelom neodvisnih napetostnih spremenljivk lahko Mohr-Coulomb-ov kriterij porušitve zapišemo kot:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi^a + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (5.3)$$

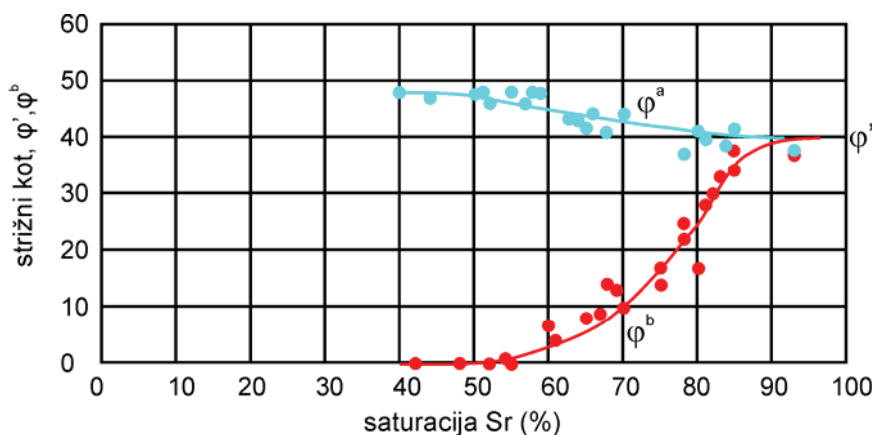
Kjer je φ^b strižni kot povezan s prirastom sukucije, φ^a strižni kot povezan s prirastom totalnih napetosti.

Houston et al. (2008) poročajo, da so različni avtorji opisali odvisnost φ^b od sukucije že na 16 načinov, sami pa so predlagali že 17. model – hiperbolično zvezo. Najbolj množično uporabljen opis odvisnosti φ^b od sukucije je preko normalizirane volumetrične vlage v obliki (Fredlund, (1995) po Fredlund et al., 1996):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \Theta^{\kappa_{ss}} \tan \varphi' \quad (5.4)$$

Kjer je κ_{ss} parameter, ki upošteva nelinearnost med površino in volumnom vode.

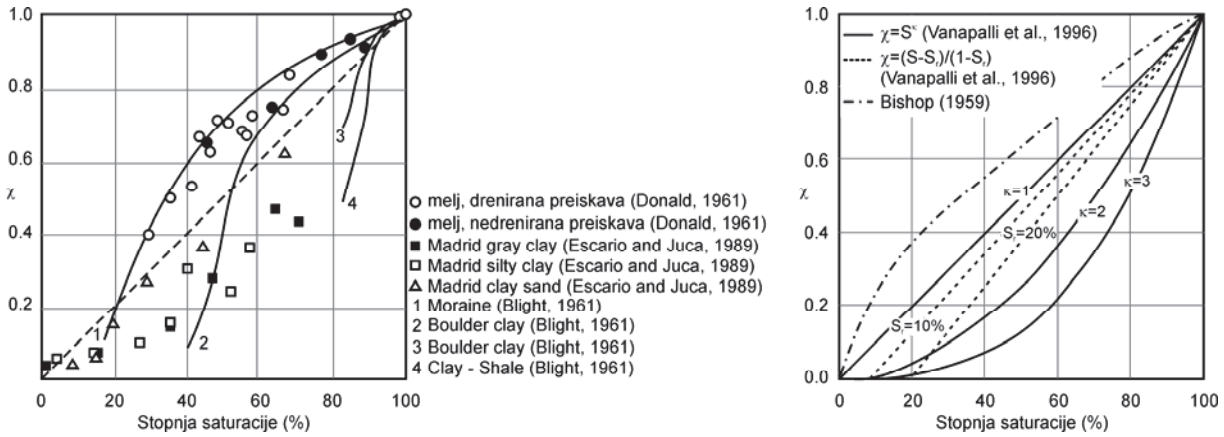
Enačba (5.4) je sicer identična enačbi (5.2), če parameter χ nadomestimo z $\Theta^{\kappa_{ss}}$



Slika 5.4: Vrednosti φ' , φ^a in φ^b za nezasičene zemljine (Toll, 2000; cit. po Petkovšek, 2006).
Figure 5.4: The φ' , φ^a and φ^b values for unsaturated soil (Toll, 2000; cit. after Petkovšek, 2006).

Vanapalli in Fredlund (2000) sta izvedla primerjave med merjenimi in napovedanimi vrednostmi strižne trdnosti nezasičenih zemljin z uporabo štirih različnih zvez. V analizi sta uporabila eksperimentalne podatke, določene na treh vrstah zemljin. Ugotovila sta, da dajeta naslednji zvezi dobre rezultate:

$$\begin{aligned} \chi &= \Theta^{\kappa_{ss}} \\ \chi &= Sr^{\kappa_{ss}} \end{aligned} \quad (5.5)$$



Slika 5.5: Koeficient efektivne napetosti glede na prejšnja eksperimentalna in teoretična dela (levo) in eksperimentalno potrjene zveze (desno) (Vanapalli in Fredlund, 2000).

Figure 5.5: Coefficient of effective stress after some previous experimental and theoretical results (left) and experimentally validated forms proposed (right) (Vanapalli and Fredlund, 2000).

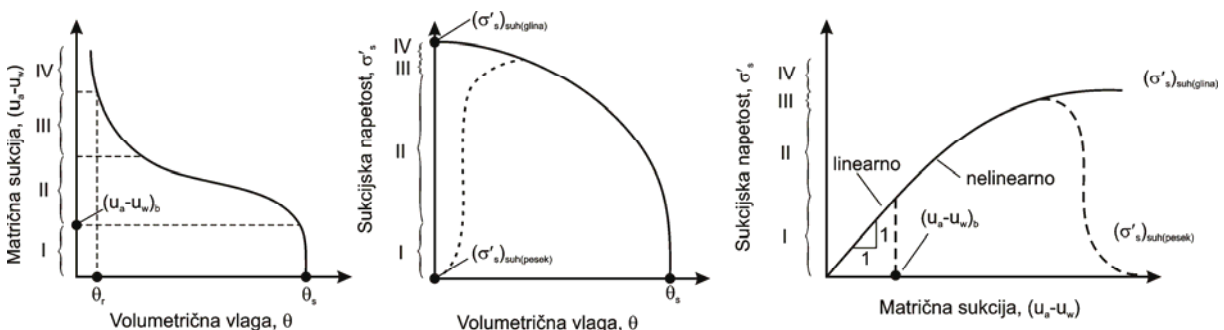
5.5 Sukcijska napetost

Napetost med zrnji v nezasičeni zemljini je posledica različnih (medmolekulskih) sil, opisanih v tretjem poglavju, zato jo težko zapišemo s poenostavljeno formulo oziroma niti ne vemo katere sile povzročijo sukucijo. Lu in Likos (2006) sta predlagala, da se enostavno vpelje nova napetostna spremenljivka – sukcijska napetost. Strižno trdnost zemljine lahko tako zapišemo kot:

$$\tau = \sigma'_s \left((u_a - u_w) \right) \tan \varphi' + \sigma'_n \tan \varphi' + c' \quad (5.6)$$

Kjer je σ'_s sukcijska napetost.

Pri tem sta retencijsko krivuljo razdelila na 4 območja. Območje kapilarne zasičenosti, desaturacijsko območje, prehodno območje in območje adsorpcijsko vezane vode. Pri tem sta domnevala, da v primerih peskov zaradi velikih razdalj med zrnji z upadom sukucije upade tudi sukcijska napetost, v primeru glin pa ne, saj so razdalje med zrnji manjše in prevladujejo van der Waalsove sile. Za vsako zemljino lahko tako izrišemo karakteristično krivuljo za sukcijsko napetost



Slika 5.6: Zveza med sukcijsko napetostjo in volumetrično vlago ter sukucijo (Lu in Likos, 2006).

Figure 5.6: Relationship between suction stress and volumetric water content and suction (Lu and Likos, 2006).

Potrebno je priznati, da takšen pristop ni nov, saj je podobnega značaja tudi popravek strižne premice kot posledica različno velike kohezije Peterson (1988) (citirano po Fredlund et al., 1996):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + C_\psi \quad (5.7)$$

Kjer je C_ψ navidezna kohezija zemljine zaradi vpliva sukucije.

5.6 Natezna trdnost zemljine

Vpliv sukucije na trdnost zemljine bi lahko opisali tudi kot natezno trdnost zemljine. Natezna trdnost zemljine je namreč popravek izhodišča strižne premice, podobno kakor sukucijska napetost. Iz slike 4.1 vidimo, da obstajajo 3 značilna območja retencijske krivulje, vsako s svojim sistemom vezanja vode. V odvisnosti od sistema vezanja vode pa so tudi odvisne formule za izračun natezne trdnosti zemljine, ki veljajo samo za peske.

V območju kapilarne zasičenosti lahko natezno trdnost ocenimo po enačbi Kima (2001) ali Schuberta (1984):

$$\sigma_a = Sr(u_a - u_w) \quad (5.8)$$

$$\sigma_a = Sr a \frac{1}{e} \frac{T_s}{d} \quad (5.9)$$

Kjer je σ_a natezna trdnost kapilarnega območja, d srednji premer zrn, a oblikovni parameter (6-8 za enoznate peske, 1.5-14.5 za ostale peske).

V območju rezidualne vlage se lahko natezno trdnost peskov izračuna po enačbah, ki jih podajajo Lu et al. (2007) ali po enačbah, ki jih podajata Cho in Santamarina (2001). Po Cho in Santamarina (2001) lahko izračunamo natezno trdnost okroglih zrn v kubični razporeditvi kot:

$$\sigma_f = \frac{\pi T_s}{8d} \left[2 - \left(\frac{8}{9} G_s w \right)^{1/4} \right] \quad (5.10)$$

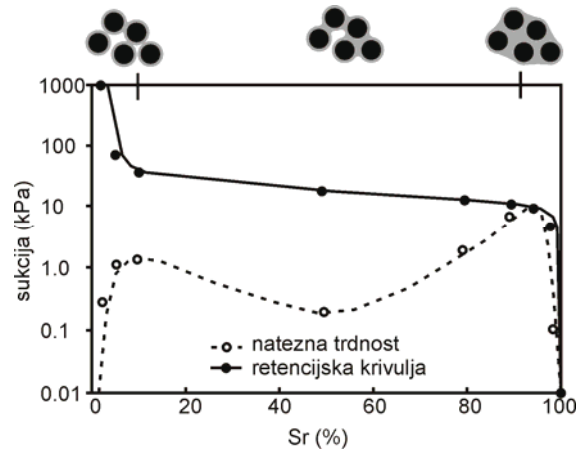
Kjer je σ_f natezna trdnost območja rezidualne vlage.

Po naslednji zvezi pa lahko izračunamo natezno trdnost zemljine v območju desaturacije (Schubert, 1975):

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_f \quad (5.11)$$

Kjer je σ_t natezna trdnost zemljine v območju desaturacije.

V članku Lu et al. (2007) je prikazano dobro ujemanje med izračunano natezno trdnostjo zemljine in eksperimentalnimi meritvami, nasprotno pa je Goulding (2006) dobil močno podcenjene vrednosti iz matematičnega modela glede na izmerjene vrednosti.



Slika 5.7: Natezna trdnost v odvisnosti od stopnje zasičenosti (Lu et al., 2007).
Figure 5.7: Relationship between tensile strength and saturation (Lu et al., 2007).

6 KRČITVENE RAZPOKE

V poglavju bomo opisali vzroke za nastanek krčitvenih razpok, oceno njihove globine in posledico na napetostno stanje v zemljini. Našemu opisu nastanka krčitvenih razpok je zelo podoben primer konsolidacije in sušenja muljastih lagun (Znidarčič, 2007).

Krčitvene razpoke na horizontalnih tleh nastanejo, ko je totalna horizontalna napetost enaka natezni trdnosti zemljine. Privzamemo lahko, da je natezna trdnost zemljine enaka 0. Vzemimo za primer, da imamo zemljino na globini h in vodo na globini h_w . Izračunamo lahko totalne in efektivne napetosti za stacionarno stanje brez toka vode.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_v = h\gamma \\ \sigma_1' &= \sigma_v - u_w = h\gamma - (h - h_w)\gamma_w \\ \sigma_3' &= K_0\sigma_1' = K_0(\sigma_v - u_w) \\ \sigma_3 &= \sigma_h = \sigma_3' + u_w = K_0\sigma_v + (1 - K_0)u_w\end{aligned}\tag{6.1}$$

Kjer je σ_v totalna vertikalna napetost, σ_h totalna horizontalna napetost, K_0 koeficient mirnega zemeljskega pritiska, h globina, h_w globina podzemne vode.

Iz enačbe vidimo, da v kolikor je tlak vode večji od nič, imamo vedno pozitivne horizontalne napetosti. V kolikor pa je tlak vode negativen, oziroma imamo v zemljini sukucijo, pa lahko pride do negativne totalne horizontalne napetosti. Če natezne trdnosti zemljine ni, zemljina počni in nastanejo krčitvene razpoke. Pogoji za nastanek krčitvenih razpok lahko zapišemo kot:

$$u_w = -\sigma_v \frac{K_0}{1 - K_0}\tag{6.2}$$

V kolikor pa zemljina ni 100% zasičena, pa moramo u_w popraviti za vpliv sušenja.

$$\chi(u_a - u_w) = -(\sigma_v - u_a) \frac{K_0}{1 - K_0}\tag{6.3}$$

Do podobne zveze so prišli tudi Schubert (1975) in Kim (2001), ki so delali čisti natezni preskus zemljine. Slednji so zapisali napetost potrebno za pretrg zemljine σ_t v kapilarnem območju kot:

$$\sigma_t = Sr(u_a - u_w)\tag{6.4}$$

Zgornja enačba velja za območje kapilarnega zasičenja. Z zmanjševanjem stopnje zasičenosti zemljina preide v območje desaturacije in območje rezidualne vlage, ki pa imata drugačne izraze za izračun natezne trdnosti zemljine (peska).

Pri sukuciji večji od tiste, ki povzroči krčitvene razpoke, moramo zagotavljati pogoj nične horizontalne napetosti (robni pogoj). V takšnem slučaju popravimo zapis efektivnih napetosti na:

$$\sigma_3' = -u_w\tag{6.5}$$

Za boljše razumevanje pa bomo izrisali spreminjanje efektivnih in totalnih napetosti v odvisnosti od tlaka vode v p-q prostoru.

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) = \frac{1}{3}((1 + 2K_0)\sigma_v + 2(1 - K_0)u_w) = p' + u_w$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3') = \frac{1}{3}(1 + 2K_0)(\sigma_v - u_w) \quad (6.6)$$

$$q = q' = (\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1' - \sigma_3') = (1 - K_0)(\sigma_v - u_w)$$

Če predpostavimo, da je σ_v konstanta, lahko zapišemo enačbi spreminjanja totalnih in efektivnih napetosti od tlaka vode. Odvisnost efektivnih napetosti od višine vode podaja naslednja enačba:

$$q' = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0} p' \quad (6.7)$$

Odvisnost totalnih napetosti od višine vode pa podaja naslednja enačba:

$$q = -\frac{3}{2}(\sigma_v - p) \quad (6.8)$$

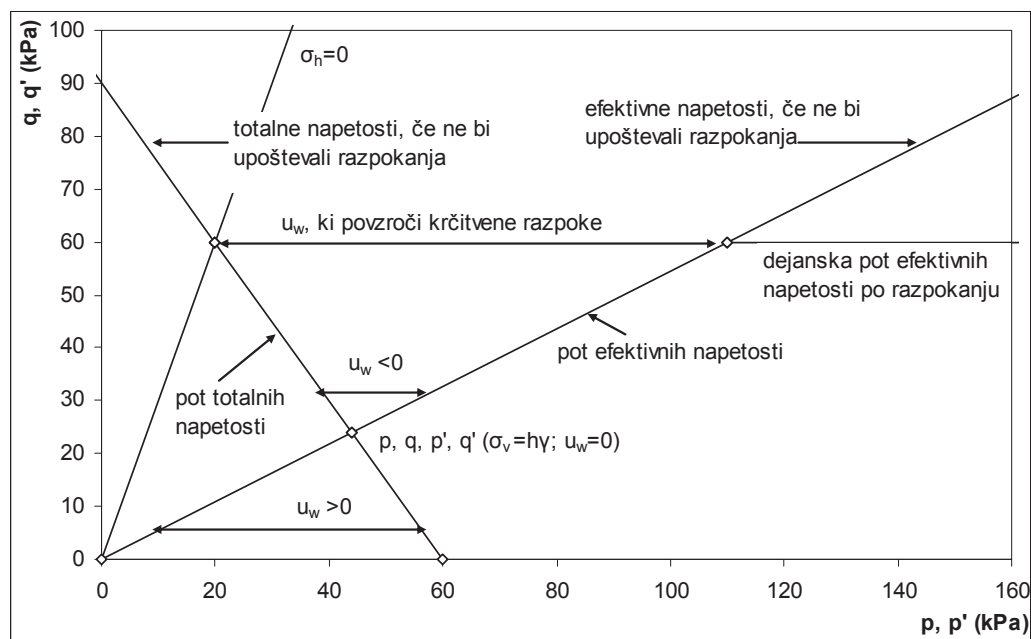
Izhodišče premic je v točki, definirani z začetnimi pogoji.

Po pojavu krčitvenih razpok je totalna horizontalna napetost enaka nič, za totalno vertikalno napetost pa smo predpostavili, da je konstantna. Linija totalnih napetosti se tako ne nadaljuje ampak se zaključi v točki, kjer so se pojavile krčitvene razpoke. Linija efektivnih napetosti pa se nadaljuje po naslednjih enačbah:

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3') = \frac{1}{3}(\sigma_v - 3u_w) \quad (6.9)$$

$$q' = (\sigma_1' - \sigma_3') = \sigma_v$$

Spreminjanje p , p' in q v odvisnosti od tlaka vode prikazuje slika 6.1.



Slika 6.1: Pot totalnih in efektivnih napetosti pri spreminjanju tlaka vode.

Figure 6.1: Total and effective stress paths in respect to water pressure.

7 VPLIV SUKUCIJE NA PREPUSTNOST ZEMLJINE

Zemljine so sestavljene iz treh faz: trdnine, vode in zraka. V zemljini s strukturo se trdnina ne more gibati, voda in zrak pa se gibljeta iz mest z višjim potencialom na mesta z nižjim potencialom. V zasičeni zemljini ali skoraj zasičeni zemljini (slika 4.1) je ves zrak prisoten v obliki zračnih mehurčkov in se ne more gibati. Nasprotno pa je v zemljini, ki ima vlago manjšo od rezidualne (glej sliko 4.1), vsa voda vezana na površino zrn ali pa le okoli stikov posameznih zrn in ne tvori povezane celote. V tem primeru se voda lahko giblje le kot difuzija vodne pare in ne kot tok vode. Obratno velja za gibanje zraka v zemljini, kar je predvsem pomembno v območju rezidualne vlage.

Voda, zrak in vodna para se v zemljini gibljejo zaradi razlik v potencialih (poglavje 3). Vedno se gibljejo iz mest z višjimi potenciali proti mestom z nižjimi potenciali. Hitrost gibanja pogojuje prepustnost in gradient potencialov.

7.1 Vodoprepustnost zasičenih zemljin

Hitrost gibanje vode v zasičeni zemljini opisuje Darcyev zakon (1856):

$$v = \frac{K}{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7.1)$$

Kjer je v navidezna hitrost vode, K absolutna prepustnost, η absolutna dinamična viskoznosti vode.

Darcyev zakon je v geotehniki bolj znan v naslednji obliki:

$$v = k_s i = k_s \frac{\partial H}{\partial x} \quad (7.2)$$

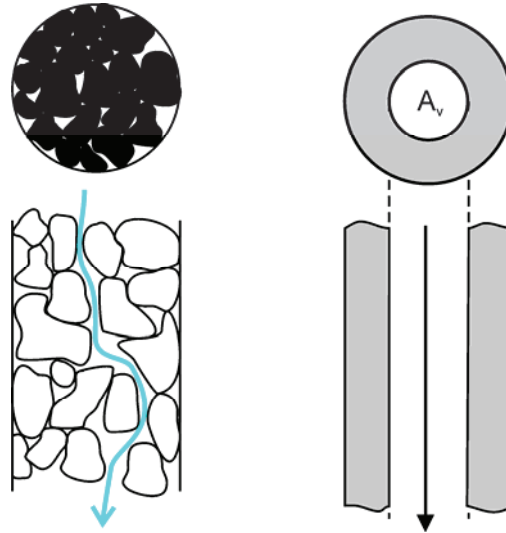
Kjer je i hidravlični gradient, H hidravlični potencial, k_s vodoprepustnost zasičene zemljine.

Takšen model je poenostavljen, saj predpostavlja, da je hitrost vode neodvisna od poroznosti zemljine, ter da je pot delca vode enaka razliki dolžin. Hitrost toka vode v zemljini je v resnici večja od tiste dobljene iz Darcyjevega zakona. Če zanemarimo vijugavost por, dobimo povprečno hitrost vode (v_s) (slika 7.1) Dejanska pot vode ni enaka dolžini zemljine ampak je daljša, saj vodne molekule potujejo okoli zrn. Velikost podaljšanja poti opišemo z vijugavostjo (tortuoznostjo).

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (7.3)$$

$$\tau = \frac{S}{L} \quad (7.4)$$

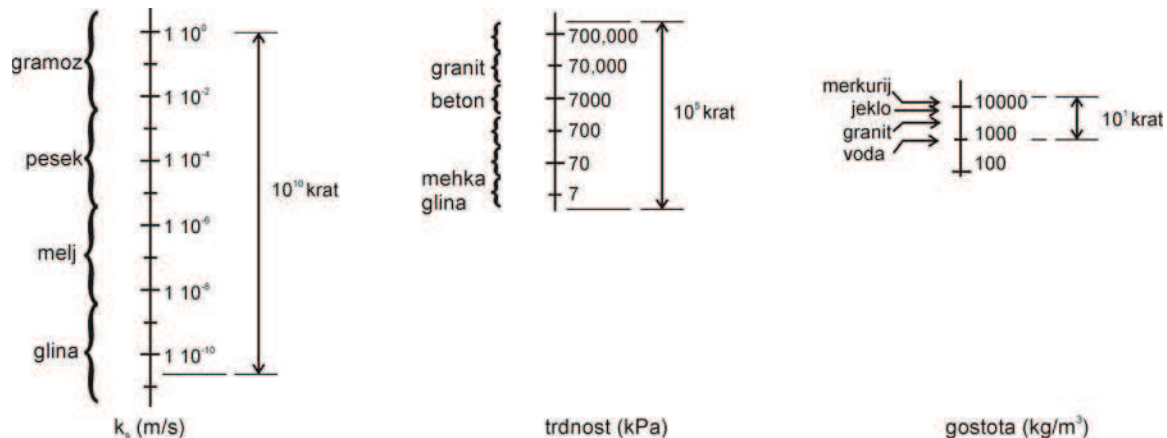
kjer je τ vijugavost, S dejanska pot, L razdalja, n poroznost.



Slika 7.1: Hitrost vode v zemljini je večja od tiste, določene po Darcyju, zaradi poroznosti in vijugavosti (Reddi, 2003).

Figure 7.1: Water velocity is increased by porosity and tortuosity (Reddi, 2003).

Vodoprepustnost je pomembna materialna količina, ki pove kako rada zemljine prepušča vodo oziroma kakšen upor nudi vodi pri njenem toku skozi zemljino. Pogosto pozabljamo, da je vodoprepustnost tudi fizikalna količina, kjer so največje razlike med spodnjo in zgornjo mejo (slika 7.2) ter da je določljiva s slabo natančnostjo.



Slika 7.2: Razlike v posameznih fizikalnih količinah (Cedergren, 1989 po Reddi, 2003).

Figure 7.2: Variability of different engineering properties (Cedergren, 1989 after Reddi, 2003).

Koeficient vodoprepustnosti je močno odvisen od velikosti por. Velikost por pa je odvisna od strukture in gostote zemljine. Dodatno koeficient (vodo)prepustnosti variira še zaradi gostote vode (tekočine) in absolutne dinamične viskoznosti vode (tekočine) (η). Koeficient vodoprepustnosti tako ni enoličen za neko zemljino ampak je odvisen od viskoznosti vode oziroma temperature. Absolutna prepustnost (K) pa je enolična za neko zemljino z neko gostoto in strukturo. Zveza med absolutno prepustnostjo in vodoprepustnostjo je:

$$k_s = \frac{\rho_w g}{\eta} K \quad (7.5)$$

V prejšnjem odstavku omenjeno odvisnost vodoprepustnosti od gostote lahko opišemo z Kozeny-Carmanovim zakonom (Kozeny, 1927, Carman, 1938, 1956).

$$k_s = C_{KC} \frac{\rho_w g}{\mu_w} \frac{e^3}{S_s^2 \rho_s^2 (1+e)} \quad (7.6)$$

Kjer je C_{KC} oblikovni koeficient enačbe (0.2-0.5), S_s specifična površina zrn (eksterna).

Relacijo vodoprepustnost-gostota (količnik por) lahko opišemo tudi z eksponentno funkcijo (Taylor, 1948, Michaels in Lin, 1954). Tako obnašanje je bolj značilno za glinene materiale.

$$\log(k_s) = a_k \cdot e + b_k \quad (7.7)$$

Kjer sta a_k , b_k oblikovna parametra funkcije vodoprepustnost- količnik por, e količnik por

7.2 Vodoprepustnost nezasičenih zemljin

V nezasičeni zemljini zrak preprečuje tok vode, podobno kot bi ga preprečeval tudi trdni delec. Zato lahko upoštevamo nezasičeno zemljino kot zasičeno zemljino, a pri večji gostoti (Childs, 1969). Če pa zemljine ne popravimo na navidezno večjo gostoto, moramo koeficient vodoprepustnosti zapisati kot funkcijo gostote in stopnjo zasičenosti. Tako lahko vodoprepustnost nezasičene zemljine zapišemo v odvisnosti od e in Sr ali e in w ali w in Sr (Lloret in Alonso, 1980), ali katere druge količine (npr. sukucije). Ker je bila večina meritev vodoprepustnosti nezasičenih zemljin opravljena na peskih, se je vpliv sukucije na spremembo gostote in posledično na vodoprepustnost zanemaril. Podobno kakor pri vplivu sukucije na efektivne napetosti lahko tudi vodoprepustnost zemljine zapišemo na različne načine. Najbolj pogosto uporabimo zapis vodoprepustnosti v odvisnosti od stopnje zasičenosti ali normalizirane volumetrične vlage. Enačbe za opis vodoprepustnosti so empirične narave ali pa teoretično izpeljane glede na predpostavljeno razporeditev por.

Gardner (1958) je zapisal eno prvih zvez za vodoprepustnost nezasičenih zemljin. Relativno vodoprepustnost je izrazil s sukucijo zemljine.

$$Kr = e^{(-\alpha_G(u_a - u_w))} \quad (7.8)$$

Kjer je Kr relativna vodoprepustnost (razmerje med vodoprepustnostjo nezasičene zemljine in zasičene zemljine), α_G oblikovni parameter.

Brooks in Corey (1964) sta predlagala zvezo med vodoprepustnostjo in efektivno stopnjo zasičenosti:

$$Kr = \min(S e^{\delta_{BC}}; 1) \quad (7.9)$$

Kjer je δ_{BC} oblikovni parameter.

Oblikovni parameter δ_{BC} je povezan z retencijsko krivuljo preko zveze:

$$\delta_{BC} = \frac{2 + 3\lambda_{BC}}{\lambda_{BC}} \quad (7.10)$$

Kjer je λ_{BC} oblikovni parameter retencijske krivulje Brooks in Coreya (1964).

Ker je stopnja zasičenosti vzorca odvisna od sukije, se da vodoprepustnost enostavno zapisati tudi z vpeljavo retencijske krivulje. Če v enačbo (7.9) vstavimo enačbo (4.3), dobimo:

$$Kr = \min \left[\left(\frac{\alpha_{BC}}{(u_a - u_w)} \right)^{2+3\lambda} ; 1 \right] \quad (7.11)$$

Burdine (1953) je izraz za vodoprepustnost zasičene zemljine zapisal s pomočjo razporeditve por:

$$k = 0.126n \sum_{i=0}^n \frac{V_i R_i^4}{\tau_i^2 R_i^2} \quad (7.12)$$

Kjer je R_i radij vstopa v poro, V_i volumen pore, τ_i vijugavost, 0,126 faktor pretvorbe enot.

Vodoprepustnost nezasičene zemljine pa lahko zapišemo kot:

$$k_w = 0.126Sr \cdot n \sum_{i=0}^n \frac{V_{wi} R_i^4}{\tau_{wi}^2 R_i^2} \quad (7.13)$$

Kjer je k_w vodoprepustnost nezasičene zemljine, V_{wi} volumen por zapolnjenih z vodo, τ_{wi} vijugavost por zapolnjenih z vodo.

Volumen por zapolnjenih z vodo lahko izrazimo s stopnjo zasičenosti ter dodatno vpeljemo razmerje med vijugavostjo zasičene in nezasičene zemljine (τ_{rwi}). S tem se enačba (7.13) pretvori v naslednjo enačbo:

$$k_w = 0.126 \cdot n \sum_{i=0}^n \tau_{rwi}^2 \frac{V_i R_i^4}{\tau_i^2 R_i^2} \quad (7.14)$$

Edina razlika med izrazom za zasičeno in nezasičeno zemljino je tako konstanta τ_{rwi} . Zanj lahko uporabimo naslednji približek:

$$\tau_{rwi} = Se \quad (7.15)$$

Če enačbo (7.14) delimo z enačbo (7.12) dobimo izraz za relativno vodoprepustnost. Izpeljavo podaja van Genuchten (1980):

$$Kr = Se \frac{\int_0^{Se} \frac{1}{(u_a - u_w)^2} dx}{\int_0^1 \frac{1}{(u_a - u_w)^2} dx} \quad (7.16)$$

Mualem (1976) je predlagal drugačno razporeditev por:

$$Kr = \Theta^{0.5} \left[\frac{\int_0^{\Theta} \frac{1}{(u_a - u_w)^2} dx}{\int_0^1 \frac{1}{(u_a - u_w)^2} dx} \right]^2 \quad (7.17)$$

Assouline (2001)

Vpliv vijugavosti na relativno vodoprepustnost je odvisen od vrste zemljine in tekočine (Assouline, 2001). Mualem (1976) je na podlagi rezultatov dobili eksponent 0,5 (enačba 7.17), Leij et al. (1997) pa 0,74. Burdinova (1953) predpostavka eksponenta 2 pa je popolnoma analitična. V numerični implementaciji se običajno dopušča korekcijo tega eksponenta. Assouline (2001) je predpostavil še bolj preprost model:

$$Kr = \left[\frac{\int_0^{\Theta} \frac{1}{(u_a - u_w)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{(u_a - u_w)} dx} \right]^{\eta_A} \quad (7.18)$$

Kjer je η_A oblikovni parameter modela.

Van Genuchten (1980) je za svojo enačbo retencijske krivulje prav tako izpeljal relativne vodoprepustnosti v odvisnosti od matrične sukucije in sicer za Mualemov (1976) in Burdinov (1953) nastavek. Da bi dobili analitično rešitev, je potrebno upoštevati še določene omejitve glede oblikovnih parametrov.

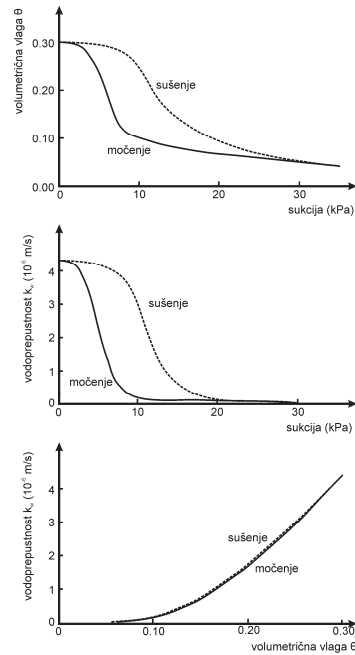
$$Kr = \Theta^{0.5} \left[1 - (1 - \Theta^{-m})^m \right]^2; m = 1 - 1/n, 0 < m < 1 \quad (7.19)$$

$$Kr = \Theta^2 \left[1 - (1 - \Theta^{-m})^m \right]; m = 1 - 2/n, 0 < m < 1, n > 2 \quad (7.20)$$

Podobno lahko izračunamo vodoprepustnost v odvisnosti od retencijske krivulje za vsako podano enačbo retencijske krivulje.

7.2.1 Histerezno obnašanje krivulje vodoprepustnost – sukucija

Retencijska krivulja ima pomembno histerezno obnašanje, prav tako pa ga ima tudi odvisnost vodoprepustnosti od sukucije. V kolikor uporabimo namesto odvisnosti vodoprepustnosti od sukucije odvisnost vodoprepustnosti od vlage, je histerezno obnašanje zanemarljivo (Liakopoulos, 1965, Fredlund in Rahardjo, 1993, Corey, 1977, Assouline, 2001) (slika 7.3).



Slika 7.3: Histerezno obnašanje retencijske krivulje, odvisnost vodoprepustnosti od sukucije in odvisnost vodoprepustnosti od volumetrične vlage (Liakopoulos, 1965).

Figure 7.3: Hysteresis of soil water characteristic curve, relation between water permeability and suction and relation between water permeability and water content (Liakopoulos, 1965).

7.3 Gibanje zraka in vodne pare

7.3.1 Gibanje zraka v zemljini

V zemljini se ne giblje le voda, ampak tudi zrak in vodna para. Gibanje zraka v zemljini lahko opišemo s 1. Fickovim zakonom, ki opisuje difuzijo plinov skozi tekočine.

$$J_a = -D_a \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7.21)$$

Kjer je J_a masni tok zraka, D_a difuzijska konstanta toka zraka skozi zemljino, c koncentracija zraka (kg/m^3).

1. Fickov zakon je zelo podoben Darcyevemu zakonu, vendar moramo upoštevati spremembo gostote zraka, kot posledico spremembe tlaka. Zato 1. Fickov zakon zapišemo v spremenjeni obliki (Blight, 1971):

$$J_a = -D_a^* \frac{\partial u_a}{\partial x} \quad (7.22)$$

$$D_a^* = D_a \frac{\partial [\rho_a (1 - S_r) n]}{\partial u_a}$$

Pogosto tok zraka skozi zemljino zapišemo kar s prepustnostjo za zrak (k_a).

$$k_a = D_a^* g \quad (7.23)$$

Popravljen difuzijska konstanta D_a^* je prav tako kot vodoprepustnost odvisna od stopnje zasičenosti zemljine (Brooks in Corey, 1964). Zaradi razlike viskoznosti zraka in vode ter veljavne zveze (7.5) in (7.1) je pri enakih razlikah tlakov hitrost zraka približno 56 krat večja od hitrosti vode, ravno toliko pa tudi prepustnost za zrak, če tlak izrazimo v metrih vodnega stolpca.

7.3.2 Difuzija zraka skozi vodi

V zemljini se lahko z difuzijo gibljejo ioni in molekule v vodi. Tukaj je predvsem pomembna difuzija zraka skozi porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka.

Za difuzijo zraka skozi kapljevine pri konstantnem tlaku (vode) podajata (Fredlund in Rahardjo, 1993) naslednjo enačbo:

$$v_{fi} = -\frac{Dk_h}{u_{fi}} \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad (7.24)$$

Kjer je: v_{fi} hitrost zraka, u_i delni tlak zraka v kapljevini, u_{fi} absolutni tlak kapljevine, D difuzijska konstanta, k_h volumetrični koeficient topnosti v kapljevini (vodi) (preglednica 2.6).

7.3.3 Difuzija vodne pare

Ko zemljina doseže rezidualno vlago, se suši izključno zaradi difuzije vodne pare v zraku. Difuzijo vodne pare v pornem zraku skozi zemljino lahko zapišemo kot:

$$J_v = -D_v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7.25)$$

Kjer je J_v masni tok vodne pare, D_v difuzijska konstanta toka vodne pare skozi zemljino, c koncentracija vodne pare v zraku (kg/m^3)

Difuzijsko konstanto toka vodne pare skozi zemljino lahko izrazimo z difuzijsko konstanto difuzije vodne pare v zraku:

$$D_v = \tau(1 - Sr)D_{v-a} \quad (7.26)$$

Kjer je D_{v-a} difuzijska konstanta toka vodne pare v zraku.

8 VPLIV SUKUCIJE NA SPREMEMBE VOLUMNA ZEMLJINE

Če se omejimo le na edometriški poskus, opazimo, da se zemljina stiska v kolikor povečujemo napetostno stanje, ter nabreka v kolikor zmanjšujemo napetostno stanje na vzorcu. Dejansko je proces volumenskih sprememb veliko bolj zapleten in ga opisuje mehanika kritičnega stanja. Ker smo že v prejšnjem poglavju omenili, da sukucija povečuje efektivno napetost, lahko pričakujemo krčenje zemljine oziroma pozitivne volumenske deformacije zemljine kot posledico povečanja sukucije. Temu pa ni vedno tako, saj lahko zmanjšanje sukucije, ki bi moralo za posledico imeti povečanje volumna (nabrekanje) dejansko povzroči kolaps zemljine (zmanjšanje volumna). Takšnega obnašanja zemljine ni možno opisati s popravkom efektivne napetosti, ampak ga lahko opišemo le z neodvisnimi napetostnimi spremenljivkami $(\sigma - u_a)$ in $(u_a - u_w)$.

8.1 Modeli za zasičeno zemljino

8.1.1 Cam-clay model za zasičeno zemljino

Med obremenjevanjem v zasičeni zemljini narastejo porni pritiski. Ko se začne zemljina stiskati, se iz nje iztiska voda in porni pritiski se pričnejo manjšati. Temu pojavu pravimo konsolidacija. Schofield in Wroth (1968) obravnavata le primarno konsolidacijo, kjer prevladuje tok vode in ne lezenje zemljine. Ugotovila sta, da se zemljina pri določeni obtežbi stisne le do določenega volumna. Med ponovnim obremenjevanjem in razbremenjevanjem pa tvori histerezno zanko (slika 8.1). Prav tako so ugotovili, da obstaja neka najbolj zunanja krivulja, ki povezuje količnike por ob koncu konsolidacije s pripadajočimi efektivnimi napetostmi, ter da ta relacija tvori premico v kolikor jo izrišemo na grafu količnik por z logaritmom efektivne napetosti. Tej krivulji v primeru izotropne konsolidacije pravimo tudi deviška kompresijska linija. Enačbo za deviško kompresijsko linijo zapišemo kot (Schofield in Wroth, 1968):

$$v = v_c - \lambda \ln \frac{p'}{p'_c} \quad (8.1)$$

Za razbremenilni del ali ponovno obremenitev pa velja poenostavljen izraz, ki ne upošteva histereze:

$$v = v_c - \kappa \ln \frac{p'}{p'_c} \quad (8.2)$$

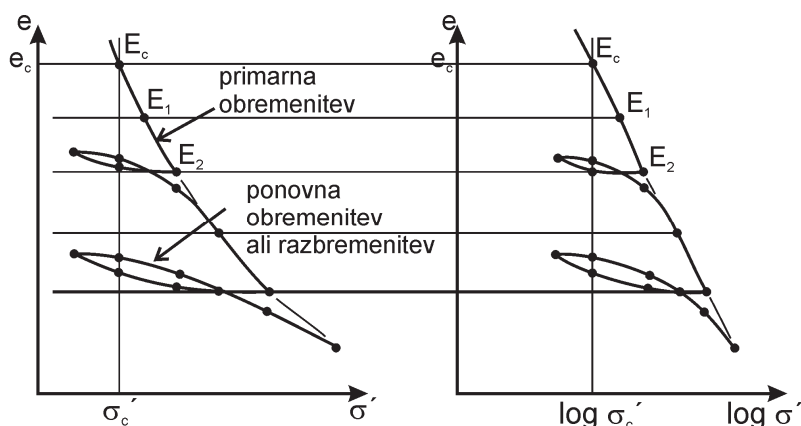
Kjer je λ naklon logaritemske premice deviške kompresijske krivulje, κ naklon logaritemske premice razbremenitve in ponovne obremenitve, v_c specifični volumen pri referenčnem tlaku p_c , v specifični volumen.

Na osnovi triosnih preiskav lahko razdelimo napetost na sferično (p) in deviator napetosti (q).

$$p' = \frac{\sigma'_a + 2\sigma'_r}{3} = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3} - u_w \quad (8.3)$$

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$

Kjer je σ'_a osna napetost, σ'_r radialna napetost.



Slika 8.1: Rezultat edometričnega testa na zemljini (Schofield in Wroth, 1968).

Figure 8.1: Results of oedometer test (Schofield and Wroth, 1968).

Prav tako lahko zapišemo spremembo napetosti p' in q kot spremembo osne napetosti, radialne napetosti ali tlaka vode.

Prirast strižne deformacije ($d\varepsilon_d$) zapišemo kot:

$$d\varepsilon_d = d\varepsilon_a - \frac{1}{3}d\varepsilon_v \quad (8.4)$$

Kjer je $d\varepsilon_a$ prirast osne deformacije, $d\varepsilon_v$ prirast volumenske deformacije.

V kolikor je $d\varepsilon_d$ večji od nič, imamo zmanjšanje dolžine (osno obremenjevanje), v obratnem slučaju pa zmanjšanje premera (bočno obremenjevanje) vzorca v triosni celici.

Med obremenjevanjem lahko zapišemo prirast energije dE , ki se shrani v vzorcu kot posledica prirasta deformacij. Prirast energije lahko razdelimo na elastični in plastični del:

$$\frac{dE}{v} = \frac{dE^e}{v} + \frac{dE^p}{v} = p'd\varepsilon_v^e + qd\varepsilon_d^e + p'd\varepsilon_v^p + qd\varepsilon_d^p = \kappa \frac{dp'}{v} + p'd\varepsilon_v^p + qd\varepsilon_d^p \quad (8.5)$$

Kjer označuje indeks p plastični del, indeks e pa elastični del.

Za stabilnost vzorca je pomembno, da je zmožen disipirati plastično energijo. Spremembo energije kot posledico deformacij v vzorcu lahko opišemo z naslednjo enačbo (enačba modela).

$$\frac{dE^p}{v} = p'd\varepsilon_v^p + qd\varepsilon_d^p = p'd\varepsilon_v + qd\varepsilon_d - \kappa \frac{dp'}{v} = Mp' |d\varepsilon_d| \quad (8.6)$$

Kjer je M konstanta trenja odvisna od vrste testa. Za dreniran test v triosni celici velja:

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \quad (8.7)$$

Pogoj za stabilnost zemljine je pozitivna disipacija energije. Slednjo lahko zapišemo kot:

$$dp'd\varepsilon_v^p + dqd\varepsilon_d \geq 0 \quad (8.8)$$

Stabilnost zemljine lahko zapišemo tudi preko enačbe (8.6) in vpeljave plastične volumenske spremembe, ki ima končno obliko:

$$\frac{dv_{\kappa}}{vd\varepsilon} = \pm M - \frac{q}{p'} \quad (8.9)$$

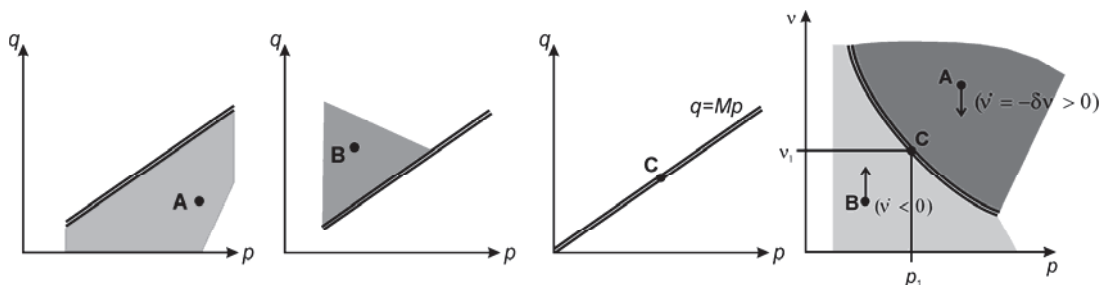
Kjer je v_{κ} specifični volumen pri razbremenitvi na $p'=1$, dv_{κ}/v je plastična volumenska deformacija. M ima pozitivni predznak, če se je vzorec osno obremenjeval in negativni, če je bočno obremenjeval.

Vidimo, da p' in q nastopata v razmerju. Zato ju lahko zapišemo z razmerjem η .

$$\eta = q / p' \quad (8.10)$$

Iz enačbe (8.9) vidimo, da imajo vzorci zemljine tri načine obnašanja (med osnim obremenjevanjem):

- šibki med tečenjem (stiskanje) ($|q|/p' < M$) in $dv_{\kappa} > 0$ (točka A slika 8.2)
- močni med tečenjem (dilatiranje) ($|q|/p' > M$) in $dv_{\kappa} < 0$ (točka B slika 8.2)
- so na črti kritičnega stanja ($|q|/p' = M$) in $v = \Gamma - \lambda \ln p$ (točka C slika 8.2)



Slika 8.2: Stanje vzorca med tečenjem glede na črto kritičnega stanja (Schofield in Wroth, 1968).

Figure 8.2: Condition of specimens at yield in relation to critical states line (Schofield in Wroth, 1968).

Vidimo, da lahko stanje vsakega vzorca opišemo s tremi količinami: v , p' in q . Eksperimentalni dokazi kažejo na samo eno kritično linijo v prostoru v , p' in q . Tej krivulji pravimo črta kritičnega stanja (CSL - critical state line) in jo lahko zapišemo z naslednjima enačbama:

$$q = Mp' \quad (8.11)$$

$$v = \Gamma - \lambda \ln p' \quad (8.12)$$

Kjer je Γ volumen zemljine na črti kritičnega stanja pri $p' = 1$ kPa.

V kolikor smo znotraj meje tečenja (točka IJ slika 8.3), se volumen vzorca giblje po črti definirani z enačbo (8.2). V tem stanju vzorec nima plastičnih volumenskih deformacij temveč samo elastične volumenske deformacije. Prav tako nima prirasta strižnih deformacij ($d\varepsilon_d = 0$).

Ko pa dosežemo ovojnico tečenja, enačba (8.8) pove ali se bo vzorec deformiral stabilno ali ne. Za primer osnega obremenjevanja dobimo pogoj stabilnega tečenja.

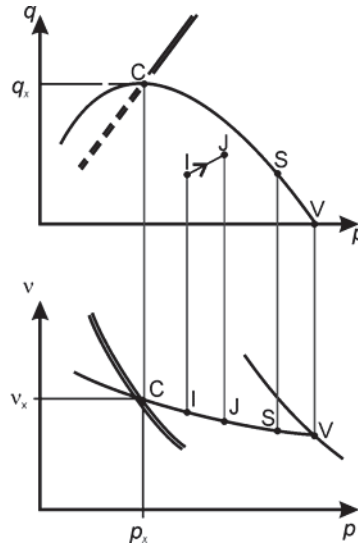
$$(M - \eta)dp' + dq > 0 \quad (8.13)$$

V kolikor prečkamo mejo tečenja, se volumen vzorca od neke točke dalje giblje po enačbi (8.1). Pri tem pride do spremembe v_{κ} (definiran v enačbi 8.9).

Pogoj tečenja lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$\frac{q}{Mp'} + \ln\left(\frac{p'}{p'_x}\right) = 1 \quad (8.14)$$

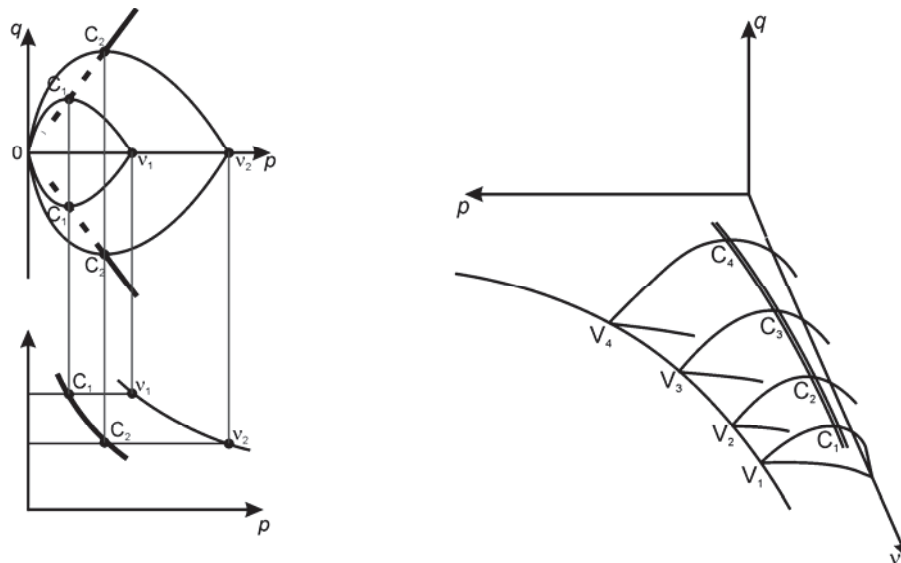
Kjer je p_x p pri maksimalnem q .



Slika 8.3: Elastično obnašanje vzorca in meja tečenja (Schofield in Wroth, 1968).
 Figure 8.3: Elastic behaviour of soil and yield surface (Schofield and Wroth, 1968).

p_x je definiran kot presečišče enačbe (8.14) z enačbo (8.12). Če ta pogoj vstavimo v enačbo (8.14), dobimo funkcijo za mejo tečenja v prostoru v , p' in q :

$$q = \frac{Mp'}{\lambda - \kappa} (\Gamma + \lambda - \kappa - v - \lambda \ln p') \quad (8.15)$$

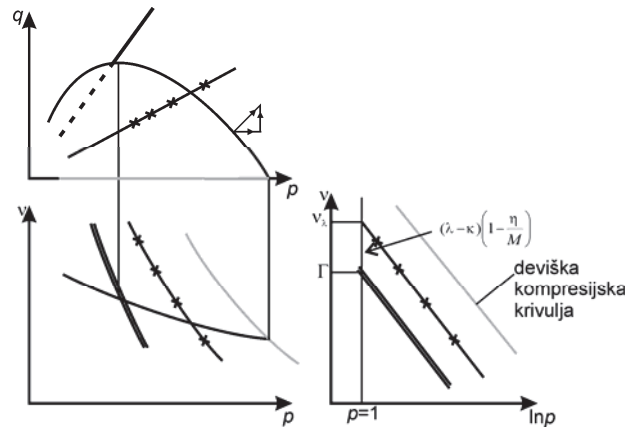


Slika 8.4: Plastifikacija zemljine (levo) in meja tečenja v prostoru v , p' in q (desno) (Schofield in Wroth, 1968).
 Figure 8.4: Plastification of soil (left) and yield surface in v , p' in q space (Schofield and Wroth, 1968).

Če predpostavimo, da imajo zemljine konstanten η ob tečenju, dobimo iz enačbe (8.15) naslednjo enačbo:

$$v_\lambda = v + \lambda \ln p' = (\lambda - \kappa) \left(1 - \frac{\eta}{M}\right) + \Gamma = konst. \quad (8.16)$$

Kjer je v_λ specifični volumen pri $p'=1$ in različnih η . Za različne η je prikazano obnašanje zemljine na sliki 8.5.



Slika 8.5: Plastifikacija zemljine za različna razmerja p/q (Schofield in Wroth, 1968).

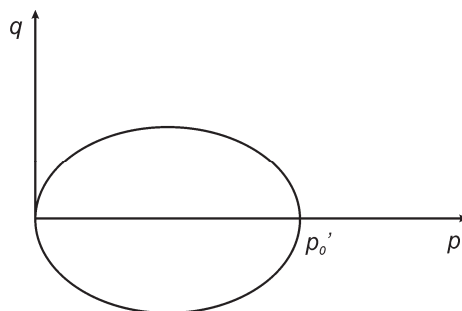
Figure 8.5: Set of specimen yielding at different stress ratio (Schofield and Wroth, 1968).

8.1.2 Modified Cam-clay model za zasičeno zemljino

Za potrebe numeričnega modeliranja zemljine se je prilagodilo ploskev tečenja zemljine iz logaritemske krivulje v elipso (Roscoe in Burland, 1968) (slika 8.6). Popravljen enačba (8.14) se glasi:

$$q^2 + M^2 p'^2 - M^2 p' p_0' = 0 \quad (8.17)$$

Kjer je p_0' prekonsolidacijski tlak.



Slika 8.6: Meja tečenja v prostoru $p' - q$.

Figure 8.6: Yield surface in $p' - q$ space.

Poleg popravljenе funkcije tečenja model vpeljuje še elastične strižne deformacije

$$d\varepsilon_d^e = \frac{1}{3G} dq \quad (8.18)$$

kjer je G razbremenilni strižni modul

8.2 Modeli za nezasičeno zemljino

Bishop (1959) je predstavil obnašanje zemljine v odvisnosti od sprememb efektivne napetosti (enačba (5.2)). Jennings in Burland 1962 sta pokazala, da ni enostavnega modela za vse zemljine, ki bi povezoval spremembo efektivne napetosti z volumenskimi deformacijami v primeru nezasičenih zemljin. To je veljalo še zlasti pri nizkih stopnjah zasičenosti. Ta je okoli 20% za melje in peske ter kar 90% za gline.

Coleman (1962) (citat po Fredlund in Rahardjo, 1993) je razstavil Bishopovo zvezo (1959) na posamezne komponente.

$$-\frac{dV}{V} = -C_{21}(du_w - du_a) + C_{22}(d\sigma_m - du_a) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (8.19)$$

$$-\frac{dV_w}{V} = -C_{11}(du_w - du_a) + C_{12}(d\sigma_m - du_a) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (8.20)$$

Kjer je V volumen zemljine, dV majhna sprememba volumna zemljine, dV_w majhna sprememba volumna vode, C_{ij} parameter zemljine povezan s spremembo volumna, $(du_w - du_a)$ majhna sprememba matrične sukucije, $(d\sigma_m - du_a)$ majhna sprememba sferne napetosti, $(d\sigma_1 - d\sigma_3)$ majhna sprememba deviatorja napetosti.

Prvi izraz govori o spremembi volumna zemljine, drugi pa o spremembi volumna vode v zemljini. Parametri C_{ij} so odvisni od matrične sukucije, p' , q' ter preteklih obtežb, ki jim je bila zemljina podvržena. Po Colemanovi teoriji ima tudi deviator napetosti vpliv na volumenske spremembe zemljine.

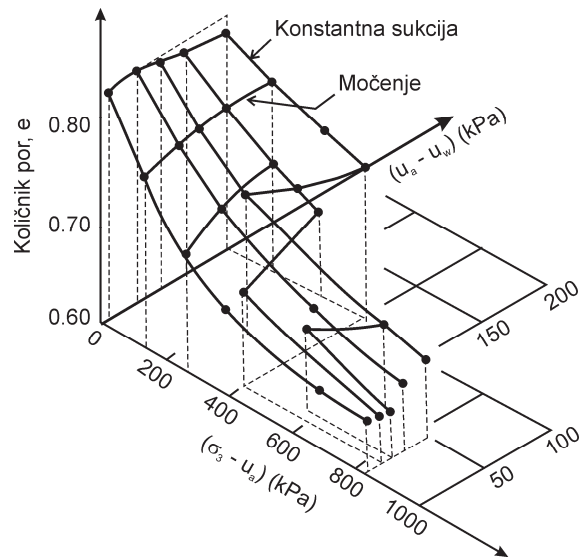
V približno enakem času je več avtorjev prišlo do zaključka, da je potrebno matrično sukucijo in totalno napetost ločiti in obravnavati kot dve neodvisni količini (avtorji citirani v Fredlund in Rahardjo, 1993 in Alonso et al., 1990). Tudi mnogi kasnejši raziskovalci so se držali tega principa. Med njimi sta najbolj znana modela Fredlund in Morgenstern (1976) ter Alonso et al. (1990).

Matyas in Radhakrishna (1968) (citat po Fredlund in Rahardjo, 1993) sta opravila serijo testov na preizkušancih mešanice 80% kremenca in 20% kaolina, zbitih pri enaki vlagi na enako suho gostoto. Za izotropno stanje ($\sigma_1 = \sigma_3$) sta izrisala ploskev volumenskih sprememb v odvisnosti od spremembe sukucije in spremembe sferne napetosti na preizkušancu (slika 8.7). Med nižanjem sukucije je prišlo do kolapsa zemljine, kar kaže na meta stabilno strukturo. Nižanje sukucije bi sicer moralo po Bishopu povzročiti nabrekanje zemljine.

Loret in Alonso (1985) sta opravila serijo testov na nizko plastičnih glinah in peščenih meljih. Pri večini testov je prišlo do zmanjšanja sukucije in nato obremenitve s totalno napetostjo. Na podlagi testov sta predlagala naslednji empirični model:

$$v = a + b \ln \frac{P}{p_c} + c \ln(u_a - u_w) + d \ln \frac{P}{p_c} \ln(u_a - u_w) \quad (8.21)$$

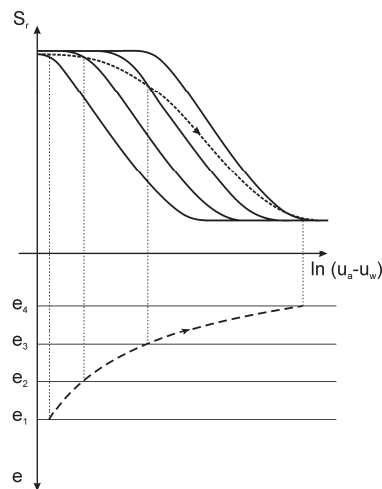
Kjer so a , b , c in d modelni parametri, p_c referenčni tlak.



Slika 8.7: Količnik por e v odvisnosti od sukcije in sferične napetosti v izotropnem stanju (Matyas in Radhakrishna, 1968, citat po Fredlund in Rahardjo, 1993).

Figure 8.7: Void ratio as function of suction and mean stress (Matyas and Radhakrishna, 1968 cited after Fredlund and Rahardjo, 1993).

Ko upoštevamo volumenske spremembe zaradi spremembe sukcije, moramo načeloma upoštevati, da se spreminja retencijska krivulja materiala. Nuth in Laloui (2008) sta predlagala konceptualni model, ki upošteva popravek retencijske krivulje (slika 8.8).



Slika 8.8: Konceptualni model obnašanja stisljive zemljine (Nuth in Laloui, 2008).

Figure 8.8: Conceptual model of soil behaviour (Nuth and Laloui, 2008).

8.2.1 Model obnašanja zemljine Fredlund in Morgensterna (1976)

Fredlund in Morgenstern (1976) sta predlagala empirični model obnašanja zemljine, ki predpostavlja dve neodvisni spremenljivki: $(u_a - u_w)$ in $(\sigma - u_w)$.

Volumenske spremembe nezasičene zemljine lahko zapišemo kot spremembo volumna zraka in spremembo volumna vode.

$$d\varepsilon_v = \frac{dV}{V} = \frac{dV_w}{V} + \frac{dV_a}{V} = d\theta_w + d\theta_a \quad (8.22)$$

Kjer je V volumen zemljine, V_a volumen zraka, V_w volumen vode, θ_w volumetrična vlaga, θ_a volumetrični delež zraka v zemljini.

Deformacije v x smeri lahko zapišemo kot:

$$\varepsilon_x = \frac{(\sigma_x - u_w)}{E_1} - \frac{\nu_1}{E_1}(\sigma_y + \sigma_z - 2u_w) + \frac{(u_a - u_w)}{H_1} \quad (8.23)$$

Kjer je E_1 elastični modul glede na spremembo $(\sigma_x - u_w)$, ν_1 poissonov količnik v smeri x, H_1 elastični modul glede na spremembo $(u_a - u_w)$.

Podobno lahko zapišemo tudi enačbe za y in z smer. Volumetrične deformacije pa lahko zapišemo kot:

$$\varepsilon_v = C_t(\sigma - u_w) - C_a(u_a - u_w) \quad (8.24)$$

kjer lahko za izotropno stanje zapišemo koeficienta C_t in C_a .

$$C_t = 3 \frac{1 - 2\nu_1}{E_1} \quad (8.25)$$

$$C_a = \frac{1}{3H_1} \quad (8.26)$$

Dobiti le volumenske deformacije zemljine ni dovolj. Potrebno je še določiti spremembo volumna vode.

$$\theta_w = \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z - 3u_w)}{3H_1} + \frac{(u_a - u_w)}{R_1} \quad (8.27)$$

Kjer je R_1 modul spremembe količine vode v vzorcu zaradi $(u_a - u_w)$.

Lahko pa zgornje enačbe zapišemo tudi z odvodi, oziroma majhnimi spremembami deformacij $d\varepsilon$, ter tako zapišemo nelinearno obnašanje zemljine.

Za določitev takšnih parametrov je potrebno držati konstantno sukucijo $(u_a - u_w)$ in opazovati odziv glede na spremembo $(\sigma - u_w)$ ter držati konstantno $(\sigma - u_w)$ in opazovati odziv glede na spremembo sukucije $(u_a - u_w)$. Takšen model ni zmožen zajeti obnašanja materiala med vlaženjem in sušenjem (histereza). Prav tako lahko volumenske spremembe zapišemo s katerima koli spremembama volumna izmed sprememb volumna ε_v , θ_w in θ_a , odvisnost spremembe volumna zemljine pa lahko izrazimo s katerima koli dvema količinama izmed $(u_a - u_w)$, $(\sigma - u_w)$ in $(\sigma - u_a)$.

8.2.2 BEM model za obnašanje nezasičenih zemljin

BEM model za obnašanje nezasičenih zemljin (Barcelona expansive model) (Alonso et al., 1990) prevzema dve neodvisni spremenljivki: totalno napetost $(\sigma - u_a)$ in matrično napetost $(u_a - u_w)$. Preko teh dveh spremenljivk opisuje prostor $(e, (\sigma - u_a), (u_a - u_w))$, ki sta ga že nakazala Matyas in Radhakrishna (1968). Enačbe za opis tega prostora so med drugimi že podali Fredlund (1979), Lloret

in Alonso (1980, 1985). Model je narejen za obnašanje peskov, meljev in nizko plastičnih glin, saj privzema, da so zrna inertna.

Podobno kakor modificiran Cam-clay model tudi BEM opiše stiskanje zemljine med obremenjevanjem (enačba (8.1)). Vendar v tem primeru pri konstantni sukciji.

$$v = N(u_a - u_w) - \lambda(u_a - u_w) \ln \frac{p}{p_c} \quad (8.28)$$

Kjer je N specifični volumen zemljine pri $p = p_c$.

Za razbremenilni (elastični) del pa model upošteva, da je parameter κ neodvisen od sukcije (enačba (8.2)).

Obnašanje zemljine v primeru dveh različnih sukcij je prikazano na sliki 8.9. Iz slike vidimo, da ima zemljina z višjo sukcijo višji prekonsolidacijski tlak, kar je skladno z opazovanji. Iz slike prav tako razberemo, da ima vpliv na specifični volumen obremenjevanje zemljine in sprememba sukcije. Nabrekanje, kot posledica upada sukcije, se dogaja v elastičnem območju. Z enačbo lahko to obnašanje zapišemo kot:

$$dv = -\kappa_s \frac{d(u_a - u_w)}{(u_a - u_w) + u_{atm}} \quad (8.29)$$

Kjer je u_{atm} atmosferski tlak (100 kPa) v izogib deljenju z nič.

Če si pogledamo obnašanje pri tlaku p_0 , ugotovimo, da lahko zapišemo naslednjo enačbo za zvezo med prekonsolidacijskima tlakoma.

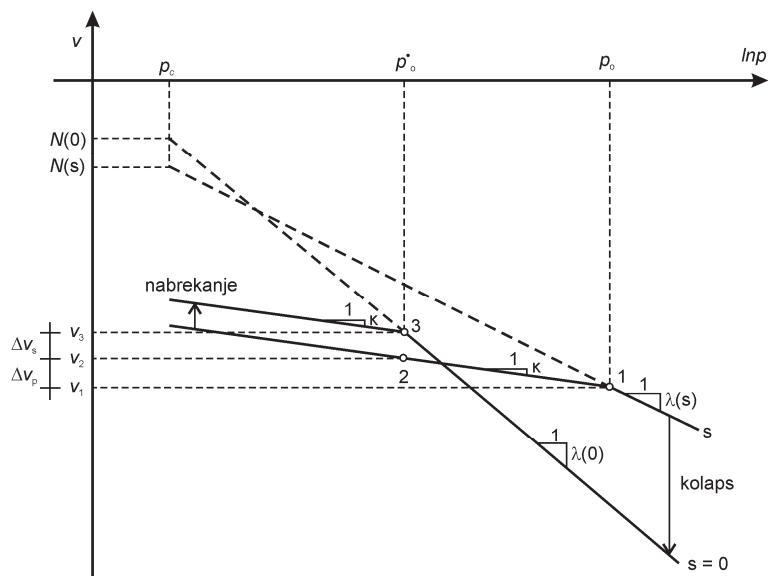
$$\left(\frac{p_0}{p_c} \right) = \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(u_a - u_w) - \kappa}} \quad (8.30)$$

Kjer je p_c referenčni tlak, p_0^* prekonsolidacijski tlak pri sukciji 0 kPa, p_0 poljubni prekonsolidacijski tlak, $\lambda(0)$ naklon krivulje primarnega obremenjevanja pri sukciji 0, λ naklon krivulje primarnega obremenjevanja pri poljubni sukciji, κ naklon krivulje razbremenjevanja.

Če upoštevamo že prej dobljeno empirično zvezo (8.21), lahko parameter $\lambda((u_a - u_w))$ zapišemo v logaritmčni odvisnosti od sukcije. Takšna zveza povečuje togost logaritemsko s sukcijo, kar verjetno ni pravilno za visoke sukcije, kjer bi se togost močno povečala. Predlagan je popravek tega člena, tako da ima asimptoto.

$$\lambda(u_a - u_w) = \lambda(0) \left((1 - r) e^{-\beta(u_a - u_w)} + r \right) \quad (8.31)$$

Kjer sta r razmerje med togostjo zemljine pri visoki sukciji in togostjo zemljine brez sukcije, β parameter, ki kontrolira kako hitro se togost spreminja v odvisnosti od sukcije.



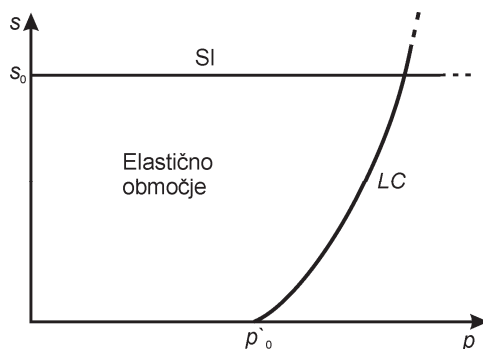
Slika 8.9: Stisljivost zemljine v odvisnosti od sukucije (Alonso et al. 1990).

Figure 8.9: Deformability of soil in respect to soil suction (Alonso et al. 1990).

V kolikor se sukucija povečuje preko neke sukucije $(u_a - u_w)_c$ je zemljina podvržena plastičnim deformacijam zaradi povečanja sukucije. Enačbo za volumenske spremembe na tem območju zapišemo kot:

$$dv = -\lambda_s \frac{d(u_a - u_w)}{(u_a - u_w) + u_{atm}} \quad (8.32)$$

Parameter λ_s predpostavimo kot neodvisen od sukucije, podobno kot smo storili pri enačbi (8.29). Krivulji definirani, z enačbama (8.30) in (8.32), definirata območje elastičnih deformacij (slika 8.10).



Slika 8.10: Meja tečenja z mejama LC – obremenitev-kolaps in SI – povečanje sukucije (Alonso et al., 1990).

Figure 8.10: Yield surface with Loading collapse (LC) and suction increase (SI) and yield curves (Alonso et al., 1990).

Podobno kot pri modificiranem Cam-clay modelu lahko predpostavimo plastične in elastične deformacije. Slednje lahko ob upoštevanju enačbe (8.30) zapišemo kot:

$$d\varepsilon_{vp}^e = \frac{\kappa dp}{v p} \quad (8.33)$$

$$d\varepsilon_{vp}^p = \frac{\lambda(0) - \kappa}{v} \frac{dp_c^*}{p_c^*} \quad (8.34)$$

$$d\varepsilon_{vs}^e = \frac{\kappa_s}{v} \frac{d(u_a - u_w)}{(u_a - u_w) + u_{atm}} \quad (8.35)$$

$$d\varepsilon_{vs}^p = \frac{\lambda_s - \kappa_s}{v} \frac{d(u_a - u_w)_c}{(u_a - u_w)_c + u_{atm}} \quad (8.36)$$

$$d\varepsilon_{dp}^e = \frac{1}{3G} dq \quad (8.37)$$

Kjer spodnji indeks V pomeni volumenske deformacije, d strižne deformacije, p deformacije kot posledica totalnih napetosti, s deformacije kot posledica spremembe sukije ter zgornji indeksi e elastični del deformacije in p plastični del deformacij.

Za spremembe strižnih napetosti (parametra q) model predpostavi poenostavljen Bishopov (1959) model prirasta napetosti. Črta kritičnega stanja (CSL) se tako prestavi v novo izhodišče $-p_s$.

$$-p_s = -k(u_a - u_w) \quad (8.38)$$

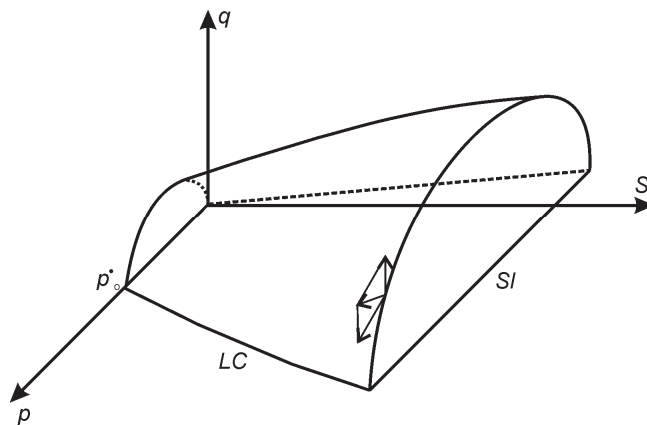
Kjer je k konstanta prirasta natezne trdnosti.

S tem popravkom lahko zapišemo elipso modificiranega Cam-clay modela kot:

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_c - p) = 0 \quad (8.39)$$

Plastično tečenje pa je popravljeno za parameter α , ki prilagodi spodnjo enačbo tako, da pri K_0 testih ni bočnih deformacij.

$$\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s + p_c)} \quad (8.40)$$



Slika 8.11: Tri dimenzionalna ploskev meje tečenja v (p, q, s) prostoru (Alonso et al., 1990).

Figure 8.11: Three dimensional view of the yield surface in (p, q, s) space (Alonso et al., 1990).

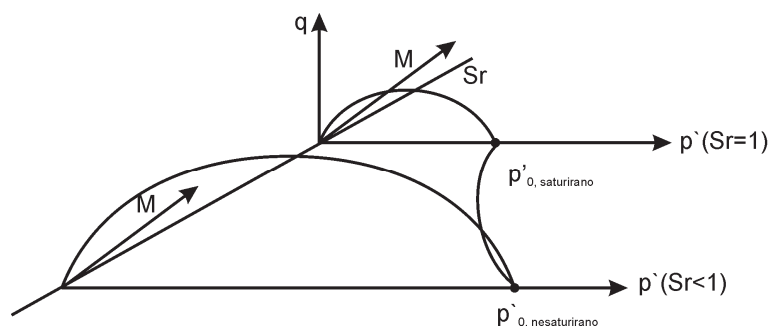
8.2.3 Cam-clay model za nezasičene zemljine

Tamagnini (2004) ter Casini et al. (2007, 2008) so razširili modificirani Cam-clay model na nezasičene zemljine glede na obnašanje zbitega melja za visokovodne nasipe ob reki Pad. Za popravek

efektivne napetosti so upoštevali Bishopovo predpostavko (enačba (5.2)). Prekonsolidacijski tlak pa se je popravil glede na stopnjo zasičenosti v skladu s spodnjo enačbo (8.41). Takšen prekonsolidacijski tlak ima nepovratni del povezan s plastičnimi deformacijami in povratni del povezan s stopnjo zasičenosti. Popravek prekonsolidacijskega tlaka po Casini in sodelavci (2007) je:

$$p_0 = p_{0,sat} e^{b(1-Sr)} \quad (8.41)$$

Kjer je $p_{0,sat}$ prekonsolidacijski tlak zasičene zemljine, b oblikovni parameter.



Slika 8.12: Tri dimenzionalna ploskev meja tečenja v (p' , q , Sr) prostoru (Casini et al., 2007).

Figure 8.12: Three dimensional view of the yield surfaces in (p' , q , Sr) space (Casini et al., 2007).

Specifični volumen je opisan v skladu z enačbo:

$$v = \Gamma(Sr) - \lambda \ln \frac{p}{p_c} \quad (8.42)$$

Kjer je $\Gamma(Sr)$ specifični volumen pri tlaku p_c nezasičene zemljine, ki ga povežemo z obnašanjem zasičene zemljine preko enačbe:

$$\Gamma(Sr) = \Gamma + (\lambda - \kappa)b(1 - Sr) \quad (8.43)$$

Iz enačbe (8.43) sledi, da je linija normalo konsolidirane a nezasičene zemljine pomaknjena preko deviške linije zasičene zemljine.

Za opis stopnje zasičenosti lahko uporabimo poljubno retencijsko krivuljo. Avtorji so uporabili van Genuchtenovo (1980) enačbo za opis retencijske krivulje, ki so ji pripisali dva niza parametrov. Enega za sušenje in drugega za vlaženje. Med obe krivulji pa so napeli krivuljo, ki opisuje histerezno obnašanje. Slednjo lahko zapišemo v diferencialni obliki kot:

$$\theta'_w = -k_s (u_a - u_w)' \quad (8.44)$$

Casini et al. (2007) so upoštevali tudi popravek parametrov van Genuchtenove retencijske krivulje zaradi različne začetne zgoščenosti.

8.3 Zaključek

Pokazali smo modela za opis obnašanja zasičene zemljine, ki so ju avtorji prenesli na model obnašanja nezasičene zemljine. Prav tako smo pokazali zapis modela volumskega obnašanja zemljine

zapisanega v dveh neodvisnih napetostnih spremenljivkah in v primeru Bishopovega popravka efektivnih napetosti.

Če primerjamo ploskvi tečenja BEM modela z modelom za nezasičene zemljine (sliki 8.11 in 8.12) vidimo, da v efektivnih napetostih na gremo čez črto $p'=0$, v totalnih pa lahko gremo čez črto $p=0$. V kolikor bi gledali natezno trdnost zemljine, bi bila ta v efektivnih napetostih enaka 0, v totalnih pa $p_s = k(u_a - u_w)$.

9 MERITVE SUKCIJE

V tem poglavju bomo predstavili principe in metode merjenja sukucije. Merske metode bomo razdelili na tiste, ki merijo sukucijo, in tiste, ki zagotavljajo konstantno sukucijo. Dodatno jih bomo ločili še na neposredne in posredne meritve ter laboratorijske in terenske meritve. Sukucijo je možno meriti neposredno z merjenjem vodnega tlaka. Na sukucijo pa lahko sklepamo tudi posredno preko spreminjanja fizikalnih lastnosti kalibriranega materiala (na primer vlage, električne upornosti, toplotne prevodnosti). Pri neposrednih meritvah sukucije obstajajo različne omejitve; omejitve, ki jih narekujejo fizikalni zakoni - kavitacija vode, vplivi okolja – temperatura, natančnost merske opreme, točka vstopa zraka porozne ploščice, difuzija zraka skozi porozno ploščico, difuzija vode skozi gumijasto membrano, itd. Pri posrednih meritvah pa smo omejeni z natančnostjo merjenja druge fizikalne količine ter natančnostjo kalibracijske krivulje. Pri natančnosti kalibracijske krivulje se moramo zavedati, da imamo naslednje napake: napaka zaradi opisa s kalibracijsko funkcijo, napaka zaradi histereze in napaka zaradi različnosti med serijami kalibriranega materiala oziroma imperfektnosti izdelave. Kalibracijska krivulja oziroma porozni material tudi definira možno območje merjenja sukucije.

Pri vsaki metodi bomo tudi povedali natančnost metode, območje metode in njene prednosti ter slabosti. Pokazali bomo, da običajno ni možno izmeriti sukucije le z eno metodo in je pogosto potrebno poseči po kombinaciji več različnih metod. Pri tem pogosto dobimo različne vrednosti sukucije (Walker et al., 2005), tako da moramo pri vrednotenju retencijskih krivulj tudi dodobra poznati natančnosti in možne napake merskih metod.

Pri opisu metod se bomo posvetili predvsem v tej nalogi uporabljenim metodam merjenja sukucije.

9.1 Neposredne metode

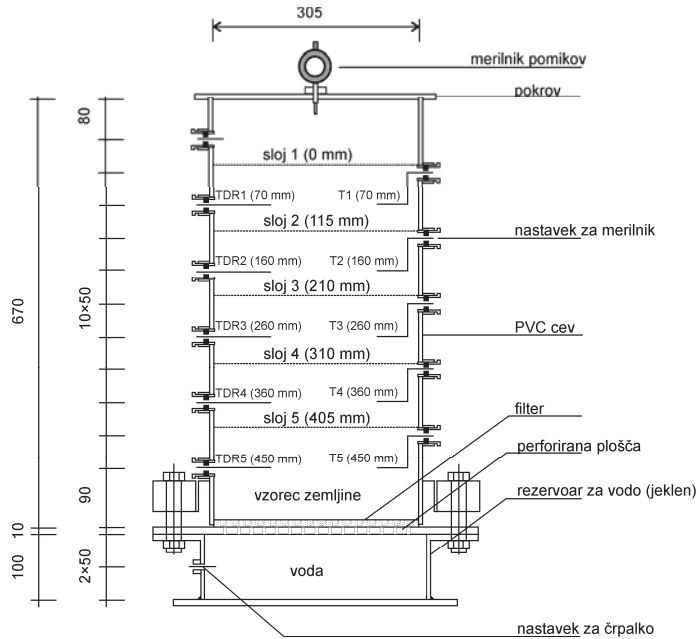
9.1.1 Neposredno merjenje sukucije

9.1.1.1 Peščeni slop

Peščeni slop sestoji iz večjega vzorca peska (višine od 30 do 20 cm, premera približno 10-30 cm). Na spodnji strani je peščen slop potopljen v vodo. Sukucija, ki jo vzorec ima v stacionarnem stanju, je kar enaka višini merske točke nad gladino proste vode. Retencijsko krivuljo izmerimo tako, da izmerimo vlago na točno določenih višinah. V novejših časih uporabljamo elektronske merilnike vlage zemljine (npr. TDR merilnike) ter kontrolne tenziometre. V opisanem primeru izmerimo retencijsko krivuljo v fazi močenja, v kolikor pa peščeni slop predhodno popolnoma zasičimo nato pa znižamo nivo gladine podzemne vode, pa izmerimo retencijsko krivuljo v fazi sušenja. Peščeni slop se lahko kombinira s pršilnikom vode na zgornji strani ali vodnimi črpalkami na spodnji strani. V primeru uporabe pršilnikov vode lahko izmerimo tudi vodoprepustnost nezasičenega peska. V primeru vodnih črpalk pa lahko merimo histerezno obnašanje zemljine. Opis peščenega slopa z vodnimi črpalkami podaja (Lins et al., 2009).

Mersko območje peščenega slopa je omejeno z višino vzorca, natančnost meritev je visoka (do 0,1 kPa), a je potrebna količina materiala za preiskavo velika, čas preiskave pa dolg. Cena naprave je

močno odvisna od vgrajenih merskih naprav. S takšno napravo lahko določimo retencijsko krivuljo in ne sukcije vzorca.

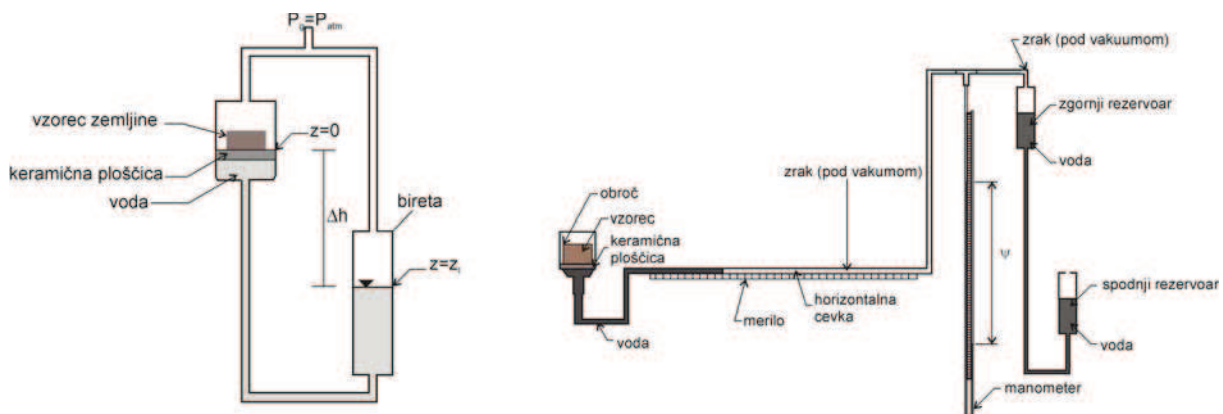


Slika 9.1: Primer peščenega slopa (Lins et al., 2009).

Figure 9.1: Soil column (Lins et al., 2009).

9.1.1.2 Merjenje z večim vodnim stolpcem

Je ena izmed prvih metod za merjenje sukcije zemljine (Buckingham, 1907, Richards, 1928, Haines 1930). Podobno kakor v prejšnji točki tudi v tem primeru merimo sukcijo glede na višinsko razliko med gladino proste vode in točko v vzorcu. Le da v tem primeru na porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka vgradimo manjši vzorec zemljine. Voda iz porozne ploščice je speljana v nižje ležeč rezervoar vode, ki je hkrati tudi merilnik količine izcejene vode (slika 9.2).



Slika 9.2: Primer merjenja sukcije z večim vodnim stolpcem. Levo naprava po Haines (1930), kjer je bilo potrebno višinsko razliko popravljati in desno novejša oblika naprave, ki to odpravlja (ASTM D 6836) (Vanapalli et al., 2008).

Figure 9.2: Negative water column. On the left side device by Haines (1930) where constant corrections of water level were needed and on the right side the new ASTM D 6836 device, where no corrections are needed (Vanapalli et al., 2008)

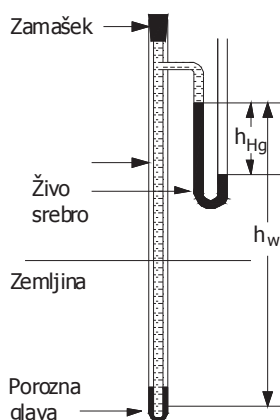
Mersko območje visečega vodnega stolpca je omejeno z višino, ki je med prosto gladino vode in vzorcem (običajno do 2 m). Maksimalna razlika je 85 kPa, saj nato voda kavitira. Natančnost meritev je izredno visoka, saj lahko sukcijo zelo enostavno merimo na 1 mm vodnega stolpca natančno (0,01 kPa). Preiskava je hitrejša kakor v prejšnjem primeru. Takšna naprava omogoča zagotavljanje konstante sukcije, a ne tudi merjenje sukcije vzorca. S takšno napravo lahko izredno natančno izmerimo točko vstopa zraka v zemljino.

Kljub temu, da lahko merimo izredno natančno sukcijo (0,01 kPa) in vlago vzorca (spremembe količine vode na 0,1 g natančno), se moramo zavedati, da merimo povprečno vlago in sukcijo vzorca. Pri merjenju sukcije in vlage predpostavimo, da sta merjeni količini konstantni na vzorcu, zato težimo k čim manjši višini vzorca. Da naprava pravilno deluje, moramo zagotavljati dober stik med zemljino in porozno ploščico. Enako velja za vse neposredne meritve sukcije, kjer sukcijo in vlago povprečimo za celoten vzorec (tenziometer, HYPROP, tlačni lonec, sukcijška triosna celica).

Podrobnosti o takšni napravi najdemo v Vanapalli et al. (2008).

9.1.1.3 Tenziometer

Tenziometri so ena zmed prvih metod za merjenje sukcije Richards (1928). Uporabljajo se za neposredno merjenje sukcije med 0 in 85 kPa na terenu ali v laboratoriju. Delovanje tenziometrov temelji na tem, da je voda nestisljiva tekočina, in da je tlak vode v zemljini enak tlaku vode za porozno kapo tenziometra. Če je v prostoru za porozno kapo tenziometra zračni mehurček, bo ob spremembi sukcije prišlo do spremembe volumna zračnega mehurčka. Takšen tenziometer se bo počasneje odzval na spremembe sukcije, saj bo za vzpostavitev ravnotežja potrebna večja količina pretečene vode skozi kapo tenziometra. V kolikor pa bo zračni mehurček prevelik, pa lahko prekine delovaje tenziometra (prekine tok vode). Pri meritvi sukcije s tenziometrom moramo paziti tudi na spremembo sukcije zaradi višinske razlike med merilcem tlaka in porozno ploščico.

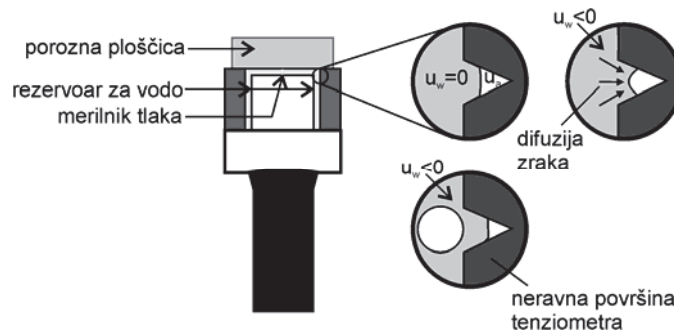


Slika 9.3: Tenziometer s Hg manometrom (Marshall in Holmes, 1988).

Figure 9.3: Tensiometer with Hg manometer (Marshall and Holmes, 1988).

Tenziometer nima merskega območja 100 MPa (glej poglavje 3.2.1), saj se že pred tem zgodi heterogena kavitacija. Površine sten tenziometra niso popolnoma ravne in med polnjenjem se v njih ujamejo vodni mehurčki (slika 9.4). Pri manjšanju tlaka se slednji napihujejo in pri nekem tlaku

odlepijo od stene (kakor mehurčki pri kozarcu šampanjca). To se zgodi najkasneje pri sukciji 100 kPa, realno pa pri 85 kPa.



Slika 9.4: Pojav vodnih mehurčkov v tenziometru (Marinho et al., 2008).
Figure 9.4: Formation of air bubbles in tensiometer (Marinho et al., 2008).

Mersko območje tenziometrov se tako lahko poveča, če preprečimo heterogeno kavitacijo. To lahko dosežemo z uporabo deaerirane destilirane vode, posebnim polnjenjem tenziometra, manjšanjem prostora za porozno kapo, posebnimi materiali za izgradnjo tenziometra, ki so manj podvrženi kavitaciji (ne uporaba elastičnih materialov), gladke površine obdelanih kovin. S takšnimi metodami je možno dvigniti mersko območje do 1500 kPa. Postopek posebnega polnjenja je sledeča: popolnoma suh tenziometer napolnimo pri visokem vakuumu (92 kPa), da imamo ujeta čim manjšo količino zraka, nato pa tenziometer podvržemo visokemu tlaku. S tem po Henryjevem zakonu raztopimo del preostalega zraka. Pri vrnitvi na tlak 0 kPa se del v vodi raztopljenega zraka vrne nazaj v zračni mehurček, del pa izhlapi skozi zunanjo površino vode. Postopek lahko ponavljamo in s tem izboljšamo rezultat. Prvi takšen tenziometer je naredil Ridley (1993), danes pa so nekateri že v splošni uporabi. Najdemo jih pod imenom »high capacity tensiometer« in »suction probe«. Podobne postopke za zagotavljanje dobre zasičenosti in majhne možnosti kavitacije zraka uporabljamo tudi pri drugih sistemih s porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka (tlačni lonec, sukcijška trisočna celica).

Posebna oblika tenziometrov je osmotski tenziometer, kjer imamo v tenziometru raztopino z visoko osmotsko sukcijo. Ta osmotska sukcija pa predstavlja referenčni tlak tenziometra (Fredlund in Rahardjo, 1993).

Problem tenziometrov je, da pogosto ne veš ali imaš dobre ali slabe meritve ter pri kateri sukciji so prenehali delovati. Med zviševanjem sukcije tenziometer v neki točki preneha delovati zaradi kavitacije vode. Pri višji sukciji tenziometer ohranja tlak kavitacije, pri nižjih pa postane odziv nekoliko počasnejši. Da popolnoma uničimo delovanje tenziometra, moramo ali popolnoma sprazniti tenziometer ali pa porušiti neprepustnost porozne kape za zrak (točka vstopa zraka). V kolikor delamo v kontroliranih pogojih, je takšno napačno merjenje dokaj enostavno zaznati. V naravi, ko imamo spremenljive vremenske pogoje, pa temu ni tako. Da to preprečimo, običajno na terenu vgrajujemo pare tenziometrov. Drug problem, ki ga tenziometri imajo, je difuzija zraka skozi porozno ploščico. Ta sčasoma zmanjšuje delovno območje tenziometra.

Tenziometri so namenjeni terenski in laboratorijski rabi, z njimi pa samo merimo sukcijo ne moremo pa je zagotavljati. Natančnost meritev je izredno visoka, saj lahko sukcijo merimo na 0,01 kPa natančno.

Podrobnosti o tenziometrih najdemo v Marinho et al. (2008), Tarantino et al. (2008) in Delage et al. (2008).

Lastnosti tenziometrov lahko prenesemo tudi na druge naprave za neposredno merjenje sukucije.

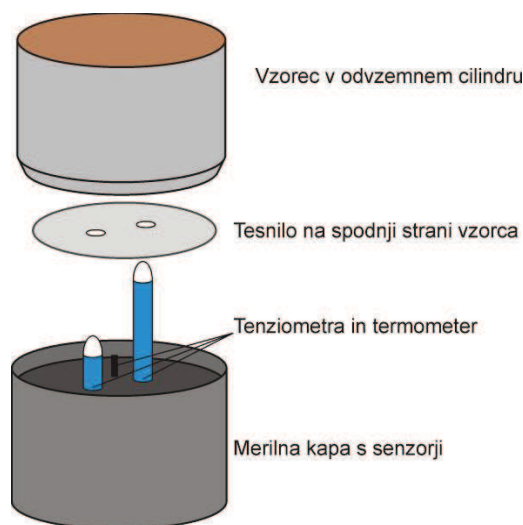
9.1.1.4 HYPROP

Naprava HYPROP sestoji iz dveh miniaturnih natančnih tenziometrov, ki deloma odgovarjata tenziometrom z visoko kapaciteto, in tehtnice. Spodnji tenziometer je vgrajen na $\frac{1}{4}$ višine, zgornji pa na $\frac{3}{4}$ višine vzorca (5 cm). Na spodnjem robu je preizkušanec zemljine zatesnjen, na zgornjem pa je izpostavljen izhlapevanju (evaporaciji). V kolikor je prepustnosti 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. S pomočjo 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 sukucije dobili le s povratnimi analizami. Če pa naredimo določene predpostavke, lahko meritve zelo enostavno ovrednotimo. Te predpostavke so:

- imamo eno dimenzionalen problem,
- sukucija je razporejena linearno z višino,
- vlaga je razporejena linearno z višino,
- sprememba volumna vode in sukucije 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,
- sukucija v sredini vzorca je enaka povprečni sukuciji (oziroma povprečni vrednosti med obema tenziometroma),
- evaporacija med dvema merskima točkama je konstantna, prav tako gradient.



Slika 9.5: Naprava HYPROP.

Figure 9.5: HYPROP device.

Naprava HYPROP je namenjena merjenju retencijske krivulje, vendar ob določenih pogojih z njo izmerimo tudi sukcijo. Prednosti te metode so odlična natančnost meritev (0,01 kPa), veliko število merskih točk med meritvijo retencijske krivulje, dobro določena točka vstopa zraka, potencialno izmerimo še relacijo vodoprepustnost-sukcija. Slabosti metode pa so sorazmerno majhno delovno območje (od 0 do 85, izjemoma do 150-450 kPa) in dolgo trajanje preiskave (7 dni). Prav tako vzorcev ne zasičimo popolnoma, ampak imajo stopnjo zasičenosti pri točki ujetih zračnih mehurčkov. Ob določenih predpostavkah lahko izmerimo sukcijo tudi pri 870 kPa (Schindler et al., 2010)

Podrobnosti o napravi Hyprop najdemo v Schindler in Müller (2006), Peters in Durner (2008) in Schelle et al. (2010).

9.1.2 Osno translacijske meritve – tlačni lonec in sukcijška triosna celica

Problemu kavitacije se izognemo z osno translacijsko tehniko. Osno translacijsko tehniko uporabimo tudi v triosnih testih zasičenih zemljin, kjer z višanjem pritiska porne vode dosežemo ustrezno stopnjo zasičenosti. Podobno lahko v primeru nezasičenih zemljin zvišujemo zračni pritisk ter s tem povečamo razliko tlakov u_a in u_w ne da bi prišlo do kavitacije. Pri tem upoštevamo predpostavko, da sta trdna faza zemljine in voda dovolj nestisljivi. Prvi primeri uporabe osno translacijske tehnike pri meritvah sukcije so opisani v Hilf (1956) in Richards (1931) (citata po Vanapalli et al., 2008).



Slika 9.6: Tlačni lonec.

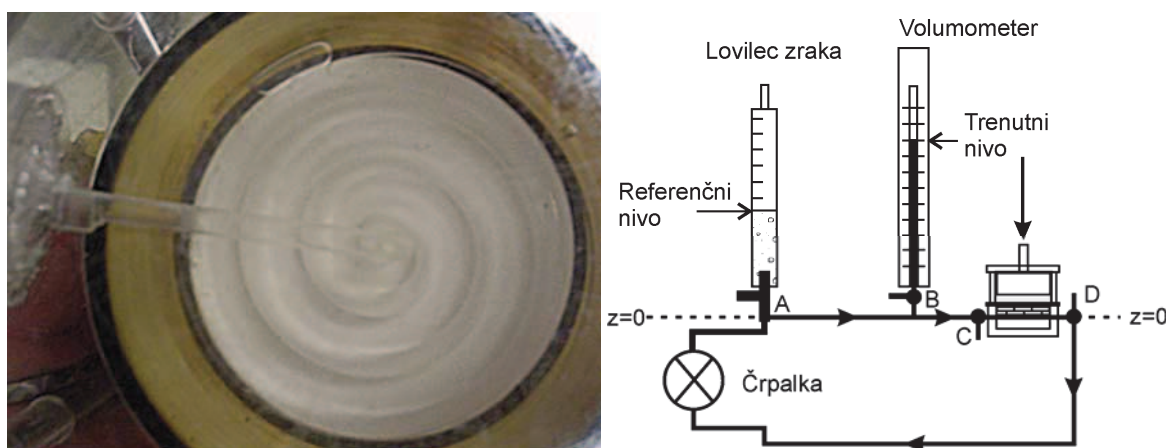
Figure 9.6: Pressure plate apparatus.

Območje merjenja matrične sukcije se poveča do vrednosti, ki jo še dopušča zračni kompresor ali pa točka vstopa zraka porozne ploščice. Običajno pa ne preseže sukcije 1500 kPa. Naprava je podobna napravi za merjenje sukcije z visečim vodnim stolpcem, le da v tem primeru ne znižujemo tlaka vode ampak zvišujemo tlak zraka na vzorec v tlačnem loncu. Za pravilno izvedbo meritev je pomembno, da sta zasičena porozna ploščica in zemljina v stalnem kontaktu. V kolikor se zemljina odlepi od porozne ploščice, se prekine tok vode. Da se to prepreči, se običajno obteži preizkušance.

Obstajata dve vrsti tlačnih loncev oziroma tlačnemu loncu podobnih naprav. V prvi obliki (slika 9.6) imamo v tlačnem loncu več vzorcev, ki jih izpostavimo enaki sukciji oz. enaki razliki tlakov. Ko voda iz porozne ploščice neha odtekati, smo dosegli stacionarno stanje. Hipno spustimo zračni tlak na 0 kPa in razstavimo napravo. Izmerimo vlago posameznega vzorca. Par sukcija, vlaga nam predstavlja točko na retencijski krivulji. Takšna oblika preiskave ima več napak: nimamo nadzora, da so vsi preizkušanci v stacionarnem stanju; ne vemo koliko vlage so se preizkušanci navzeli med razgradnjo, ko smo spustili sukcijo na 0 kPa; ker začnemo iz stopnje zasičenosti pri točki ujetih zračnih mehurčkov, nam pri majhnem zvišanju zračnega tlaka ujeti zračni mehurčki popačijo napetostno stanje; preizkušanci med posameznimi serijami se razlikujejo. Dobra stran take naprave pa je, da lahko hkrati preiskujemo več vzorcev.

V drugi obliki pa preiskujemo en preizkušane s hkratnim spremljanjem količine izcejene vode. Na istem preizkušancu naredimo celotno retencijsko krivuljo, ki je sestavljena iz n bremenskih stopenj – sprememb sukcije (Schelle et al., 2010).

Pri kontinuiranem zagotavljanju sukcije pride do difuzije zraka skozi porozno ploščico in do tvorjenja zračnih mehurčkov na spodnji (vodni) strani (Fickov in Henryjev zakon). Spodnje ploščice imajo zato izdelan polžast kanal, ki omogoča »prepihovanje« prostora pod porozno ploščico. S takšnim sistemom lahko izločimo napako volumna izcejene vode, ki jo predstavljajo zračni mehurčki. Zračni mehurčki v cevkah tudi spreminjajo tlak za zračnim mehurčkom. Difuzijo zraka lahko zmanjšamo, če zvišamo vodni tlak.



Slika 9.7: Preprihovanje difuziranega zraka iz spiralnih kanalov ter primer sistema za preprihovanje porozne ploščice (Vanapalli et al., 2008).

Figure 9.7: Flushing diffused air from spiral groove and a system for flushing diffused air from porous stone (Vanapalli et al., 2008).

Problem prav tako predstavlja vlaga zraka, ki običajno ni takšna, kakršna bi morala biti po Kelvinovi enačbi, ampak je nižja. Izhlapevanje vode iz vzorca v zrak okoli vzorca je lahko dovolj močno, da nikoli ne pride do konstantnih pogojev, ampak do navideznega vlaženja vzorca. Temu nasprotni primer pa je prevlažen zrak (ali zrak z vodnimi kapljicami), ki vlaži vzorec. V tem primeru pride do navideznega sušenja vzorca, ki ga zaznamo kot konstanten tok vode skozi vzorec.

Slabost tlačnih loncev je, da vsaka bremenska stopnja traja vsaj 1 dan. Z višanjem sukcije oziroma manjšanjem vodoprepustnosti vzorca pa se čas trajanja bremenske stopnje povečuje, tudi na 5 dni. Čas

trajanja bremenske stopnje je odvisen tudi od prepustnosti porozne ploščice, ki je vsaj pri nizki sukuciji manj prepustna od zemljine. Čas trajanja preiskave zmanjšamo, če vzorec najprej izpostavimo višji sukuciji za krajši čas, nato pa prekinemo tok vode in počakamo, da se vzorec uravnovesi (Lorentz et al., 1993). S takšnim merjenjem izgubimo možnost merjenja histereze.

Prednost takšne metode je enostavna meritev in jasno delovanje naprave. Naprava ima tudi dobro natančnost (običajno 1 kPa). Čas izdelave retencijske krivulje je tako odvisen od števila bremenskih stopenj. S tlačnim loncem lahko le izdelamo retencijsko krivuljo, ne moramo pa meriti sukucije. Podrobnosti o osno translaciji tehniki najdemo v Vanapalli et al. (2008) in Marinho et al. (2008).

Posebna oblika tlačnega lonca je sukucijska triosna celica, kjer na vzorec v triosni celici dovajamo zračni in vodni tlak preko zgornje in spodnje kape. Pogosto nas v sukucijski triosni celici zanima sprememba volumna vzorca. Če uporabljamo klasično triosno celico, ugotovimo, da imamo preveliko difuzijo preko akrilnega stekla. Difuzijo vode skozi stene triosne celice lahko preprečimo z uporabo drugega materiala, uporabo glicerola namesto vode, uporabo dvoje stene, kjer je notranja narejena iz stekla, ali pa uporabimo druge metode za merjenje volumna vzorca (Hoyos et al., 2009).

9.1.3 Osmotska metoda

Metodo so najprej uporabljali biologi in se je šele nato prenesena v geomehaniko. Vzorec zemljine, zavrt v polprepustno membrano, potopimo v raztopino PEG (polietilen glikol). Velike molekule PEG ne morejo preiti skozi polprepustno membrano, zato se mora totalna sukucija v vzorcu izenačiti s totalno sukucijo raztopine PEG. Koncentracijo PEG raztopine pa predhodno umerimo preko meritev osmotske sukucije z drugimi napravami.

Osmotsko metodo se uporablja takrat ko hočemo povečati območje delovanja sukucijskih triosnih celic in sukucijskih edometrov. Pri osno translacijski metodi so običajno možne sukucije do 500 kPa, pri osmotski sukuciji pa je možno meriti sukucije do 10 MPa.

Osmotske metode ne smemo zamenjati z metodo ekvibracije relativne vlage, saj je pri osmotski metodi vzorec v stiku z vodno raztopino preko polprepustne membrane. Tok vode je podvržen Darcyjevemu zakonu in ne difuziji vodne pare.

Osmotska metoda ima podobne lastnosti kot osno translacijske metode, le da je natančnost metode odvisna od natančnosti poznavanja osmotske sukucije raztopine.

Več o osmotski metodi najdemo v Blatz et al., (2008).

9.2 Posredne meritve

9.2.1 Primarne metode

V primeru primarnih posrednih metod merimo sukucijo preko vlage zraka. Relativna vlaga zraka je namreč odvisna od sukucije zemljine po Kelvinovi enačbi:

$$\psi = \frac{\rho_w RT}{M_w} \ln \left(\frac{p_v}{p_{v0}(T)} \right) \quad (9.1)$$

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.

Kot je razvidno iz zgornje enačbe, vse primarne metode merijo totalno sukcijo.

9.2.1.1 Psihrometri s termočlenom

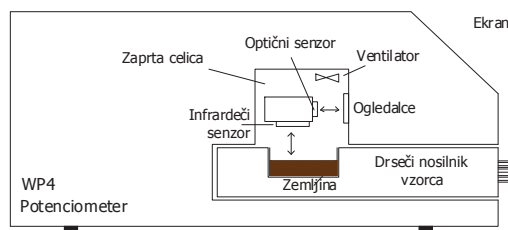
Prve psihrometre so napravili Richards in Ogata (1958) in Spanner (1951). Psihrometer ali merilnik relativne vlage zraka deluje na principu mokrega in suhega termometra (termočlena) ali pa s pomočjo Peltierovega efekta. Pri psihrometru s Peltierovim efektom najprej izmerimo temperaturo suhega termometra. Nato termočlen s pomočjo Peltierovega efekta ohladimo, tako da se na njem kondenzira voda. Počakamo, da se segreje, in izmerimo temperaturo mokrega termočlena. Izkoristimo fizikalni pojav, ki med izhlapevanjem vode ohranja temperaturo termočlena malce nižjo od temperature zraka. Razlika temperature med mokrim in suhim termometrom je funkcija temperature in relativne vlage zraka. Kalibracijo psihrometrov se izvaja z merjenjem napetosti na suhem in mokrem termočlenu ter z znano totalno sukcijo (običajno solna raztopina). Natančnost psihrometra je pogojena z natančnostjo termočlena, tipom termočlena in natančnostjo merjenja napetosti (mV).

Namesto termočlena lahko uporabimo tudi tranzistor (ali termistor) kot merilnik temperature v primeru psihrometra z mokrim in suhim termometrom.

Več o psihrometrih najdemo v Bulut in Leong (2008).

9.2.1.2 Psihrometri z ohlajevanjem zrcalca

Podobno kakor pri psihrometru s Peltierovim efektom tudi tukaj ohlajamo termometer do točke rosišča. V tem tipu psihrometra merimo temperaturo zraka in temperaturo zrcalca, ki ga ohlajamo s termočlenom (s Peltierovim efektom). V trenutku, ko se zrcalce zarosi, kar opazimo kot zmanjšano odbojnost zrcalca, izmerimo temperaturo zrcalca. Takšen tip psihrometra je razvilo podjetje Decagon Devices. Njihov produkt psihrometer WP4-T je danes najbolj razširjen psihrometer. Standard ASTM D6836 predvideva uporabo takšnega psihrometra pri meritvah sukcije nad 1000 kPa.



Slika 9.8: Prerez psihrometra z ohlajevanjem zrcalca (Bulut in Leong, 2008).
Figure 9.8: Cross section of dew point potentiometer (Bulut and Leong, 2008).

Med slabe strani psihrometra WP4-T sodi majhen volumen preizkušanca, kar pa načeloma ne predstavlja problema, saj merimo le visoke sukcije. Takšne sukcije pa nas zanimajo le pri glinenih

zemljinah, kjer velikost posodice ni problematična. Meritev v psihrometru je izredno hitra in natančna ($\pm 1\%$ ali ± 100 kPa), saj odpravlja napake zaradi temperaturnega gradienta (Agus & Schanz, 2007). Traja približno 15 min. Pomembno je poudariti, da psihrometer WP4-T meri totalno sukcijo in ne omogoča zagotavljanja konstantne sukcije.

Delovanje psihrometra WP4-T je opisano v Bulut in Leong (2008) in Campbell et al. (2007).

9.2.2 Sekundarne metode

Pri sekundarnih metodah uporabimo kalibriran porozen material, ki ga vstavimo v zemljino. Ko se porozni material uravnoteži s sukcijo zemljine, mu izmerimo vlago. Preko kalibracijske retencijske krivulje za porozni material lahko posredno sklepamo na sukcijo zemljine.

9.2.2.1 Metoda filter papirja

Metoda filtrskega papirja deluje na principu merjenja vlage kalibriranega filter papirja. Opis metode podaja standard ASTM D5298. Izmed vseh merskih metod le metoda filter papirja omogoča merjenje matrične in totalne sukcije. Matrično sukcijo merimo, če filter papir vstavimo v zemljino, totalno sukcijo pa, če filter papir položimo v prostor nad zemljino (tako da ni v stiku z zemljino).

Metoda dela je dokaj enostavna, vendar je rezultat zelo odvisen od strogega držanja postopka dela (opis v ASTM D5298) in kvalitete kalibracijske funkcije, ki mora biti različna za matrično in totalno sukcijo ter za krivuljo sušenja ali močenja filter papirja. Že majhne nepravilnosti v postopku meritve lahko povzročijo spremembo kalibracijske krivulje (umazanija na filter papirju) ali na spremembo vlage med preiskavo (prepočasno tehtanje filter papirjev). Pri merjenju nizke totalne sukcije povzročijo temperaturne spremembe kondenzacijo vode. To lahko preprečimo tako, da imamo v laboratoriju oziroma merski komori konstantno temperaturo ($\pm 0,1$ °C).

Če rešimo zgoraj naštetih probleme metode filter papirja, je ta metoda relativno dobra ocena sukcije z relativno natančnostjo $\pm 10\%$ (Agus in Schanz, 2007) oziroma $\pm 300\%$ (ASTM D5298). Pri nizkih totalnih sukcijah imamo enak problem kakor pri psihrometrih, saj so napake lahko nekajkrat večje od merjene količine.

Dobra stran metode je možnost merjenja sukcije v širokem razponu med 1 in 100000 kPa (ASTM D5298 50 -30000 kPa, Agus in Schanz, (2007) 1000-100000 kPa) brez velikih vložkov v mersko opremo (tehnica na 4 decimalna mesta natančno). Slabost metode je dokaj dolgotrajna meritev (14 dni) ter ob nedoslednem delu visoke napake.



Slika 9.9: Prikaz merjenja totalne in matrične sukcije (Bulut in Leong, 2008).

Figure 9.9: Schematic drawing of total and matrix suction measurements (Bulut and Leong, 2008).

9.2.3 Terciarnne metode

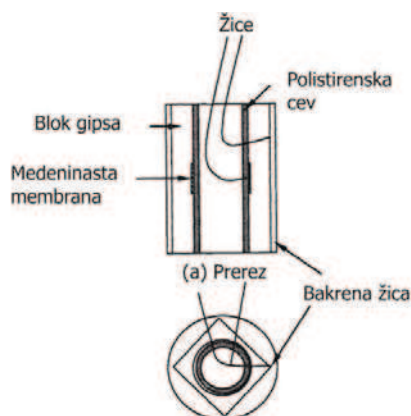
Glavni problem sekundarnih metod je, da je potrebno izmeriti vlago poroznega materiala. Pri terciarnih metodah pa merimo neko drugo fizikalno količino (elektroprevodnost, toplotno prevodnost) kalibriranega poroznega medija in na podlagi te sklepamo na sukcijo zemljine.

Pri meritvah s terciarnimi metodami merimo matrično sukcijo, zato moramo zagotavljati dober stik merilnika z zemljino.

9.2.3.1 Merilniki sukcije na principu merjenja elektroprevodnosti

Merilnik sukcije na principu merjenje električnega upora sestoji iz dveh elektrod, med katerima je vlit porozni material. Za pravilno merjenje upora morajo biti elektrode na točno določeni razdalji. Upor poroznega medija je močno odvisen od vlage poroznega medija in slanosti vode. Da bi preprečili nalaganje snovi na elektrode, moramo uporabljati majhno izmenično napetost. Kot porozni medij lahko uporabimo katerikoli material, vendar je najbolj razširjena uporaba sadre (gipsa). Sadra (gips) se zelo hitro odziva na spremembe sukcije in tudi uravnava slanost porne tekočine. Slabost uporabe sadre je njena topnost, saj se počasi popolnoma raztopi (zato imajo senzorji rok uporabe 1 leta). Ekvilibracijski čas je močno odvisen od sukcije zemljine. Pri 50 kPa je 6 ur, pri 1500 kPa pa 60 ur.

Watermark senzorji namesto sadre uporabljajo majhne keramične kroglice. S tem imajo zagotovljeno daljšo življenjsko dobo a so bolj občutljivi na slanost zemljine. Zaradi retencijske krivulje keramičnih kroglic je delovno območje omejeno na 0-200 kPa.

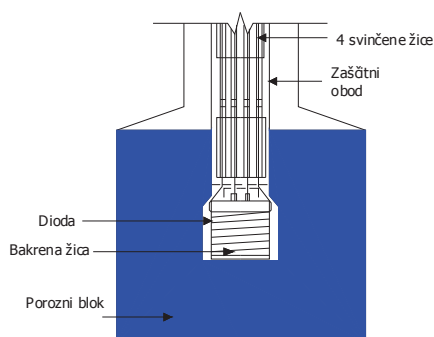


Slika 9.10: Gips blok merilec sukcije (Bulut in Leong, 2008).

Figure 9.10: Gypsum block suction sensor (Bulut and Leong, 2008).

9.2.3.2 Merilniki sukcije na principu merjenja toplotne prevodnosti

So podobni prejšnjim, le da merijo toplotno prevodnost kalibriranega materiala. Toplotna prevodnost poroznega materiala je močno odvisna od stopnje zasičenosti materiala, saj je zrak 25x boljši izolator kakor voda. V merilcu je grelna telo in termometer (termočlen). Grelna telo oddaja energijo, ki jo okoljski porozni medij vpija. Hitrost prirasta temperature v bližnji okolici grelnega telesa je odvisna od toplotne prevodnosti poroznega medija.



Slika 9.11: Skica merilnika sukcije s toplotno prevodnostjo, dioda služi kot termometer, bakrena žica pa kot grelna telo (Bulut in Leong, 2008).

Figure 9.11: Schematic drawing of thermal conductivity suction sensor (Bulut in Leong, 2008).

9.2.4 Metoda ekvilibracije relativne vlage

Podobno kakor pri osmotski metodi tudi v tem primeru izkoriščamo osmotsko sukcijo (solnih) raztopin. Vendar ne uporabimo polprepustne membrane ampak vzorec zemljine postavimo nad raztopino. Pri tem pride do uravnovešenja totalne sukcije raztopine in totalne sukcije vzorca zemljine. Prenosni medij vode je zrak in njegova relativna vlaga. Za zagotavljanje konstantne osmotske sukcije raztopine lahko uporabljamo zasičene raztopine soli. Slabost te metode je, da potrebujemo več različnih soli. Druga možnost pa je uporaba nezasičenih raztopin kislin, vendar je pri tem osmotska sukcija močno odvisna od koncentracije, še zlasti v primeru visokih sukcij. Vpliv napake koncentracije zmanjšamo, če imamo večjo količino raztopine ali pa popravimo količino vode za

spremembo količine vode v vzorcih. Napake pri pripravi raztopin so povezane z napako koncentracije ter temperaturnih gradientov oziroma relativne vlage, zato pogosto osmotsko sukucijo raztopine preverjamo s psihometri.

9.3 Zaključek

V tem poglavju smo predstavili več različnih metod merjenja sukucije. Opisali smo njihove glavne prednosti in slabosti, ki jih povzemamo v preglednici 9.1. Pri tem nismo našeli vseh meritev temveč samo glavne predstavnike merskih metod. V naši nalogi smo se osredotočili predvsem na predstavitev tistih metod, ki smo jih v Sloveniji že uporabili ali pa smo jih ocenili kot potencialno primerne za naše področje raziskovanja (preglednica 9.1).

Preglednica 9.1: Pregled merskih metod.

Table 9.1: Overview of measuring methods.

Metoda	Sukucija	Mersko območje (kPa)	Natančnost (kPa)	Meri sukucijo / vzdržuje konst. sukucijo	Čas testa	V rabi na UL, FGG
NEPOSREDNE						
Peščeni stolp	matrična	0-20	0.1	meri (vzdržuje)	odvisno od višine vzorca	da
Viseč vodni stolpec	matrična	0-85	0.01	vzdržuje	1 dan / stopnjo	deloma
Tenzimeter	matrična	0-85 (1500)	0.01 – 1.0	meri	par ur	da
HYPROP	matrična	0-85 (150)	0.01	meri	1-2 tedna	v tej nalogi
Oсно translacijske metode	matrična	0-500 (1500)	0.1-1.0	vzdržuje	1 dan / stopnjo	v tej nalogi
Osmotska metoda	totalna	0-10.000	se preverja sukucijo raztopine	vzdržuje	1 dan / stopnjo	ne
POSREDNE						
Psihometri	totalna	1000-30.000	odvisno od tipa	meri	<1 ura	ne
Psihometri z ohlajevanjem zrcalca	totalna	1000-300.000	1% ali 100 kPa	meri	5 minut (<1 ura)	v tej nalogi
Metoda filter papirja	totalna/ matrična	0 (1000)- 100.000	10% (300%)	meri	1-2 tedna	sklic na stare meritve
Merilniki sukucije na principu merjenja električne prevodnosti	matrična	0-1500	odvisno od tipa	meri	1 dan	v tej nalogi
Merilniki sukucije na principu merjenja toplotne prevodnosti	matrična	0-1500	odvisno od tipa	meri	1 dan	ne
Metoda ekvibracije relativne vlage	totalna	1000-20.0000	se preverja sukucijo raztopine	vzdržuje	1-2 mesca	deloma

10 GIBANJE VODE V ZEMLJINI

Gibanje vode v zemljini je zelo pomembno za geotehnične izračune. Iz toka vode v zemljini lahko določimo tlake vode v zemljini. V poglavju 5 smo pokazali vpliv tlakov vode na strižno trdnost zemljine in v poglavju 8 na volumenske spremembe zasičene zemljine. V primeru nezasičene zemljine moramo k računom dodati tok zraka. Glavne zakone gibanja vode, zraka in vodne pare in značilnosti nezasičene zemljine v odvisnosti od stopnje zasičenosti smo opisali v poglavju 7.

Gibanje ali tok vode v zemljini lahko delimo na gibanje ali tok vode v zasičeni zemljini in na gibanje ali tok vode v nezasičeni zemljini. Dodatno ga lahko delimo še na stacionarno ali spremenljivo stanje. V stacionarnem stanju se tlak vode v neki točki ne spreminja. Zaradi konstantnega tlaka vode v neki točki je v tej točki v zemljini tudi konstantna količina vode in vodoprepustnost. Pri nestacionarnem toku pa v neki točki v zemljini variira tlak vode s časom in v primeru nezasičene zemljine tudi količina vode in vodoprepustnost.

Količino vode, ki preteče skozi površino zemljine, zapišemo z volumenskim pretokom Q (angleško flow), ki ga pogosto izrazimo na enoto površine oziroma s specifičnim volumenskim tokom q (angleško flux). Specifični volumenski pretok q je enak navidezni hitrosti vode, ki jo podaja Darcyev zakon.

Splošna enačba za opis gibanja vode v zemljini se imenuje Richardsova enačba (Richards, 1931). V spodnji enačbi je zapisana v svoji tri dimenzionalni obliki. Hidravlični potencial zajema tako tlačni kot gravitacijski potencial.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial(Sr n)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right) \quad (10.1)$$

Kjer je θ volumetrična vlaga, H hidravlični potencial, k_i vodoprepustnost v smeri i .

10.1 Stacionarni tok

Stacionarni tok vode v zemljini imenujemo tudi precejanje ali perkolacija. Stacionarni tok vode pogosto uporabljamo v geotehniko zasičene zemljine. Uporabimo ga v izračunu količine precejanja vode pod ali skozi tesnilne zavese, ocene varnosti gradbene jame na hidravlični lom tal, izračunu strujnih sil in pri računih stabilnosti pobočij. Voda pa ne teče le skozi zasičeno zemljino, temveč tudi skozi nezasičeno zemljino. Količina vode, ki teče skozi nezasičeno zemljino, je manjša, saj ima nezasičena zemljina manjšo vodoprepustnost.

Enačbo (10.1) lahko preuredimo za primer stacionarnega toka.

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right) \quad (10.2)$$

Če privzamemo eno dimenzionalni tok vode v zasičeni zemljini, pa:

$$0 = k_s \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) \quad (10.3)$$

Integracija te enačbe nas privede do Darcyjevega zakona:

$$v = konst. = k_s \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (10.4)$$

10.2 Nestacionarni tok

V primeru nestacionarnega toka se tlaki vode v zemljini spreminjajo s časom. Enačbo (10.1) lahko spremenimo v enačbo za opis spremembe volumna zasičene zemljine (konsolidacija), v enačbo za opis spremembe stopnje zasičenosti zemljine pri ničnih volumenskih spremembah ali v enačbo za opis sprememb volumna nezasičene zemljine (kar Richardsova enačba).

Pri enačbi za opis sprememb volumna nezasičene zemljine lahko spremembe volumna zemljine zapišemo s popravkom efektivne napetosti ($n(\sigma')$). V tem primeru upoštevamo tok vode, tok zraka pa zanemarimo. Lahko pa zapišemo enačbe v obliki neodvisnih napetostnih spremenljivk. Za primer sukcijskega edometra ob konstantni obtežbi (Fredlund in Rahardjo, 1993) moramo vse enačbe zapisati v spodnjih oblikah.

Stisljivost zemljine zapišemo kot spremembo volumna vode in spremembo volumna zraka v porah:

$$\frac{dV_w}{V_0} = m_{w\sigma} d(\sigma_z - u_a) + m_{ws} d(u_a - u_w) \quad (10.5)$$

$$\frac{dV_a}{V_0} = m_{a\sigma} d(\sigma_z - u_a) + m_{as} d(u_a - u_w) \quad (10.6)$$

Kjer je m_j koeficient spremembe volumna vode ali zraka zaradi spremembe totalnih napetosti ali sukucije.

Seštevek obeh volumenskih sprememb pove spremembo volumna celotne zemljine.

Enačbe za opis gibanje vode in zraka:

$$\frac{\partial(V_w/V_0)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \right) \quad (10.7)$$

$$\frac{\partial(m_a/V_0)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_a^* \left(\frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \right) \quad (10.8)$$

Kjer je m_a masa zraka.

Ker je zrak stisljiv, lahko maso zraka zapišemo kot funkcijo tlaka in volumna zraka. Volumen zraka pa lahko izrazimo s stopnjo zasičenosti, poroznostjo in volumnom zemljine. Ti funkciji vstavimo v enačbo (10.8):

$$\frac{M_a}{RT}(u_a + 101.3) \frac{\partial(V_a/V_0)}{\partial t} + n(1 - Sr) \frac{M_a}{RT} \frac{\partial(u_a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_a^* \left(\frac{\partial u_a}{\partial x} \right) \right) \quad (10.9)$$

Z združitvijo enačb dobimo naslednji enačbi:

$$\partial u_a (m_{ws} - m_{w\sigma}) - m_{ws} \partial u_w = - \frac{\partial k_x}{\partial x} - \frac{1}{g\rho_w} \frac{\partial k_x}{\partial x} \frac{\partial u_w}{\partial x} - k_x \frac{1}{g\rho_w} \left(\frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} \right) \quad (10.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_a}{RT}(u_a + 101.3)(m_{as} - m_{a\sigma}) \frac{\partial u_a}{\partial t} - \frac{M_a}{RT}(u_a + 101.3)m_{as} \frac{\partial u_w}{\partial t} + n(1 - Sr) \frac{M_a}{RT} \frac{\partial(u_a)}{\partial t} = \\ = - \frac{\partial D_a^*}{\partial x} \frac{\partial u_a}{\partial x} - D_a^* \frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (10.11)$$

10.3 Robni pogoji

Pri reševanju parcialnih diferencialnih enačb potrebujemo začetne pogoje (razporeditev tlaka) in robne pogoje. Imamo dve možnosti za robne pogoje: tlak v odvisnosti od časa ali tok v odvisnosti od časa. Prvi pogoj pogosto v izračunih predstavlja nivo talne vode, drugi pogoj pa pove neprepustne robove in tok vode v in iz zemljine. Padavine zemljino napajajo, evaporacija oz. evapotranspiracija pa zemljino sušita oziroma praznita. Pri pogoju padavin se moramo zavedati, da je vpliv padavin omejen z vodoprepustnostjo zemljine. Če ne bi preprečili omejitve toka vode v zemljino med padavinami, bi dobili pozitivne tlake vode nad zemljino. To pa bi pomenilo kopičenje vode nad zemljino, kar pa na pobočjih ni možno.

10.4 Evapotranspiracija

Evaporacija je pojav izhlapevanja vode s površine tekočine. Vodne molekule načeloma nimajo dovolj energije, da bi zapustile tekočino, vendar določene vodne molekule kljub temu zapustijo tekočino. Prav tako pa se jih določen del vrne nazaj v tekočino. 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, drugih delnih tlakov plinov, hitrosti zraka, medmolekulskih sil, ki se izražajo skozi izparilno toploto, površine izhlapevanja ter temperature. Hitrost evaporacije je tudi odvisna od energije dovedene s sončnim obsevanjem (neto sevanje). Slednja se pretvori v povišanje temperature vode in v izparevanje vode (latentna toplota). V kolikor ni dovedene energije (noč) in se zemljina ne ohlaja, voda ne more izhlapevati.

V primeru zasičene zemljine evaporacijo kontrolirajo toplotni tok v in iz zemljine, tok vode do površine zemljine in gibanje vodne pare iz površine v atmosfero (Hillel, 1980). V nezasičeni zemljini moramo upoštevati še difuzijo vodne pare po z zraku zapolnjenimi porami. V tej fazi je izhlapevanje močno odvisno od hidravličnih lastnosti zemljine (prevajanja vode in zraka). Kadar je v zemljini dovolj vlage, vplivajo nanjo samo meteorološki dejavniki, ko pa v zemljini vlage primanjkuje, se

lahko proces izhlapevanja popolnoma ustavi (Allen et al., 1998). Kasneje bomo pokazali, da je glavni omejevalnik izhlapevanja sukcesija zemljine.

Ker je površina tal pogosto pokrita z rastlinami, moramo k izgubi vode v zemljini upoštevati tudi izhlapevanje vode iz rastlin, saj jo rastline zajemajo skozi korenine iz nižje ležečih slojev zemljine. Temu procesu pravimo transpiracija. Skupni proces izgube vode v zemljini pa imenujemo evapotranspiracija.

Pri evapotranspiraciji ločimo več vrst evapotranspiracije, ki jih ne smemo mešati.

Potencialna evapotranspiracija je količina vode, ki bi izhlapela v določenem času iz nizkih zelenih rastlin z enakomerno višino, ki popolnoma senčijo zemljo, in s primerno oskrbo z vodo (Penman, 1956 po Lahomme, 1997). V takem primeru je potencialna evapotranspiracija tista količina vode, ki bi ob danih vremenskih pogojih in dovajanju energije (sončne radiacije), izhlapela iz zemljine, če bi bila voda na voljo (Thornthwaite, 1948 po Lahomme, 1997). Površina zelenih površin mora biti obsežna, da ni vpliva robov (Penman, 1963 po Lahomme, 1997). Problem določitve potencialne evapotranspiracije je, da mokra zemljina z izhlapevanjem ohlaja ozračje in s tem spreminja vremenske vplive, ki dejansko ne bi bili enaki merjenim. Zato mora biti zelena površina samo zadosti velika (Morton, 1983 po Lahomme, 1997). Takšna definicija je tudi smiselna, saj so vremenski podatki merjeni v realnih pogojih. Nash (1989) ilustrira problem velikosti na primeru Sahare, kjer bi imele obsežne zelene površine velik vpliv na klimo področja. Maidment (1993) pravi, da je potencialna evapotranspiracija neodvisna od vrste površine (voda, zemljina, trava), saj je fizika izhlapevanja v bistvu enaka. Garrat (1994) pa poudarja, da je potencialna evapotranspiracija maksimalna količina izhlapele vode v danem okolju.

Referenčna evapotranspiracija je boljše definirana potencialna evapotranspiracija. V tem primeru je točno določena vrsta rastline in pogoji zemljine (mokra zemljina). Referenčna evapotranspiracija tako ni odvisna od značilnosti rastline in zemljine temveč le od vremenskih pogojev (radiacije, temperature, hitrosti vetra, relativne vlage). Za določanje referenčne evapotranspiracije je FAO (Organizacija za prehrano in kmetijstvo) predlagala enačbo Penman in Monteitha (Allen et al., 1998). V samem začetku razvoja referenčne evapotranspiracije se je namesto referenčne rastline uporabljalo vodo, kasneje pa rdečo deteljo in travo. Danes za referenco uporabljamo travo višine 12 cm, površinsko upornostjo 70 s/m in albedom (odbojnostjo) 0,23.

Dejanska evapotranspiracija predstavlja dejansko količino vode, ki je izhlapela. Dejansko evapotranspiracijo lahko merimo (evaporacijske posode, lizimetri) ali pa določimo preko empiričnih enačb.

Če želimo oceniti dejansko evapotranspiracijo, moramo referenčno evapotranspiracijo popraviti za koeficient nestandardne rastline in koeficient nestandardnih pogojev tal (faktor vodnega stresa). Koeficient nestandardne rastline je odvisen od oblike listov, višine rastline, albeda in aerodinamičnih lastnosti. Prav tako se koeficient spreminja s stopnjo razvoja rastline. Z enakim popravkom lahko določimo evapotranspiracijo zemlje (zorana zemlja).

10.4.1 Ocena evapotranspiracije

10.4.1.1 Izračun evaporacije

Tik nad zemljino obstaja sloj zraka, kjer je relativna vlaga odvisna od evaporacije. Nad tem slojem pa ima zemljina zanemarljiv vpliv na relativno vlago zraka. Evaporacijo lahko tako izračunamo z integriranim Fickovim zakonom difuzije, z uporabo delnega tlaka vodne pare površine zemljine in atmosfere ter upora, ki ga nudi ta sloj atmosfere. Rosenberg et al. (1983) so sloj zraka tik nad zemljino opisali kot turbulentni površinski sloj, v njem pa so merjene vse meteorološke količine (temperatura zraka, relativna vlaga, hitrost vetra).

Sončna radiacija zvišuje temperaturo zemljine in s tem osuši zrak oziroma zviša zasičeni delni tlak vodne pare. S tem se poveča razlika med delnim tlakom vodne pare zraka tik nad zemljino in atmosfero ter pospeši evaporacija. Povečanje evaporacije pa hladi zemljino zaradi latentne toplote. Ko se oba vpliva uravnatežita, dobimo dejansko evaporacijo.

Sušenje zemljine zemljini zvišuje sukucijo, s tem znižuje delni tlak vodne pare tik nad zemljino (Kelvinova enačba) in posledično znižuje evaporacijo. Sukucija se zlasti povečuje v pripovršinskem sloju zemljine in tako lahko znatno omejuje evaporacijo. Tudi ta proces moramo upoštevati v izračunu evaporacije.

Vsi naštetni procesi so odvisni od vremenskih pogojev (delni tlak vodne pare v atmosferi in upor površinskega sloja zraka). Upor površinskega sloja zraka je odvisen od gladkosti površine, hitrosti vetra in zmanjšanja turbulentnosti.

Če prevzamemo izotermno izhlapevanje dobimo podobne rezultate kakor enačbe tipa Penman-Monteith. Enačbe tipa Penman-Monteith predpostavljajo, da se vsa neto sončna radiacija pretvori v evaporacijo. Tako izračunana evaporacija za mokre zemljine je enaka potencialni evaporaciji.

Evaporacijo lahko zapišemo podobno kakor je Dalton leta 1802 (Wilson et al. 1997) zapisal enačbo za hitrost evaporacije iz vodne površine.

$$E = f(U_a)(p_{v0} - p_v) \quad (10.12)$$

Kjer je E evaporacija (mm/dan), $f(U_a)$ funkcija, ki temelji na hitrosti zraka.

V primeru zemljine $f(u)$ predstavlja upor zraka ob površini zemljine. p_{v0} pa ni več enak p_{v0} , ampak je zmanjšan za vpliv totalne sukucije zemljine. Evaporacijo lahko zapišemo z naslednjo enačbo (Campbell, 1985).

$$E = \frac{(p_v(\psi_t) - p_v)}{\rho_w r_a} \quad (10.13)$$

Kjer je r_a upor pripovršinske plasti zraka.

Ker je zgornja enačba že integrirana po sloju površinskega zraka, moramo upoštevati upor tega sloja in ne gradienta delnega tlaka vodne pare po višini tega sloja. Upor površinskega sloja zraka lahko izračunamo po Campbell (1985). Upor sam je odvisen od več parametrov (višine merjenja vremenskih podatkov, grobosti površine, hitrosti zraka, temperature zraka, toplotne kapacitete zraka,..) in razlike

med temperaturo zraka in površino zemljine. Sam izračun poteka iterativno. Za gola tla sicer lahko upoštevamo, da je površina, na kateri poteka izmenjava toplote, enaka površini na kateri poteka izmenjava vodne pare. Prav tako lahko predpostavimo enako upornost za toplotni prenos in prenos vodnih hlapov. Integrirana enačba z upoštevanjem upora zraka upošteva stacionarno stanje v površinskem sloju zraka.

Za izračun evaporacije moramo poleg enačbe za opis evaporacije rešiti še enačbo za opis toka vode in enačbo za prenos toplote v zemljini. Enačba za prenos toplote je parabolična parcialna diferencialna enačba enaka enačbi za tok vode, pri tem pa moramo poznati: toplotno prevodnost, toplotno kapaciteto in albedo zemljine. Vse tri količine so odvisne od gostote in sukije. Pri izračunu pa upoštevamo zakon o ohranitvi energije. Zemljina energijo prejema ali izgublja s sončnim obsevanjem (radiacijo), latentno toploto in konvekcijo vode in vodne pare.

$$C_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - L_v \left(\frac{p_a + p_v}{p_a} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial p_v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} [C_{hv} \Delta T q_v + C_{hw} \Delta T q_w] \quad (10.14)$$

Kjer je C_h , C_{hv} , C_{hw} volumenska toplotna kapaciteta zemljine, vodne pare in vode, λ toplotna prevodnost, L_v latentna toplota, D_v difuzijski koeficient vodne pare skozi zemljino, q_v , q_w tok vodne pare in vode, ΔT temperaturna razlika glede na referenčno temperaturo.

Wilson et al. (1997) predlagajo, da se evaporacija tipa Penman in temperatura površine zemljine izračunata po naslednjih enačbah:

$$E = \frac{sR_n + \gamma E_a}{s + A} \quad (10.15)$$

Kjer je E evaporacija, R_n neto radiacija, γ konstanta psihrometra (naklon krivulje delnega tlaka vodne pare), E_a funkcija hitrosti vetra, delnega tlaka vodne pare v zraku ter relativne vlage zraka in zraka tik ob zemljini, s naklon krivulje zasičenega delnega tlaka vodne pare pri temperaturi T_a , A inverz relativne vlage zraka tik ob zemljini (funkcija sukije).

$$T_s = T_a + \frac{1}{\gamma f(U_a)} (R_n - E) \quad (10.16)$$

Kjer je T_s temperatura površine zemljine $f(U_a)$ funkcija, ki temelji na hitrosti zraka.

Večji problem je pri računu transpiracije, saj je slednja običajno večja od evaporacije, hkrati pa je močno odvisna od vegetacije. Tudi transpiracija je manjša od potencialne transpiracije, saj rastline lahko izgubijo liste (zima, košnja, suša) ali pa zaprejo listne reže. Prvi vpliv je razpotegnjen v daljše časovno obdobje, drugi pa se običajno dogaja v vročih poletnih dneh. Običajno rastlino opišemo s koeficientom nestandardne rastline, ki je odvisen od letnega časa.

Prav tako se je potrebno zavedati, da rastline črpajo vodo iz globljih slojev zemljine in tam moramo upoštevati izgubo vode kot posledico transpiracije. Tudi slednje opišemo kot funkcijo razporeditve korenin.

10.4.1.2 Izračun referenčne evapotranspiracije

Za izračun potencialne evaporacije obstaja več empiričnih enačb, ki temeljijo na sončni radiaciji oziroma prenosu energije, temperaturi zraka ali kombinaciji metod. Najbolj znana je enačba Penman-Monteith (Monteith, 1965)

$$\lambda E = \frac{[s(R_n - G)] + [\rho_a c_p D_a / r_a]}{s + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (10.17)$$

Kjer je E evaporacija, R_n neto radiacija, G toplotni tok s površine, λ latentna toplota izhlapevanja vode, c_p toplotna kapaciteta zraka, D_a razlika delnih tlakov vodne pare, r_s upor površinske plasti zraka na tok vodne pare.

Upor površinske plasti zraka lahko izračunamo po naslednji enačbi:

$$r_a = \frac{\ln^2(z_r / z_0)}{k^2 U_a} \quad (10.18)$$

Kjer je z_r referenčna višina (2 m), z_0 dolžina grobosti površine, k Karmanova konstanta (0,4), U_a hitrost zraka.

Za popolnoma vlažne površine lahko predpostavimo r_s enak 0. V tem primeru dobimo Penmanovo enačbo.

Neto radiacijo lahko izračunamo po naslednji enačbi:

$$R_n = (1 - a)R_s + \varepsilon(R_a - \sigma T_s^4) \quad (10.19)$$

Kjer je R_s sončna radiacija, R_a atmosferska radiacija, a albedo površine, ε emisivnost površine, T_s temperatura površine (K), σ Stefanova konstanta ($5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Enačba ni primerna za področja z redko vegetacijo in za primer konvekcije zraka (pregreta površina tal). Zveza tudi ni popolnoma pravilna, saj sušenje zemljine povzroči povišanje temperature zemljine, kar povzroči spremembo neto radiacije in aerodinamičnega upora površine (nestabilnost ozračja). Prav tako vidimo, da na potencialno evaporacijo vplivajo: R_s , R_a , D_a , U_a , ki so parametri okolja in a , ε , z_0 , G , ki so parametri površine. Temperatura površine pa se popravlja glede na okoljske vplive in vplive tal.

FAO predlaga naslednji postopek za izračun Penman-Monteithove enačbe (Allen et al., 1998). V enačbi (10.17) upoštevamo naslednjo enačbo za opis upora pripovršinske plasti zraka r_a :

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{0m}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{0h}}\right)}{k^2 U_a(z_m)} \quad (10.20)$$

Kjer je z_m višina pri kateri merimo hitrost vetra (2 m), z_h višina pri kateri merimo relativno vlago zraka (2 m), d višina, kjer je hitrost vetra enaka 0 (zero plane displacement height) za grobo oceno velja 2/3 višine ovir, z_{0m} dolžina grobosti površine za turbulentnost (0,1-0,3 višine ovir), z_{0h} dolžina grobosti površine za prenos vodne pare in toplote (difuzijo) (precej manjša od z_{0m} ; FAO 0,1 z_{0m}).

Upor površinske plasti zraka na tok vodne pare skozi rastline in zemeljsko površino v ozračje, za rastline, ki popolnoma pokrivajo tla, se izračuna po naslednji enačbi:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{active}} \quad (10.21)$$

Kjer je r_l upor listnih rež dobro osončenih listov, LAI_{active} površina s soncem osončenih listov rastline na površino tal, kar je približno 50% vseh listov oziroma 1,5-2,5 krat površina tal.

Za referenčne pogoje dobimo naslednjo enačbo za izračun potencialne evaporacije:

$$ET_0 = \frac{0,408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{273 + T_a(2m)} U_a(2m) D_a}{s + \gamma(1 + 0,34U_a(2m))} \quad (10.22)$$

kjer je ET_0 referenčna evapotranspiracija, $U_a(2m)$ hitrost vetra na 2 m, $T_a(2m)$ povprečna dnevna temperatura na 2 m višine merjena v °C, γ konstanta psihrometra izračunana po naslednji enačbi:

$$\gamma = \frac{c_p p_a}{\varepsilon \lambda} = 0,655 \cdot 10^{-3} p_a \quad (10.23)$$

Kjer je ε razmerje molekularnih mas vodne pare in zraka (0,622).

s (naklon krivulje zasičenega delnega tlaka vodne pare pri temperaturi T_a) dobimo, če izračunamo odvod funkcije zasičenega parnega tlaka po temperaturi. FAO uporablja približek enačbe (2.8):

$$p_{v0} = 0,6108e^{\frac{17,27T_a}{237,3+T_a}} \quad (10.24)$$

$$s = \frac{4098 \left[0,6108e^{\frac{17,27T_a}{237,3+T_a}} \right]}{(T_a + 237,3)^2} \quad (10.25)$$

R_n (neto radiacija) je razlika med kratkovalovno radiacijo Sonca R_{ns} in dolgovalovno radiacijo Zemlje R_{nl} . Kratkovalovna radiacija Sonca je odvisna od radiacije Sonca (sončna konstanta, 1,362 kW/m²), naklona zemlje, atmosferskih vplivov in albeda zemlje.

Vpliv nagnjenosti zemljine osi na sončno radiacijo dobimo po spodnjih enačbah (Allen et al., 1998):

$$R_a = \frac{1}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)] \quad (10.26)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} i_{dan} \right) \quad (10.27)$$

$$\delta = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} i_{dan} - 1,39 \right) \quad (10.28)$$

$$\omega_i = \frac{\pi}{12} [(t_i + 2/3(L_z - L_m) + Sc) - 12] \quad (10.29)$$

$$Sc = 0,1645 \sin(2b) - 0,1255 \cos(b) - 0,025 \sin(b) \quad (10.30)$$

$$b = \frac{2\pi}{365} [i_{dan} - 81] \quad (10.31)$$

Kjer je R_a zunajzemeljska sončna radiacija, G_{sc} solarna konstanta, d_r inverz razdalje do sonca, ω_1 , ω_2 sončni kot na začetku in koncu časovnega obdobja, ω_i sončni kot v času t_i , ϕ zemljepisna širina, δ sončni odklon, i_{dan} številka dneva (1.1. je 1 31.12. pa 366), t_i čas v urah, L_z zemljepisna širina poldnevnikova časovna cone, L_m zemljepisna širina lokacije, Sc popravek zaradi nagnjenosti zemeljske osi.

V kolikor enačbo (10.26) računamo za celodnevno zunajzemeljsko sončno radiacijo, jo lahko zapišemo s spodnjo enačbo:

$$R_a = \frac{1}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_s) \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_s)] \quad (10.32)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10.33)$$

Kjer je ω_s sončni kot ob zahodu.

Zunajzemeljsko sončno radiacijo moramo zmanjšati za vplive atmosfere in odboj od površine. S tako popravljenim energijskim tokom dobimo kratkovalovno radiacijo Sonca R_{ns} , ki jo izračunamo s pomočjo albeda a in dejanskega sončnega obsevanja R_s .

$$R_{ns} = R_s (1 - a) \quad (10.34)$$

$$R_s = R_a (a_s + b_s \frac{n}{N}) \quad (10.35)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (10.36)$$

Kjer je R_s dejansko sončno obsevanje, a albedo, R_a zunajzemeljska sončna radiacija, a_s delež dejanske sončne radiacije v oblačnih dneh, b_s popravek dejanske sončne radiacije sončnih dni, n dejanski čas sončnega obsevanja, N maksimalni možni čas sončnega obsevanja.

Angstromova koeficienta a_s , b_s je potrebno kalibrirati, sicer lahko uporabimo splošni vrednosti $a_s = 0.25$ in $b_s = 0.5$.

Dolgovalovna radiacija Zemlje R_{nl} je odvisna od temperature površine zemlje oziroma rastlin (Stefan-Boltzmannov zakon). Dolgovalovna radiacija Zemlje je manjša od tiste, ki jo podaja Stefan-Boltzmannov zakon, saj jo nekaj vpije atmosfera in vrne nazaj (odseva). Količina vpitja pa je odvisna od količine vode, CO₂, prahu in oblakov. Dolgovalovno radiacijo Zemlje lahko ocenimo po spodnji enačbi:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 - T_{\min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{p_v}) \left(1.35 \frac{R_{s_0}}{R_{s_0}} - 0.35 \right) \quad (10.37)$$

Kjer sta T_{\max} in T_{\min} maksimalna in minimalna temperatura v dnevu. Služita za oceno povprečne temperature, R_{s_0} dejanska sončna radiacija ob sončnem dnevu ($n = N$).

G toplotni tok s površine lahko zanemarimo, še posebej, če gledamo daljše časovno obdobje. V kolikor gledamo dnevne količine, ga lahko ocenimo po spodnjih enačbah:

$$G = \begin{cases} 0.1R_n & \text{dan} \\ 0.5R_n & \text{noč} \end{cases} \quad (10.38)$$

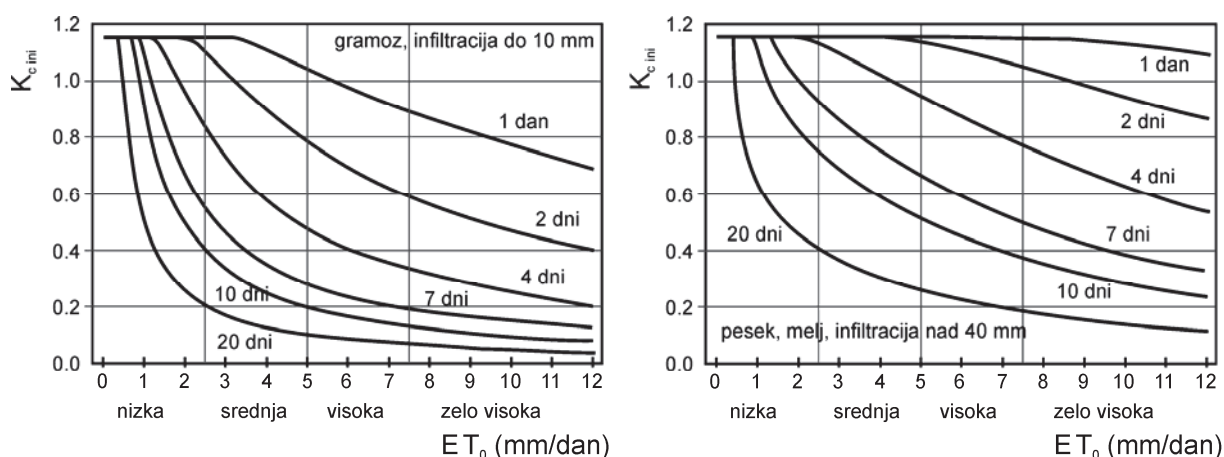
10.4.1.3 Korekcija referenčne evapotranspiracije za golo zemljo

Allen et al. (1998) naštevajo 2 možnosti korekcije referenčne evapotranspiracije za golo zemljo. Prva možnost je korekcija evapotranspiracije s samo enim koeficientom. V tem primeru je ET_0 pomnožena z 1.15. V drugem primeru, ko uporabljamo 2 koeficienta (za rastline in zemljo), pa je ET_0 pomnožena z 1.05.

Dejanska evaporacija s površine gole zemlje glede na ET_0 pa je odvisna tudi od vlažnosti zemljine. Za primer popravka ET_0 samo z enim koeficientom (Allen et al., 1998) predlagajo naslednjo enačbo:

$$E = K_c ET_0 \quad (10.39)$$

Kjer je K_c koeficient rastline in stanja tal, ki ga za primer golih tal odčitamo iz slike 10.1.



Slika 10.1: Povprečni K_c v odvisnosti od ET_0 in intervala med padavinami oziroma zalivanjem za vse tipe zemljin (Allen et al., 1998).

Figure 10.1: Average K_c as related to the level of ET_0 and the interval between significant rains for all soil types (Allen et al., 1998).

10.4.1.4 Vpliv sukcije na evaporacijo

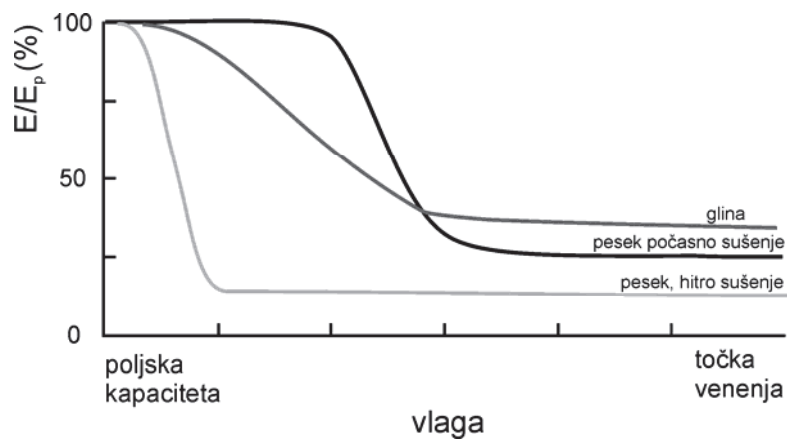
Sukcija zmanjšuje evaporacijo, saj zmanjšuje maksimalni možni delni tlak vodne pare tik nad zemljino. Ugotavljanje sukcije površine zemlje pa je težavno in zato se pogosto uporabijo približne metode izračuna evaporacije (npr. Penman-Monteith).

Holmes (1961) je pokazal odvisnost med količino vode in razmerjem med dejansko in potencialno evaporacijo (slika 10.2). Iz slike vidimo, da je dejanska evaporacija (E) enaka potencialni evaporaciji (E_p) za zemljine pri nizki sukaciji. Na suhi strani (retencijske krivulje) pa je dejanska evaporacija le še manjši delež potencialne evaporacije. Med obema točkama vidimo močan vpliv vrste zemljine in

hitrosti sušenja. Hitrost sušenja vpliva na profil sukcije zemljine, ki močno spremeni obnašanje zemljine. Wilson et al. (1994) so razvili združen model, ki povezuje zemljino in atmosferske vplive. Model je podoben modelu Campbell (1985). Poleg numeričnega modela so Wilson et al. (1994) naredili tudi laboratorijske teste na tankem sloju zemljine. Na tankem sloju zemljine so merili sukcijo in hitrost evaporacije. Pokazali so, da imajo različne zemljine različne krivulje med razmerjem dejanske in potencialne evaporacije in vsebnostjo vode ter enake krivulje, če jih opisujemo s stališča sukcije (slika 10.3). Zaključimo lahko, da ima sukcija in njen doprinos k zmanjšanju delnega tlaka vodne pare glavni vpliv na hitrost evaporacije. Avtorji tudi predlagajo funkcijo za opis dejanske evaporacije:

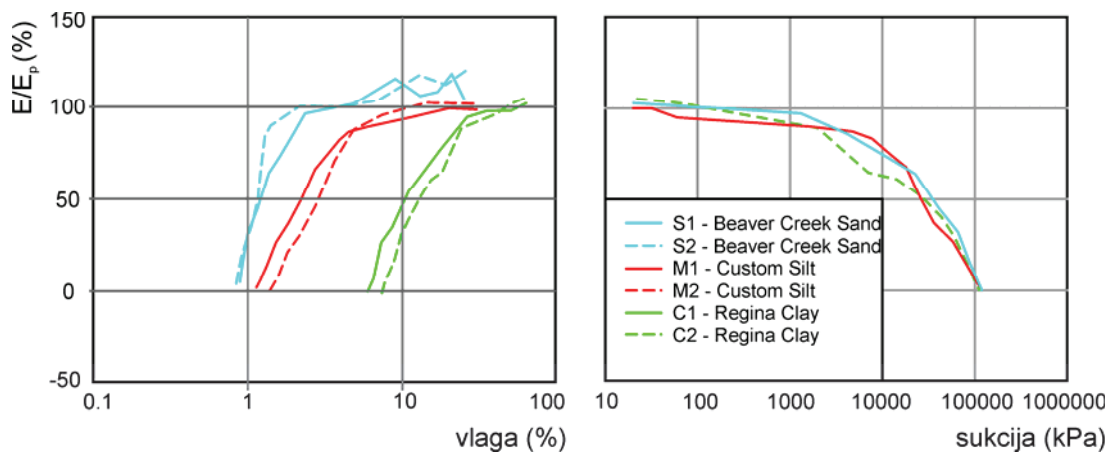
$$E = E_p \left(\frac{p_v(\psi) - p_v}{p_{v0} - p_v} \right) \quad (10.40)$$

Kjer je E dejanska evaporacija, E_p potencialna evaporacija, p_v delni tlak vodne pare v zraku, $p_v(\psi)$ delni tlak vodne pare tik nad zemljino.



Slika 10.2: Razmerje med dejansko in potencialno evaporacijo v odvisnosti od vlage zemljine za različne zemljine (Holmes, 1961).

Figure 10.2: The ratio between the actual and potential evaporation as a function of soil water content for different soil (Holmes, 1961).



Slika 10.3: Razmerje med dejansko in potencialno evaporacijo v odvisnosti od vlage in sukcije zemljine (Wilson et al., 1994).

Figure 10.3: The ratio between the actual and potential evaporation as a function of soil water content and suction for different soil (Wilson et al., 1994).

11 POBOČNA PREMIKANJA

11.1 Opredelitev in razvrstitev pobočnih premikanj

Pobočna premikanja (angl. gravity slope movements) so različna gibanja kamnitih in zemljinskih gmot pod vplivom težnosti. Geološko in geotehnično izrazoslovje za opisovanje pobočnih procesov ni vselej identično (kamnina/hribina, sediment/zemljina/preperina), v praksi pa večinoma zelo nedosledno. To se je še posebej pokazalo po sprožitvi plazu in drobirskega toka nad Logom pod Mangartom novembra leta 2000.

Skaberne (2001) je podal predlog slovenskega izrazoslovja, povezanega s pobočnimi premiki. Pobočna premikanja kamnin in zemljin so posledica različnih procesov. Razlikujejo se po vzrokih nastanka, sestavi gibajoče se mase, načinu premikanja in odlaganja (umirjanja) in nenazadnje po količini mase, ki je v gibanju in dimenzijah. Skaberne (2001) je plazove razdelil glede na:

- okolje premikanj (kopenska, podvodna),
- način premikanja (prevračanje, padanja, plazenje, tečenje; razmerja med trdnimi delci, vodo in zrakom; hitrost),
- vrsta premikajočega se materiala (hribina, zemljina, tip hribine ali zemljine),
- stanje (aktivno, reaktivno, začasno mirujoče, speče, stabilizirano, fosilno),
- širjenje (napredujoče, omejujoče, pojemajoče, premikajoče),
- oblika (kompleksna, sestavljena, večvrstna, zaporedna, enostavna).

Waltham (2002) obravnava tudi vzroke nastanka plazov. Ti so lahko:

- dvig podzemne vode,
- odstranitev plazu pod nevtralno linijo (ločnica med nestabilnim in stabilnim delom), kot posledica erozijskih procesov (reka, valovi,...) ali povzročena s človeškimi dejavnostmi (gradnja cest, hiš, rudnikov in kamnolomov),
- obremenitev telesa plazu nad nevtralno linijo, kot posledica naravnih procesov (vulkani) ali povzročena s človeškimi dejavnostmi (gradnja nasipov, gradnja hiš),
- zmanjšanje strižne trdnosti zaradi preperevanja in zaglajevanja strižne ploskve,
- vibracije, ki so lahko posledica človeških dejavnosti (miniranje, promet, zabijanje pilotov) ali potresa.

Skaberne (2001) je opredelil pet (5) vrst »čistih« premikanj: prevračanje, padanje, kotaljenje, plazenje in tečenje (slika 11.1):

- **Prevračanje** je rotacijsko gibanje strmo padajočih blokov in plošč kamnin, koherentnih sedimentov in preperine, ki so ločeni z diskontinuitetami.
- **Padanje in kotaljenje** je hitro neodvisno gibanje: prosto padanje, poskakovanje in kotaljenje dela kamnine, sedimenta ali preperine ob navpičnem ali po strmem pobočju. Pri tem lahko delci udarjajo ob pobočje, vendar med njimi ni pomembnejše interakcije s podlago (brežino). V kolikor gre za porušitve sveže odlomljenih kamnin, govorimo o odlomih, podorih, udorih (kras).
- **Plazenje** je translacijsko ali rotacijsko gibanje kamninskih/hribinskih, sedimentnih in preperinskih (zemljinskih) mas po eni ali več bolj ali manj jasnih drsnih ploskvah ali plazinskih porušnih conah. Običajno je splazela masa notranje sorazmerno malo deformirana.

- **Tečenje** je zvezna nepovratna deformacija materiala, ki nastane kot posledica napetostnega stanja v materialu, izzvanega s težnostjo.

Sedimentni težnostni tokovi so po Skabernetu (2001) tokovi sedimentnega materiala, ki imajo večjo gostoto od obdajajoče tekočine in se pod vplivom gravitacije gibljejo po pobočju hitreje od obdajajočega medija. Značaj toka je odvisen od: relativne zastopanosti posamezne faze zemljine (trdnine, vode in zraka), zrnastostne sestave in fizikalno kemičnih lastnosti trdnih delcev. Navedene količine vplivajo na viskoznost, naravo trkov, drsenje ter turbulenco, od njih pa je odvisen način prenosa sil ter značaj toka, predvsem hitrost in koncentracija toka, s čimer tokove običajno tudi opišemo.

Sedimentne težnostne tokove delimo glede na koncentracijo trdnih delcev na: zrnasti tok, ki ima dovolj nizko količino vode ali drobnozrnatega medzrnskega materiala, da se sile prenašajo skozi trke zrn oziroma medzrnske kontakte. Tok se obnaša plastično. V počasi tekočem toku se napetosti prenašajo med zrn in se kombinirajo z viskozniimi učinki mulja med zrn. Če je hitrost manjša od 0,1 m/s govorimo o zemljinskem toku, pri še manjši hitrosti pa o lezenju. Pri hitrostih med 0.1 in 35 m/s pa postanejo pomembne vztrajnostne sile (trki zrn). V tem primeru govorimo o vztrajnostnem zrnastem toku oziroma pri izjemno hitrih tokovih nekoherentnih materialov, kjer je hitrost tudi do 100 m/s, pa o utekočinjenem zrnastem toku ali podornem toku. Pri večji količini vode v zemljini pride do blatnih tokov, pri še večji količini vode pa do tekočinskih tokov. Količina vode v zemljini, potrebna za nastanek blatnih tokov, je močno odvisna od vrste zemljine. Za vse blatne tokove je značilna kohezijska strižna trdnost, viskoznost in povišani porni pritiski. V primeru drobno zrnate zemljine, v večini sestavljene le iz finih frakcij, ki se giblje z manjšo hitrostjo, govorimo tudi o viskozem blatnem toku.

PROCESI TRANSPORTA			SEDIMENT	
težnostna (gravitacijska) premikanja na pobočjih	prevrtačanje			prevrnjeni bloki
	padanje in kotaljenje		pobočni grušč	
	plazenje		plazovina	
	sedimentni težnostni (gravitacijski) tok	masni (gmočni) tok	drobirski tok	sediment drobirskega toka (debrīt)
			zrnski tok	sediment zrnškega toka
	tekočinski tok	tekočinski tok	utekočinjeni porušeni tok	sediment utekočinjenega toka
			utekočinjeni iztiskovalni tok	
			turbiditni (kalni) tok	turbidit

Slika 11.1: Osnovni načini težnostnih premikanj pobočij (Skaberne, 2001).

Figure 11.1: Major types of gravity slope movements (Skaberne, 2001).

11.2 Stabilnost plazov in sukucija

Pri obravnavi stabilnosti plazov primerjamo gonilne (aktivne, destabilizacijske) sile in sile upora (reaktivne, stabilizacijske). Glavni gonilni sili na plazju sta teža plazine, ki je odvisna od naklona pobočja in totalne teže zemljine ter strujanje podzemne vode. Sile odpora so strižne sile na drsni

ploskvi. Njihova jakost je odvisna od strižnih karakteristik zemljine na drsni ploskvi (c' , φ') in od efektivne normalne napetosti na drsni ploskvi. Strižne karakteristike zemljine se lahko s časom spreminjajo zaradi preperevanja kamnin ali glajenja drsne ploskve (rezidualni strižni kot). Zaradi preperevanja in erozije se s časom debelina potencialno nestabilne mase na pobočju spreminja, zaradi česar se spreminjajo tudi efektivne napetosti na potencialni drsni ploskvi. Efektivne napetosti na drsni ploskvi so odvisne od totalnih napetosti in tlaka vode. Višji kot je tlak vode, nižja je efektivna napetost glede na totalno napetost in manj stabilno je pobočje.

Nasprotno pa je v primeru sukucije. Višja kot je sukucija višja je efektivna napetost zemljine in bolj stabilno je pobočje. V primeru zelo visokih sukucij (blizu rezidualne vlage) pa lahko višanje sukucije povzroči nižanje efektivne napetosti.

Na naravnih pobočjih je tako voda oziroma razporeditev pornih tlakov tista, ki bo »hitro« spreminjala stabilnost pobočja, saj se porni tlaki prilagajajo vremenskim vplivom.

Faktor varnosti pobočja definiramo kot:

$$FS = \frac{\textit{stabilizacijske sile}}{\textit{destabilizacijske sile}} \quad (11.1)$$

Varnost pobočja proti zdrsu lahko računamo numerično ali analitično. V primeru analitičnih postopkov običajno predpostavimo krožne ali poligonalne drsine, nato pa izračunamo sile, ki delujejo na drsini. Pri tem moramo zagotavljati ravnotežje sil in momentov. Sile lahko obravnavamo na celotni drsni ploskvi ali pa jih obravnavamo odsekoma po lamelah.

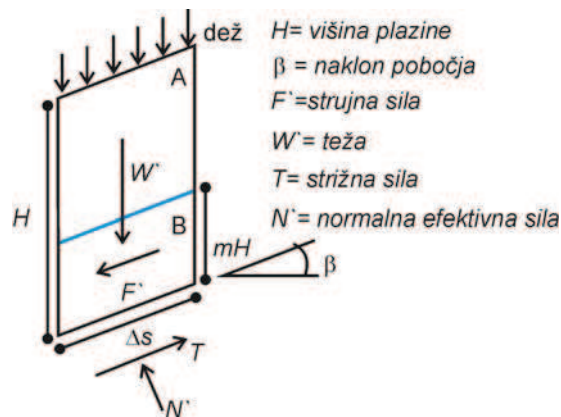
Pri računu stabilnosti s pomočjo numeričnih metod, pa postopoma zmanjšujemo strižne karakteristike zemljine. Z zmanjševanjem strižnih karakteristik premaknemo določene točke (na mreži končnih elementov) v zemljini do porušnice definirane z materialnim modelom (npr. krivulja kritičnega stanja). V teh točkah pride do plastičnega tečenja. Z zadostnim zmanjšanjem postanejo takšne točke zvezne skozi zemljino ter definirajo plastificirano cono v zemljini. Matrika, ki jo potrebujemo za reševanje enačb postane singularna in nadaljnje reševanje ni več možno. Faktor varnosti je definiran kot potrebno zmanjšanje strižnih karakteristik zemljine.

Posebna oblika računa stabilnosti je upoštevanje brezkrajnega pobočja. V takem primeru mora biti dolžina plazu mnogo daljša od širine in globine plazu. Kdaj se bo neko pobočje obnašalo kot brezkrajno je odvisno tudi od naklona in strižnih karakteristik zemljine. V geotehničnih izračunih se račun faktorja varnosti pogosto prevede na račun stabilnosti brezkrajnega pobočja tudi za pobočja, ki sicer ne izpolnjujejo kriterijev za brezkrajna pobočja, saj je račun faktorja varnosti v tem primeru konservativen.

Ker so plazovi v nezasičeni zemljini sorazmerno plitvi in dolgi, avtorji večinoma predpostavljajo brezkrajna pobočja. Tudi ko računamo infiltracijo padavin v zemljino, lahko predpostavimo enodimenzionalni tok vode, saj so padavine enakomerno porazdeljene po pobočju. Zaradi tega bi imela vsaka lamela plazu enako vertikalno infiltracijo, zaradi predpostavke brezkrajnega pobočja pa je tok vode vzdolž plazu neodvisen od položaja na plazu (Collins in Znidarcic, 2004).

Račun faktorja varnosti brezkrajnega pobočja temelji na naslednjih predpostavkah:

- drsina je neskončno dolga,
- premiki zemljine so vzporedni s pobočjem,
- ni rotacije plazečih mas,
- nivo gladine podzemne vode je vzporeden s tlemi (enako velja tudi za tlake vode),
- materialne karakteristike so vzdolž pobočja konstantne,
- drsna ploskev je samo v enem sloju zemljine.



Slika 11.2: Sile na brezkrajnem pobočju (Montrasio in Valentino, 2008).

Figure 11.2: Forces acting on a single slice of an infinite slope (Montrasio and Valentino, 2008).

Enačbo za izračun faktorja varnosti brezkrajnega pobočja lahko tako zapišemo kot:

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \beta + U) \tan \varphi}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \quad (11.2)$$

$$U = \begin{cases} -u_w \\ \chi(u_a - u_w) \end{cases}$$

Kjer je H višina sloja, β naklon pobočja, U prispevek tlaka vode ali sukcije.

Iz zgornje enačbe vidimo, da v primeru nezasičene nekoherentne zemljine ($c'=0$) pride do pojava plazov le v slučaju, ko ima zemljina večji naklonski kot od strižnega kota. Če ima zemljina manjši naklonski kot od strižnega kota, bo splazela samo v primeru pozitivnih pornih tlakov. V preglednici 11.1 podajamo izračun faktorja varnosti za različne naklone in različne vrednosti pornega tlaka (v m vodnega stolpca) glede na globino porušnice.

Ko obravnavamo različne vrste zemeljskih plazov, imamo na začetku običajno nezasičeno zemljino. Ob padavinskem dogodku pa se zemljina prične močiti. Neposredne posledice padavinskega dogodka so lahko dvig podzemne vode zaradi napajanja s padavinami, sprememba sukcije vzdolž opazovanega prereza, prirast arteških ali subarteških tlakov v vodonosnem sloju ali kombinacije le teh. V vseh primerih pa obravnavamo spremembe pornih tlakov v porozni sredini, sprememba le teh pa vpliva na efektivno napetostno stanje in posledično na strižno odpornost zemljine.

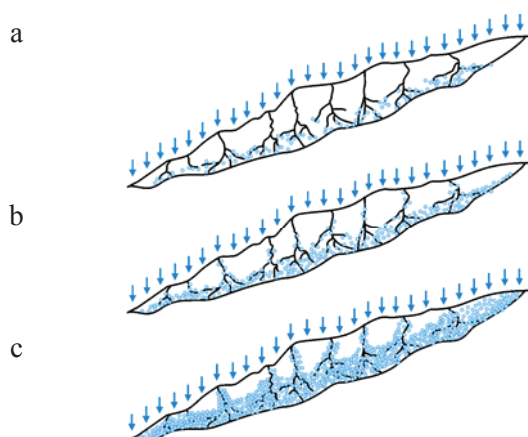
Preglednica 11.1: Faktor varnosti v odvisnosti od naklona pobočja β in razmerja med pornimi tlaki in globino porušnice (u_w / h (m/m)) za primer strižnega kota $\phi'=27^\circ$ in $c'=0$.

Table 11.1: Factor of safety for different slope angles β and ratio between pore water pressure and depth of shear surface (u_w / h (m/m)) for $\phi'=27^\circ$ and $c'=0$.

	naklon pobočja β						
u_w/h	14.3	18.8	22.2	27.0	32.5	37.4	45.5
-1.0	2.99	2.28	1.93	1.59	1.33	1.16	0.98
-0.8	2.80	2.13	1.79	1.47	1.22	1.06	0.88
-0.5	2.50	1.89	1.59	1.29	1.06	0.91	0.74
-0.4	2.40	1.81	1.52	1.24	1.01	0.86	0.69
-0.2	2.20	1.66	1.39	1.12	0.91	0.77	0.60
0.0	2.00	1.50	1.25	1.00	0.80	0.67	0.50
0.2	1.80	1.34	1.11	0.88	0.69	0.57	0.40
0.4	1.60	1.19	0.98	0.76	0.59	0.47	0.31
0.6	1.40	1.03	0.84	0.65	0.48	0.37	0.21
0.8	1.20	0.87	0.71	0.53	0.38	0.27	0.12
1.0	1.01	0.72	0.57	0.41	0.27	0.17	0.02

Za plitve plazove v nezasičeni coni obstajajo 3 tipi porušitev (splazitve):

- Porušitev v zasičeni coni ob podlagi (Schulz et al., 2009, Tofani et al., 2006). V kritičnem primeru se višina podtalnice dvigne do nivoja terena in nadaljnje padavine nimajo več vpliva na stabilnost (Collins in Znidarcic, 2004). Posebna oblika takšnega plazju je omočenje drsne ploskve preko razpok (Montrasio in Valentino, 2008, Meisina, 2006), (slika 2). Naklonski kot terena je manjši od strižnega kota.
- Porušitev v nezasičenem materialu (Godt et al., 2009, Rahardjo in Fredlund, 1995). Naklonski kot terena je večji od strižnega kota.
- Porušitev po ujeti zasičeni coni nad mejo močenja zemljine (Collins in Znidarcic, 2004, Muntohar in Liao, 2010). Naklonski kot terena je manjši od strižnega kota.



Slika 11.3: Skica pobočja: (a) infiltracija vode v okolico makro por, (b) obsežni deli zemljine so zasičeni, (c) deli zasičene zemljine se širijo in so med seboj povezani (Montrasio in Valentino, 2008).

Figure 11.3: Diagram of the slope: (a) infiltration from the zones around the macro-pores; (b) wide portions of soil become saturated; (c) the saturated portions of soil extend and become continuous (Montrasio and Valentino, 2008).

Stabilnost plazov v nezasičeni coni obravnavajo številni avtorji. V okviru tega dela ne moremo podrobneje predstaviti vseh, tudi zato ne, ker številni avtorji obravnavajo plazove v povezavi s sukucijo, značilne za aridna in semi aridna področja, ta pa niso primerljiva z geološkimi okolji v Sloveniji. V nadaljevanju se bom omejil le na glavne smeri aktualnih raziskav zadnjega desetletja.

Različni avtorji so opazovali sukucijo na plazovih ali potencialnih plazovih (Godt et al., 2009, Tofani et al., 2006, Lu in Godt, 2008), opravili numerične izračune toka vode in pripadajočega faktorja varnosti (Rahardjo et al., 2001, Tofani et al., 2006, Montrasio et al., 2009) ter jih primerjali s terenskimi meritvami (Biavati et al., 2006). V zadnjih letih, ko se vse več pozornosti namenja vremenskim ekstremom, je vse več raziskav usmerjenih na umetno proženje plazov z umetno ustvarjenimi padavinami (Ng et al., 2008, Ng et al., 2003, Springman et al., 2009, Springman, 2011). Teorija mehanike nezasičenih zemljin se je uporabila tudi pri izdelavi karte potencialnih plazov za območje okoli jezera Lario v Italiji (Crosta in Frattini, 2003). Pri tem sta si avtorja pomagala z eno-dimenzionalno analizo toka vode in stabilnosti za primer padavinskega dogodka iz leta 1997. Dobljene računske rezultate sta primerjala z dejanskimi plazovi ob tem padavinskem dogodku.

Tohari et al. (2007) so opravili laboratorijske poskuse na peščenem pobočju velikosti 2x1x1 m. Pri tem so preverili vpliv dviga podzemne vode na stabilnost plazu in količine in intenzitete padavin. Ng et al. (2008) opisujejo poskus na nezasičenem pesku v centrifugi. Pri testu so opazovali razvoj sukucije in pomike pobočja pri večkratnih padavinskih dogodkih.

Rahardjo et al. (2007), Lu in Godt (2008) in Rahimi et al. (2011) so opravili občutljivostne analize faktorja varnosti glede na količino padavin, naklon in višine pobočja, gladine podtalnice pred padavinami ter vrsto zemljine. Ugotovili so, da so manj prepustna tla ($k_s=1 \cdot 10^{-6}$ m/s) bolj občutljiva na padavinske dogodke kot bolj prepustna tla ($k_s=1 \cdot 10^{-4}$ m/s). Slednje je posledica intenzitete padavin, ki je bila manjša od vodoprepustnosti zasičene zemljine v drugem primeru. Zaradi tega se takšna tla nikoli niso mogla popolnoma zasititi z vodo. Rahimi et al. (2011) je tudi ugotavljal negativne vplive predhodnih padavin oziroma razporeditve padavin na stabilnost plazu. Rahardjo et al. (2007) so ugotovili, da se bolj prepustne zemljine verjetno porušijo zaradi dviga podtalnice, manj prepustne pa zaradi upada sukucije. Collins in Znidarcic (2004) ugotavljata, da se bolj prepustne zemljine porušijo zaradi dviga podtalnice, manj prepustne zemljine pa zaradi naraščajoče stopnje zasičenosti območja nad mejo močenja. Talebi et al. (2007) so opravili analize faktorja varnosti ob konstantnih padavinah za različne primere ukrivljenosti pobočja. Ugotovili so, da so konkavna pobočja v vzdolžni in prečni smeri manj stabilna od konveksnih. Večino vpliva je prinesla ukrivljenost v vzdolžni smeri, saj zvišuje/znižuje nivo podzemne vode v spodnjem delu plazu. Pri svojih izračunih so dobili vse porušitve po zasičeni coni.

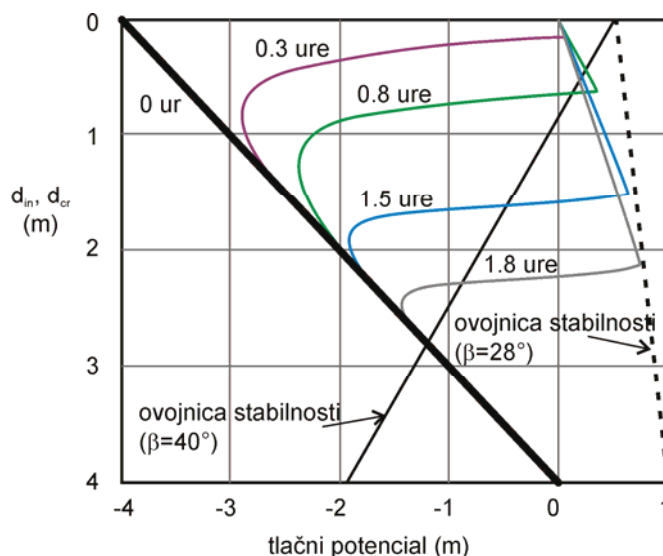
S porušitvijo po zasičeni coni nad mejo močenja zemljine (Collins in Znidarcic, 2004) bi se dalo pojasniti pojav plitvih drobirskih tokov (do globine 1m) (Johnson in Sitar, 1990, de Campos et al., 1991). Chen et al. (2004) so ugotovili, da je pojav plitvih drobirskih tokov lahko posledica volumenskih deformacij, ki pospešijo upad sukucije. Ugodne vplive volumenskih deformacij pa so ugotovili Tofani et al. (2006). Na opazovanju plazu v Coloradu so ugotovili ugoden vpliv dilatacije materiala na stabilnost plazu, saj dilatacija znižuje vodne pritiske oziroma zvišuje sukucijo.

Collins in Znidarčič (2004) sta za vsako globino izračunala potrebni tlak, ki zagotavlja stabilnost. Za vsak padavinski dogodek lahko izrišemo razporeditev pornih tlakov s časom. V kolikor presežemo

mejni tlak, pride po pojava nestabilnosti (slika 11.4). Za znani porni tlak (ali sukciijo) sta predpostavila naslednjo enačbo za stabilnost brezkrajnega pobočja.

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w h_c \tan \varphi^b - \gamma_w h_p \tan \varphi^i}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \varphi^i)} \quad (11.3)$$

Kjer je d_{cr} globina s faktorjem varnosti 1, h_c sukciija izražena v m, h_p tlačni potencial v m. Raba h_c in h_p se izključuje.



Slika 11.4: Diagram razvoja pornih tlakov med infiltracijo z ovojnico tlakov, ki povzročijo nestabilnost (Collins in Znidarcic, 2004)

Figure 11.4: Results of pore pressure developments during infiltration analysis with superimposed stability envelope (Collins and Znidarcic, 2004)



Slika 11.5: Tipičen primer plazu v nezasičeni coni (Springman, 2005, po Petkovšek, 2006)

Figure 11.5: Typical landslide in unsaturated zone (Springman, 2005, after Petkovšek, 2006)

V klasični mehaniki tal opisujemo zemeljske plazove običajno v luči efektivnih napetosti na potencialni porušnici oz. na kritični drsni ploskvi. Vpliva sukciije v nezasičeni zemljini nad drsno ploskvijo ne upoštevamo. V geološkem okolju Slovenije do danes ne poznamo primera obravnave porušitve pobočja zaradi upada sukciije oziroma naraščajoče stopnje zasičenosti zemljine nad gladino

podzemne vode, čeprav nekateri primeri iz prakse kažejo, da so ti pojavi zagotovo prisotni pri veliki večini usadov, kot tudi pri številnih plitvih plazovih brez jasno izražene drsne ploskve (na primer porušitve brežin na AC Hoče – Arja vas).

Ključni faktorji, ki vplivajo na proženje plazju na nezasičenih pobočjih so značilnosti pobočja (geološka zgradba, geomorfologija, antropogeni vplivi), ki so bolj ali manj konstantni s časom v primerjavi z zelo spremenljivimi okoljskimi vplivi (meteorološkimi, hidrološkimi), ki vplivajo tako na infiltracijo padavin, vodni režim in sukucijo, kot tudi na temperature in vegetacijo.

11.3 Lezenje plazju

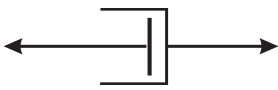

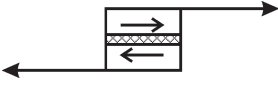
Pri lezenju tal povezujemo enačbe za napetost, deformacije in čas. Zaradi kompleksnosti problema lezenja oziroma viskoznosti materialov so se razvili različni modeli za opis posameznih fenomenov. V splošnem lahko vse enačbe povzemamo z naslednjo diferencialno enačbo:

$$F = f\left(\sigma, \varepsilon, \frac{\partial \sigma}{\partial t}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \dots\right) \quad (11.4)$$

Za začetek reologije materialov velja Newtonova viskozna tekočina, katere osnove predstavljajo Newtonovi zakoni. S svojimi zakoni je Newton odkril linearno zvezo med hitrostjo toka in uporom tekočine. Ostala dva osnovna gradnika reoloških modelov sta Hookova vzmet in Saint Venantovo plastično telo. Njihove grafične predstavitve in enačbe podajamo v preglednici 11.2. Newtonova tekočina in Hookova vzmet nista nujno linearno elastičen material in idealna viskozna tekočina. Posebni telesi sta tudi togo telo (evklidsko telo) in Pascalova tekočina (neviskozna tekočina), ki ju navaja Šuklje (1969).

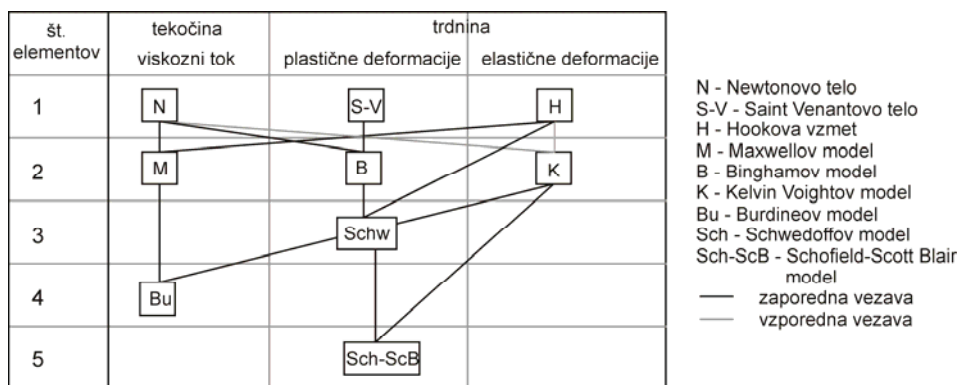
Preglednica 11.2: Osnovni reološki modeli

Table 11.2: Basic rheological models

telo	grafični prikaz	enačba telesa
Newtonova tekočina - Newtonov viskozni element		$\sigma = \eta \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$
Hookovo telo		$\sigma = E \varepsilon_e$
Saint Venantovo telo		$\varepsilon = 0, \text{ če } \sigma < \sigma_y$ $\varepsilon = \infty, \text{ sicer}$

Kjer so ε_v viskozne deformacije, ε_e elastične deformacije, η viskoznost, σ_y meja tečenja.

Iz zgoraj opisanih gradnikov reoloških modelov lahko sestavimo vse ostale reološke modele. Osnovno obnašanje zemljine lahko opišemo z Maxwellovim, Kelvinovim in Voightovim ter Binghamovim modelom. Kateri model uporabimo, je močno odvisno tudi od pričakovanega obnašanja zemljine v našem problemu (slika 11.6).



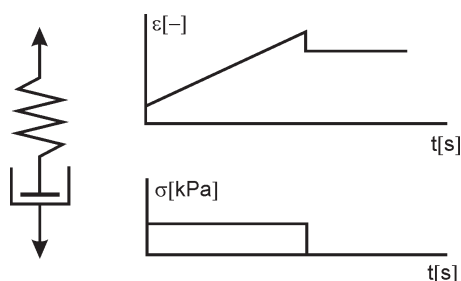
Slika 11.6: Reološki modeli.
Figure 11.6: Rheological models.

Maxwellov reološki model

Maxwellovo telo sestoji iz zaporedno vezanega Hookovega telesa in Newtonovega viskoznega elementa. Napetosti na obeh telesih so enake, deformacije pa so seštevek obeh deformacij. Z upoštevanjem teh dveh zvez dobimo naslednjo diferencialno enačbo:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (11.5)$$

V primeru konstantne napetosti dobimo najprej elastični skok in nato linearen prirast deformacije (slika 11.7).



Slika 11.7: Maxwellov reološki model in odziv na enotsko obremenitev.
Figure 11.7: Maxwell rheological model and response on unit load.

Kelvin in Voightov reološki model

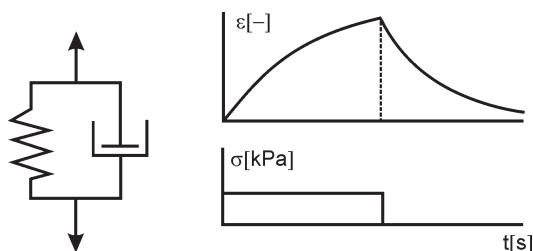
Kelvin in Voightov reološki model sestoji iz vzporedno vezanega Hookovega telesa in Newtonovega viskoznega elementa. Napetost je seštevek napetosti na obeh telesih, deformacije pa so enake. Z upoštevanjem teh dveh zvez dobimo naslednjo diferencialno enačbo:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (11.6)$$

V primeru konstantne napetosti dobimo naslednjo enačbo (enačbo lezenja):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{Et}{\eta}\right) \right) \quad (11.7)$$

Odziv materiala na stopenjsko obtežbo prikazuje slika 11.8.

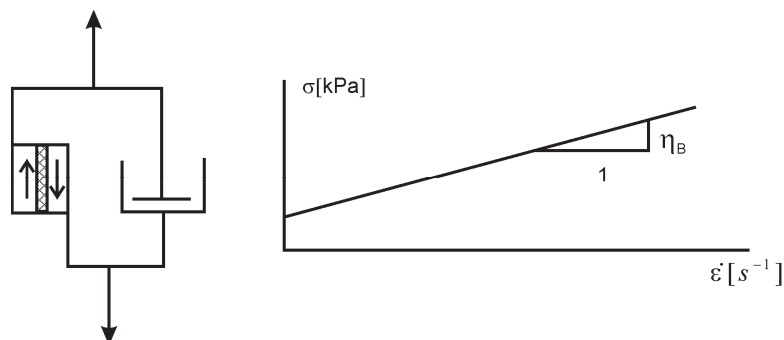


Slika 11.8: Kelvin in Voightov reološki model in odziv na enotsko obremenitev.
Figure 11.8: Kelvin and Voight rheological model and response on unit load.

Binghamov reološki model

Binghamov reološki model sestoji iz vzporedno vezanega Saint Venantovega telesa in Newtonovega viskoznega elementa. Dokler napetost na Saint Venantovem telesu ni prekoračena, so deformacije nične (togo telo), nato pa pričnejo naraščati zvezno s časom (viskozna tekočina). Enačba za opis Binghamovega reološkega modela se glasi:

$$\sigma = \sigma_y + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (11.8)$$



Slika 11.9: Binghamov reološki model in odvisnost napetosti od hitrosti deformacij.
Figure 11.9: Bingham rheological model and stress dependency on deformation rate.

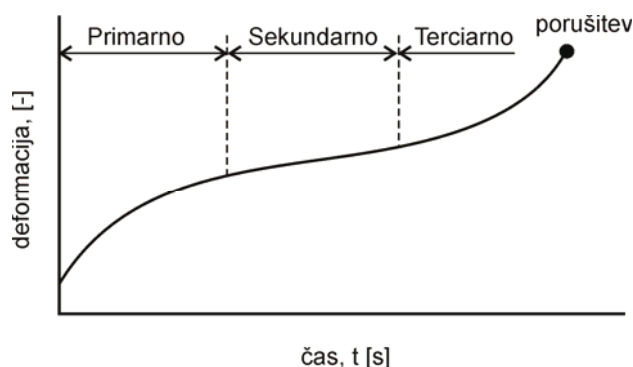
Obstajajo pa tudi drugi modeli sestavljeni iz več teles ali pa z zaporedno ali vzporedno vezanimi pari teles. Takšni modeli bolje opišejo obnašanje zemljine. Enačbe se dobijo podobno kakor v predstavljenih treh modelih. Zgleda takšnih modelov najdemo v Šuklje (1969), Meschyan (1995) in Barnes et al. (1989).

11.3.1 Fenomenološki modeli

Maslov (1968) je teorije viskoznosti razdelil na fizikalno-mehanske in fenomenološke. S fizikalno-mehanskim opisom poskušamo pojave opisati preko merljivih fizikalnih količin (modul elastičnosti,

viskoznost). Nasprotno pa pri fenomenoloških samo opisujemo dogajanje v zemljini. S preurejanjem enačb se določeni fenomenološki opisi spremenijo v fizikalno-mehanske. Zgoraj opisani primeri modelov so fizikalno mehanski. Med fenomenološke modele sodijo empirični modeli, ki opisujejo časovne odzive zemljine brez fizikalne podlage. Za opise dogajanja v zemljini se je uporabilo potenčne, eksponentne, logaritemske in hiperbolične funkcije (Meschyan, 1995).

Na podlagi opazovanj lahko deformacije zemljine razdelimo na primarne, sekundarne in terciarne (slika 11.10). V primarni fazi pride predvsem do disipacije pornih pritiskov in deformacije se s časom umirjajo, v sekundarni fazi so deformacije bolj ali manj konstantne. V terciarni fazi pa se hitrost deformacij pospeši in lahko pride do porušitve zemljine. Konsolidacija zemljine (zmanjšanje volumna) sestoji samo iz prvih dveh faz, strižno obremenjevanje zemljine pa ima lahko vse tri faze. (Meschyan, 1995) je predlagal da se za primarno lezenje uporabi Newtonovo tekočino, kasneje za sekundarno lezenje pa Binghamov model.



Slika 11.10: Prikaz primarne, sekundarne in terciarne faze lezenja.

Figure 11.10: Illustration of the primary, secondary and tertiary creep phases.

Konsolidacija

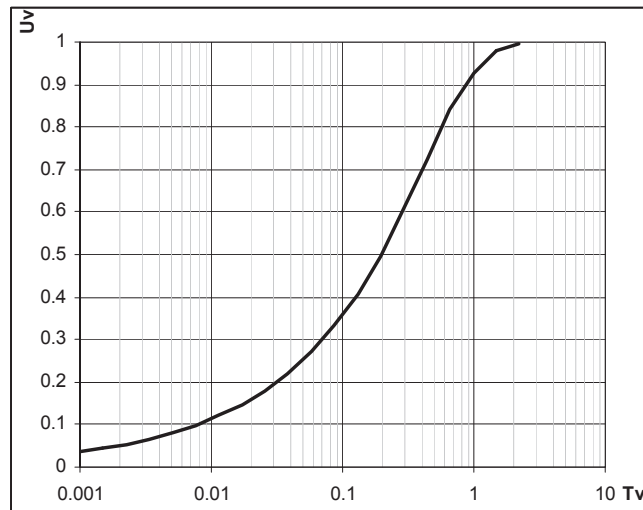
Eden izmed fenomenoloških modelov je model za opis primarne faze konsolidacije zasičene zemljine pod brezkraino obtežbo. Enačbo sta zapisala Terzaghi in Frohlich (1936) (povzeto po Šuklje, 1969).

$$u_w(z,t) = \frac{4\Delta\sigma}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin\left(\frac{\pi}{2}(2m+1)\frac{z}{h}\right) \exp\left(- (2m+1)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v\right) \quad (11.9)$$

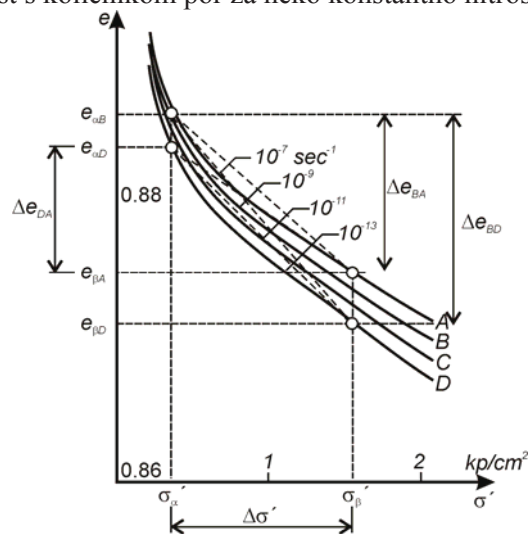
$$U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp\left(- (2m+1)^2 \frac{\pi^2}{4} T_v\right) \quad (11.10)$$

$$T_v = \frac{k_s E_{oed}}{\rho_w g h^2} \quad (11.11)$$

Kjer je U_v stopnja vertikalne konsolidacije, T_v faktor konsolidacije, h drenažna dolžina, $\Delta\sigma$ sprememba napetosti v tleh, E_{oed} edometrski modul.

Slika 11.11: Diagram $U_v(T_v)$.Figure 11.11: $U_v(T_v)$ diagram.

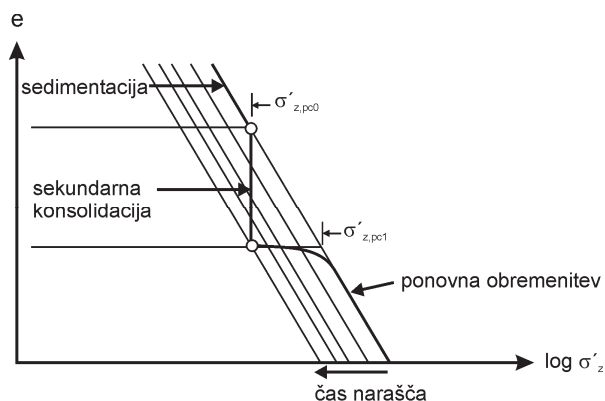
Šuklje (1969) povzema tudi druge možne rešitve za eno dimenzionalno konsolidacijo. V primeru sekundarne konsolidacije (primarna faza lezenja) pa je vpeljal izotahe. Izotahe so krivulje, ki povezujejo efektivno napetost s količnikom por za neko konstantno hitrost deformacij.



Slika 11.12: Izotahe za primer suhega peska (Šuklje, 1969).

Figure 11.12: Isotache set of dry sand (Šuklje, 1969).

Bjerrum (1967) je vpeljal pojem izohron. Izohrone so črte, ki povezujejo efektivno napetost s količnikom por v enakem času po pričetku konsolidacije. S pomočjo tega modela si lahko razložimo prekonsolidacijo kot posledico časovnih vplivov sekundarne konsolidacije.



Slika 11.13: Sistem izohron (Bjerrum, 1967).

Figure 11.13: System of isochrones (Bjerrum, 1967).

Za opis sekundarne konsolidacije zasičenih zemljin je Buisman (1936) predlagal logaritemsko premico. Šuklje (1969) jo je uporabil tudi za opis konsolidacije suhih zemljin.

$$\Delta h_t = \Delta h_1 - \alpha_s \log(t / t_1) \quad (11.12)$$

Kjer je Δh_1 posedek v času t_1 , Δh_t posedek v času t , α_s naklon logaritemske premice.

V doktoratu pa uporabljam namesto α_s koeficient sekundarne konsolidacije:

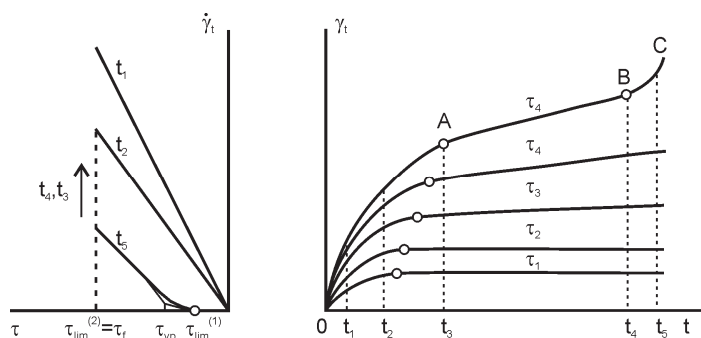
$$C_\alpha = \alpha_s / h_0 \quad (11.13)$$

Kjer je h_0 začetna višina zemljine.

11.3.2 Lezenje v strižnih pogojih

Za razliko od volumetričnega lezenja zemljine, ki je posledica preurejanja zrn in iztiskanja vode, je strižno lezenje bolj podobno obnašanju drugih materialov. Se pa strižno lezenje pogosto dogaja hkrati z volumenskimi deformacijami. Na strižno lezenje so najbolj občutljive zasičene mehke glin v nedreniranih pogojih ter prekonsolidirane glin v dreniranih pogojih (Havel, 2004).

Lezenje v strižnih pogojih se opisuje s pomočjo bolj ali manj zapletenih fizikalno-mehanskih in fenomenoloških reoloških modelov. Vsem modelom je enako, da so razviti za točno določen problem. (Meschyan, 1995) predlaga uporabo različnih modelov za različne faze lezenja. Za primarno lezenje je uporabil Newtonovo tekočino, za sekundarno fazo lezenja pa Binghamov model.

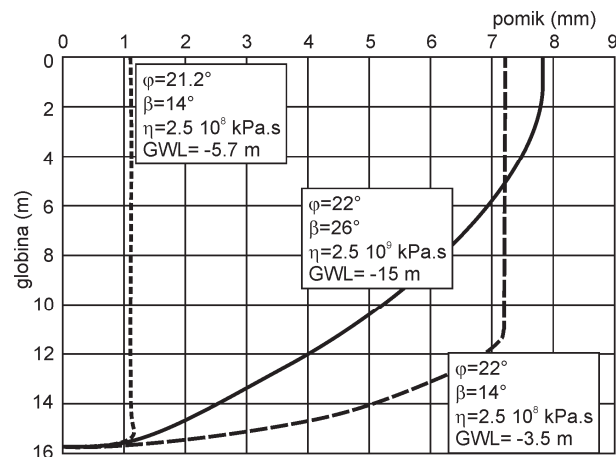


Slika 11.14: Obnašanje glin med preiskavo lezenja v enostavnem strigu (Meschyan, 1995).

Figure 11.14: Behaviour of clay during creep simple shear tests (Meschyan, 1995).

Uporaba Binghamovega reološkega modela

Binghamov model se pogosto uporablja za opis drobirskih ali blatnih tokov (npr. Chen, 2002). Van Asch et al. (2009) so uporabili Binghamov model za opis dveh plazov v francoskih Alpah. Model so kalibrirali na podlagi inklinometriških meritev (2 letna opazovanja) ter laboratorijskih rezultatov. Iz laboratorijskih podatkov so dobili strižne karakteristike, iz pomikov pa viskoznost zemljine. Na sliki 11-15 prikazujemo modelne napovedi pomikov za različne robne pogoje.



Slika 11.15: Primeri modelnih inklinometriških profilov za različne materialne podatke, nivo podzemne vode (GWL) in naklon pobočja α (van Asch et al., 2009).

Figure 11.15: Examples of modelled inclinometer profiles for different material strengths, groundwater levels (GWL), and slope conditions α (van Asch et al., 2009).

Van Asch in Malet (2009) sta isti model uporabila tudi za napoved pojava blatnih tokov. Pri tem sta obravnavala dva primera: povečanje pornih pritiskov kot posledica deformacij in vpliv spremembe geometrije terena.

Uporaba Burgerjevega reološkega modela

Burgerjev reološki model je sestavljen iz zaporedno vezanega Maxwellovega reološkega modela in Kelvin in Voightovega reološkega modela. Za razliko od Binghamovega modela Burgerjev reološki model izkazuje deformacije že pri faktorju varnosti večjem od 1.

Burgerjev model so uporabili Segalini et al. (2009) za analizo pomikov 4 plazov v Italiji. Parametre Burgerjevega modela so iz vrednotili na podlagi laboratorijskih triosnih preiskav in dobili dokaj dobro ujemanje. Numerične izračune so opravili v programu FLAC.

Enak model sta uporabili Fifer Bizjak in Zupančič (2009) za modeliranje blatnega toka na plazju Slano blato. Materialne podatke sta določili na finih delcih plazine z vlago od 35 do 60% za dva primera: viskozni tok s konstantno hitrostjo in za lezenje zemljine ob konstantnih strižnih obremenitvi. Meritve lezenja zemljine sta opisali z Burgerjevim modelom, ki sta ga nato uporabili v programu FLAC za izračun pomikov na Slanem blatu.

Fenomenološki opis striga

Meschyran (2006) strig opisuje s fenomenološkim modelom, ki ga je v primeru enostavnega striga zapisal kot:

$$\gamma_{st} = \omega(t, \sigma_n) f(\tau, \sigma_n, t) \quad (11.14)$$

kjer je ω merilo strižnih deformacij, f pa funkcija strižnih napetosti:

$$f(\tau, \sigma_n, t) = \alpha_M(\sigma_n, t)\tau + \beta_M(\sigma_n, t)\tau^{n(\sigma_n)} \quad (11.15)$$

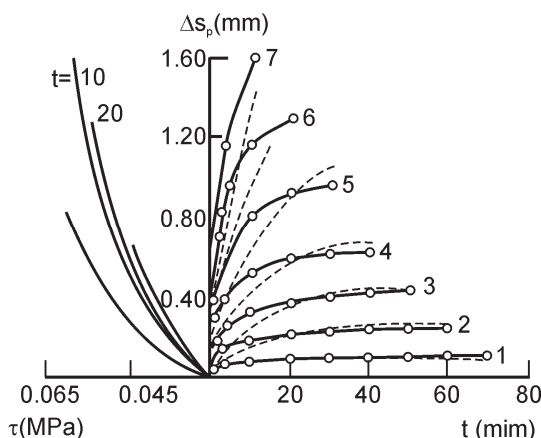
τ in σ_n lahko nadomestimo z razmerjem τ / τ_{max} . S tem dobimo funkcijo:

$$\omega(t) = \frac{\gamma(\tau / \tau_{max})}{(\tau / \tau_{max})^n} \quad (11.16)$$

ω tako opisuje strižne deformacije v primeru, ko je $\tau / \tau_{max} = 1$

Funkcijo ω lahko aproksimiramo z eksponentno funkcijo (aproksimacije vidne na sliki 11.16), logaritemsko funkcijo ali potenčno funkcijo.

$$\begin{aligned} \gamma &= At^m (\tau / \tau_{max})^n \\ \gamma &= (a + b \log t) (\tau / \tau_{max})^n \end{aligned} \quad (11.17)$$



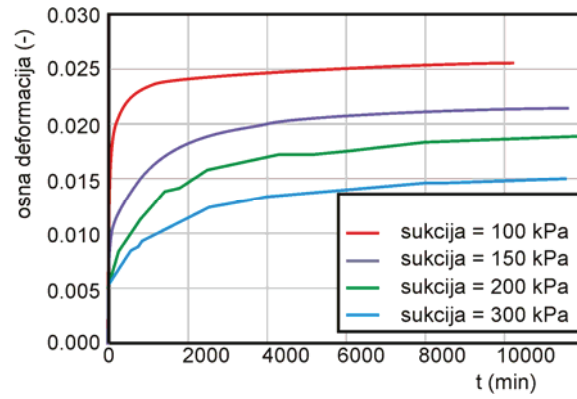
Slika 11.16: Primeri krivulj strižnega lezenja (Meschyran, 2006).

Figure 11.16: Examples of shear creep curves (Meschyran, 2006).

Enak zapis za razvoj deformacij so uporabili tudi Huvaj-Sarihan (2009) za primer ponovne sprožitve plazju in Wang in Yin (2009) za primer gibanja plazju Qianjiangping v nezasičeni coni. Wang in Yin (2009) sta opravila teste v sukcijski triosni celici za primer $\sigma_3 = 100$ kPa, $\tau / \tau_{max} = 0.5$ in sukucije 100, 150, 200 in 300 kPa. Ugotovila sta, da sukucija močno znižuje lezenje zemljine (slika 11.17).

11.3.2.1 Zaključek

Pokazali smo osnovne enačbe za opis lezenja zemljine za primer volumenskega in strižnega lezenja. Za primer strižnega lezenja smo prikazali različne najbolj pogosto uporabljene reološke modele s katerimi so različni avtorji uspešno opisali obnašanje plazju. Izbira modela pa je močno odvisna od problema, ki ga rešujemo, ter od meritev v laboratoriju in na terenu.



Slika 11.17: Meritve lezenja na vzorcu zemljine pri različnih sukcijah (Wang in Yin, 2009).

Figure 11.17: Unsaturated soil creep test at different suctions (Wang and Yin, 2009).

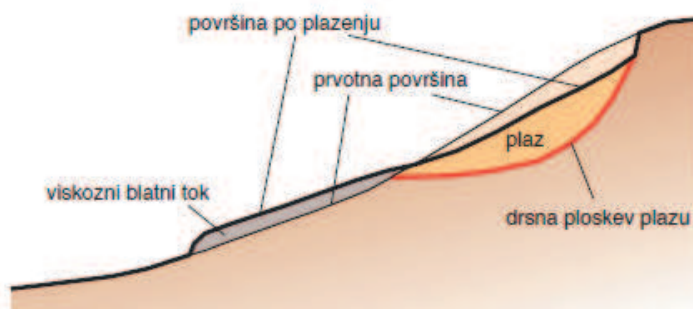
12 TERENSKÉ PREISKÁVE NA PALZU SLANO BLATO

12.1 Plaz Slano blato

12.1.1 Zgodovina plazú

Plaz Slano blato je eden največjih, najbolj kompleksnih in tudi najbolj dokumentiranih aktivnih zemeljskih plazov v Sloveniji. Volumen plazine je preko 1 000 000 m³. Prvi znanstveni zapis o plazú je iz leta 1789. Balthasar Hacquet (1739-1815) je v reviji *Oryctographia Carniolica* poročal, da se je leta 1786 iz Čavna odtrgal velik kos gore (Benko, 2011). O dogodku Hacquet tudi navaja, da je to na tem območju stalnica. Plaz je bil vrisán tudi na francoskih vojaških kartah iz obdobja 1763 do 1787 (Rajšp et al, 1997, citirano po Benko, 2011). V tedniku *Soča* je več zapisov o dogodkih iz leta 1885, 1888 in 1902 ter o sanaciji plazú med leti 1902 in 1908 (Benko, 2011).

Nazadnje se je plaz velikih razsežnosti ponovno sprožil 17. 11. 2000. V jeseni 2000 je bilo neobičajno veliko padavin. Na območju, kjer je 20 – letno povprečje 1466 mm (vremenska postaja Slap) je v treh mesecih padlo 990 mm padavin, od tega kar 592 mm ali ca 30 % letnih padavin v mesecu novembru. Plaz se je sprožil le nekaj dni po katastrofalnem dogodku v Logu pod Mangartom. Več let po sprožitvi plazú in po izvedenih raziskavah na plazú, so strukturni geologi pojav obrazložili s teorijo, da so obilne padavine napolnile karbonatni vodonosnik, ki se nahaja v obliki strukturne kadunje (depresije) v zaledju plazú (Placer et al., 2008). Voda iz kadunje se je nato preko tektonsko predrobljenih con in flišnih peščenjakov precejala do območja plazú, kjer je povzročila arteške pritiske na kontaktu med flišno kamnino in neprepustno flišno preperino. Zaradi znižanja efektivnih napetosti je prišlo verjetno do rotacijskega zdrsa na višini 570 m (Kočevar in Ribičič, 2002b). Plaz, ki je ob sprožitvi imel odlomni rob na koti približno 570 m, se je nato razširil do kote 630 m, splazeli material pa je stekel kot blatni tok in se ustavil 400 m nižje na koti 460 m (slika 12.1). Zaradi dodatne obtežbe nižje ležečih mas, se je vznožje plazú destabiliziralo in steklo v dolino s hitrostjo 60-100 m/dan.



Slika 12.1: Mehanizem prehoda plazenja v viskozni blatni tok (Ribičič M., 2002b).

Figure 12.1: Transition of sliding mass into viscose mud flow (Ribičič M., 2002b).

Leta 2001 je zaradi večje količine padavin prišlo do ponovnih premikov na plazú. Premike lahko razvrstimo na:

- Splazitve kot posledice strmih odlomnih robov in degradacije fliša na stranskih robovih plazú in na zgornjem odlomnem robu. V celoti je nastalo približno 15 plazov. Največji med njimi je imel volumen približno 80.000 m³ (Benko, 2011).
- Plazenje osrednjega dela plazú kot posledica kopičenja materiala v osrednjem delu plazú.

- Pojav blatnih in drobirskih tokov kot posledica zastajanja vode na terasah. Voda je razmočila del materiala, ki se je spremenil v židko maso. Navlažen material je stekel v dolino s hitrostjo nekaj metrov na sekundo in tudi dosegel vas Lokavec (Kočevar in Ribičič, 2002).

V suhih obdobjih plaz Slano blato miruje. Na površini se pojavi suha skorja debeline približno 1 m (Logar et al., 2005). Suha skorja nakazuje na razvoja sukucije v plazini in na njene ugodne vplive na umirjanje plazuz.

Leta 2002 so se pričela sanacijska dela, ki so obsegala:

- gradnjo gradbiščne ceste,
- zajetje izvirov na zgornjem delu plazuz,
- izravnavo površine, tako da voda ne more več zastajati na terasah,
- izdelavo drenaž in odvodnega kanala,
- izgradnjo kamnite pregrade za zadrževanje blatnih tokov,
- odvoz 230 000 m³ materiala iz spodnjega dela plazuz,
- izgradnjo moznikov-vodnjakov,
- izgradnjo dveh pregrad na plazuz za ublažitev naklona brežin in preprečitev nadaljnje erozije.

Kljub opisanim ukrepom se je površina plazuz nezadržno širila. Zlasti širjenje plazuz v zaledje, proti narivnemu kontaktu karbonatne kamnine in fliša, bi lahko imelo za Vipavsko dolino katastrofalne posledice. Zato je profesor B. Majes iz UL FGG predlagal unikatno rešitev, po kateri bi arteške tlake, ki izvirajo iz karbonatne strukturne kadunje in so jih šele 4 leta kasneje opisali Placer et al (2008), znižalo z globokimi vodnjaki, ki bi delovali hkrati kot mozniki za zadrževanje plazine. Oba ukrepa prispevata k večji varnosti širjenja plazuz v smeri kritičnega narivnega kontakta, hkrati pa tudi preprečujeta premikanje splazelih mas proti osrednjemu delu plazuz (Majes et al., 2005).

Med gradnjo prvih dveh vodnjakov so nastopile obilne padavine. Ker so bili vodnjaki še v fazi izkopa, je prišlo do njihovega premika za 20 m proti dolini. Po tem dogodku se je spremenila tehnologija gradnje vodnjakov – iz klasične gradnje so prešli na zavarovanje izkopa z Benotto piloti, povečalo pa se je tudi število vodnjakov (Majes et al., 2005). Gradnja vodnjakov v 1. vrsti se je končala leta 2007. (Logar et al., 2005) poročajo o znatnih količinah vode, ki so vtekale v prva dva zgrajena vodnjaka. Ocena količine vod je bila 15 m³/dan na vodnjak.

Leta 2007 se je pričel vzpostavljati sistem opazovanja sukucije na plazuz in gladin vode v vodnjakih. Sistem opazovanja plazuz se je z leti izpopolnjeval in danes vsebuje 3 TV kamere za vizualno opazovanje plazuz in detekcijo pomikov, 2 vremenski postaji, 3 karakteristične profile merjenja sukucije (vzpostavljen 2007), merilec gladine vode v vodnjaku in v zemljini nad vodnjaki (vzpostavljen 2008) ter površinske geodetske točke (vzpostavljene 2011). Geodetske točke v letu 2011 so bile vzpostavljene v okviru te doktorske naloge.

Možnost doprinosu sukucije k stabilnosti plazuz je v Sloveniji prvič obravnavala Petkovšek (2006) v svoji doktorski nalogi. Z laboratorijskimi raziskavami je pokazala na ugodne vplive sukucije na strižne karakteristike zemljin ter na to, da so površinski premiki plazuz lahko tudi posledica upada sukucije. Na tako razmišljanje so jo pripeljali podatki terenskih opazovanj, ki so kazali, da se plaz giblje kot blatni tok tudi v času, ko ni bilo padavin. Pred letom 2006 na UL FGG še ni bilo primerne merilne opreme, s katero bi lahko neposredno merili vplive sukucije na trdnostne karakteristike zemljine. Zato se je vplive

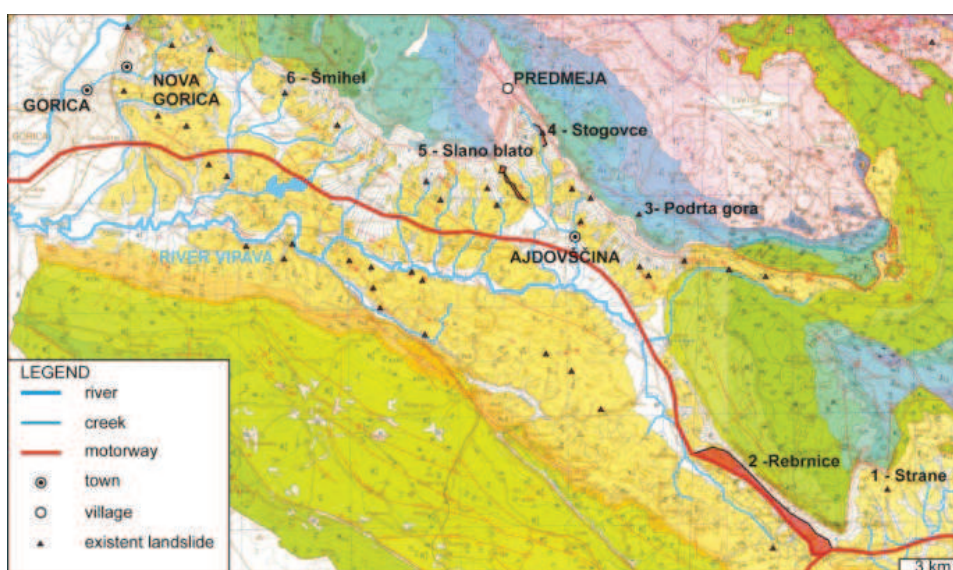
sukucije ocenjevalo posredno, preko nedrenirane trdnosti. Kmalu po predstavitvi rezultatov raziskav (Petkovšek, 2006) so se na plazu vgradili merilniki sukucije. V času spremljanja sukucije na plazu so meritve pokazale, da se je ta pogosto približala vrednostim, pri katerih plaz ne izkazuje zadostne varnosti po ocenah UL FGG iz leta 2006 in bi moral drseti.

V letu 2009 je bila izvedena pozidava slapu na potoku Grajšček v obsegu 50% predvidenih del. Od tega leta dalje se na plazu niso več izvajala nobena investicijska ali vzdrževalna dela. V drugi polovici leta 2011 je bila izvedena zasaditev dreves. Od leta 2009 do danes se je nad vodnjaki plaz razširil, količina prirasta količine nestabilnih mas je ocenjena na 80.000 m³. Od izgradnje vodnjakov se je odlomni rob premaknil za približno 50 m navzgor, vendar pa meritve kažejo, da vodnjaki mirujejo, znatno pa se je zmanjšala tudi količina materiala, ki leze od vodnjakov navzdol.

Za sanacijo plazu Slano blato se je od pričetka izvajanja sanacijskih del do sedaj porabilo več kot 8 milijonov evrov (Benko, 2011).

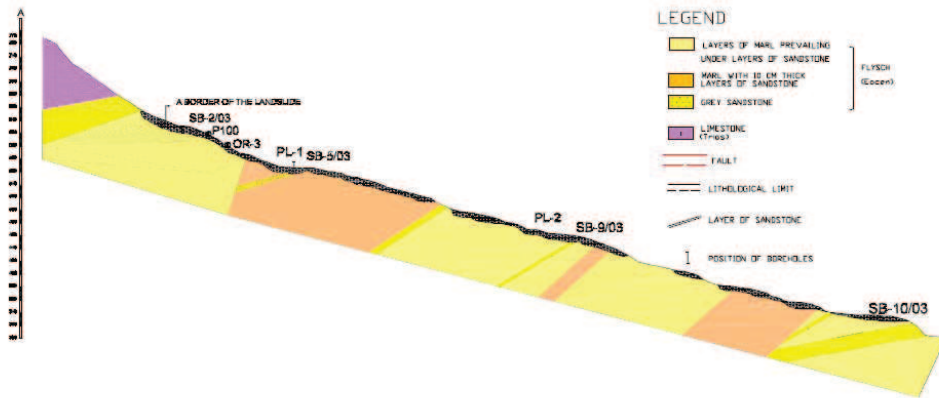
12.2 Geološki opis plazu Slano Blato

Plaz Slano blato se nahaja na narivnem kontaktu mezozojskih karbonatnih kamnin Trnovskega gozda na eocenski fliš Vipavske doline (slika 12.2). Flišne kamnine so močno nagubane in prepokane. Vpad plasti flišnega peščenjaka je 10° v pobočje na območju začetnega zdrsa plazu pa se nahaja tudi približno 20 m širok tektonski prelom z vpadom 55°–75° proti severozahodu (Kočevar in Ribičič, 2002) (slika 12.3). Pobočja okoli nariva so prekrita s podornimi bloki in melišči (Placer et al., 2008). Na flišni kamnini se nahajajo tudi večji splazeli bloki karbonatov iz roba Trnovskega gozda. Masiv Male gore je prav tako odtrgan od karbonatnih kamnin Trnovskega gozda (slika 12.4). Zdrs Male gore je ustvaril strukturno kadunjo, ki je sposobna zadrževati vodo (slika 12.5). Ob deževju se kadunja zapolni z vodo, ta pa se preko tektonskih razpok in flišnih peščenjakov preceja navzdol. Zato je ob narivnem kontaktu več izvirov in močvirnatih izravnav, ki so se nahajale na tem mestu pred splazitvijo plazu leta 2000.



Slika 12.2: Geološka karta Vipavske doline z označenimi plazovi.

Figure 12.2: Geological map of Vipava River valley with landslide locations.



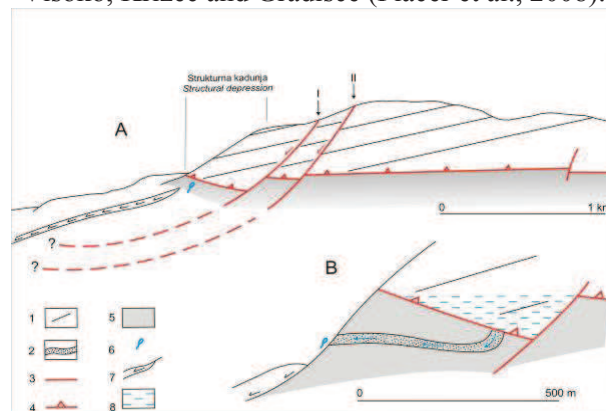
Slika 12.3: Geološki vzdolžni profil čez plaz Slano blato (Logar et al., 2005).

Figure 12.3: Geological longitudinal cross section of Slano blato landslide (Logar et al., 2005).



Slika 12.4: Poenostavljena geološka karta z označenimi gravitacijskimi bloki A-F, Mala Gora, Lukovec, Gola gorica, Visoko, Križec in Gradišče (Placer et al., 2008).

Figure 12.4: Simplified geological map with gravity blocks A-F, Mala Gora, Lukovec, Gola gorica, Visoko, Križec and Gradišče (Placer et al., 2008).

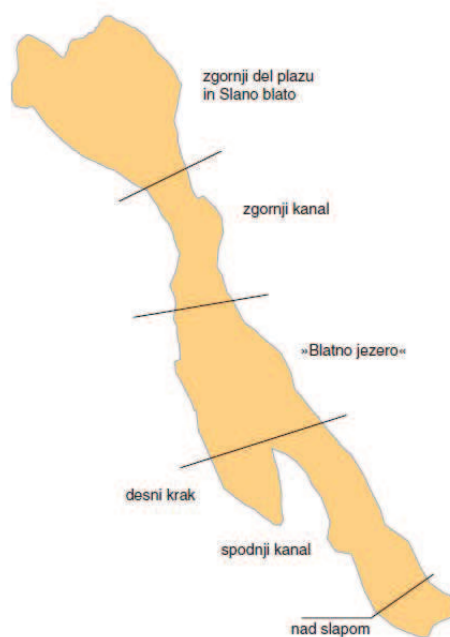


Slika 12.5: Shematski geološki profil preko Velikega Modrasovca in Male Gore ter detajl strukturne kadunje (Placer et al., 2008).

Figure 12.5: Schematic geologic section across Veliki Modrasovec and Mala Gora and detail from structural depression (Placer et al., 2008).

Plaz Slano blato je kompleksen plaz. Po Ribičiču (2002) ga lahko razdelimo na naslednja glavna območja:

- Zgornji del plazu – mesto sprožitve plazu jeseni 2000 ter lokacija vodnjakov. Na odlomnih robovih se tvorijo manjši plazovi.
- Zgornji kanal – zemeljske mase so se v tem delu razmočile in stekle kot blatni tok.
- Blatno jezero – mesto kjer so se zadržali blatni tokovi leta 2000 in 2001. Teren na blatnem jezeru je skorajda horizontalen. Pred splazitvijo so bili na tem mestu zaznani arteški pritiski (Kočevar in Ribičič, 2002b).
- Spodnji kanal. Kadar se je na blatnem jezeru nabralo več kot 170 000m³ materiala, je ta začel odtekati po spodnjem kanalu navzdol (Ribičič, 2002).



Slika 12.6: Deli plazu Slano blato (Ribičič, 2002).

Figure 12.6: Parts of Slano blato landslide (Ribičič, 2002).

12.3 Terenske preiskave na plazu Slano blato

Terenske preiskave na plazu Slano blato, izvedene po letu 2001, lahko razdelimo v dva ločena tematska sklopa:

- na začetne raziskave, izvedene za potrebe razumevanja geoloških in geotehničnih razmer in načrtovanje sanacijskih ukrepov. Te raziskave so potekale v obdobju 2001 – 2004. V letu 2001 je bila izvedena prva serija geoloških raziskav z 10 vrtinami, leta 2003 pa druga serija geoloških, geofizikalnih in hidrogeoloških raziskav s 13 vrtinami in petimi vgrajenimi inklinometri),
- na ukrepe, vezane na vzpostavitev nadzora nad gibanjem plazu in učinkovitostjo izvedenih sanacijskih ukrepov. Ti ukrepi so se izvajali postopno in sukcesivno z geološkimi raziskavami in sanacijskimi ukrepi vse od leta 2001 dalje.

V okviru geološko geotehničnih raziskav so se izvajale tudi:

- hidrogeološke meritve in vzorčenja vode, da bi se opredelilo izvor voda,
- geofizikalne raziskave, da bi se ugotovilo debelino plazine. Posebej je treba omeniti zaporedne geoseizmične raziskave v letih 2003 in 2004, ki so pokazale, da se fliš v podlagi mehča in
- terestrično lasersko skeniranje (LIDAR skeniranje) plazu, s katerim se je ocenilo premike površine plazu.

Prvotni opazovalni sistem so sestavljali inklinometri, piezometri in geodetske točke, ki pa so bili zaradi velikih premikov kmalu porušeni. Zato se je, predvsem po zaslugi poveljnika CZ Ajdovščina, pričel na plazu vzpostavljati površinski opazovalni sistem z video kamerami in vremensko postajo. Leta 2007 so bili na plazu vgrajeni prvi merilniki sukije.

Geološke preglede in kartiranje površinskih sprememb je izvajal dežurni geolog enkrat mesečno.

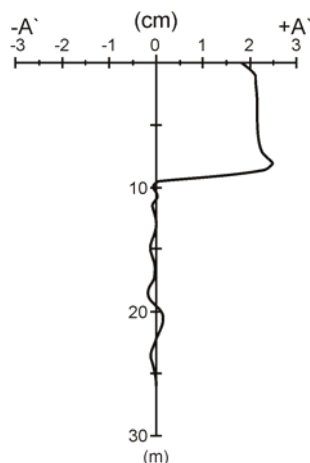
12.4 Rezultati starega opazovalnega sistema in terenskih meritev

Na območju plazu so bili vgrajeni 4 inklinometri in več geodetskih točk. Dva inklinometra sta bila vgrajena na odlomnih robovih takratnega plazu, en inklinometer je bil vgrajen v sredino plazu približno na lokaciji današnjih vodnjakov, en inklinometer pa je bil lociran na spodnjem koncu spodnjega kanala. Eden izmed inklinometrov na odlomnem robu je izkazoval drsno ploskev na globini 4 m, inklinometer na mestu današnjih vodnjakov pa drsno ploskev na globini 10 m (slika 12.7). Ostala dva inklinometra nista izkazovala deformacij terena. Inklinometra, ki sta izkazovala deformacije, sta bila uničena konec leta 2003 (Fifer Bizjak in Zupančič, 2009).

Fifer Bizjak in Zupančičeva (2009) poročata tudi o meritvah pomikov geodetskih točk. Prve točke so bile vgrajene junija 2001 in so bile uničene ob večjih premikih – blatnem toku - septembra 2001. Takrat izmerjen največji pomik geodetske točke je bil 150 m. V letu 2003 se je ponovno vgradilo geodetske točke, ki so v zimi 2003-2004 izkazovale pomike 12-16 m. Benko (2011) poroča, da je bila največja hitrost premikanja plazu zabeležena leta 2000, 90 m/dan.

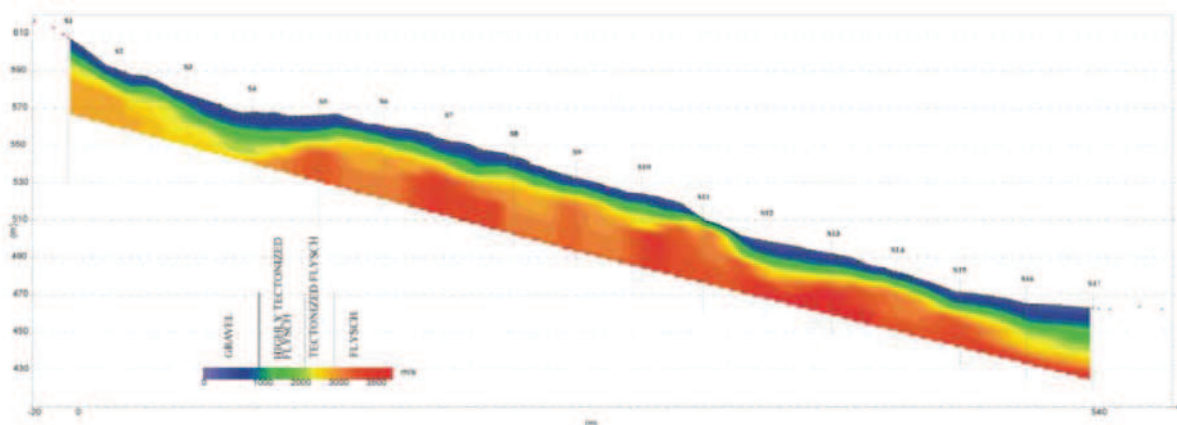
Leta 2001 so z 9 terenskimi meritvami vodoprepustnosti izmerili vodoprepustnost flišne kamnine - meljevca in peščenjaka ($k=10^{-7} - 10^{-8}$ m/s), tektonsko predrobljenega meljevca in peščenjaka ($k=10^{-5} - 10^{-6}$ m/s) in gramoza z glino (plazine) ($k=10^{-3} - 10^{-4}$ m/s) (Logar et al., 2005). Poročilo hidrogeoloških raziskav iz leta 2001 pa navaja za plazino vodoprepustnost ($k=10^{-6} - 10^{-7}$ m/s) za ostala dva sloja pa so podatki približno enaki (Lapanje et al. 2001).

V letu 2003 in 2004 so zaporedne geoseizmične meritve identificirale kontakt med plazino in flišno podlago ter identificirale poglobljanje tega kontakta s časom (Logar et al., 2005) (slika 12.8).



Slika 12.7: Meritve na inklinometru B5 na mestu današnjih vodnjakov do uničenja inklinometra (Fifer Bizjak in Zupančič, 2009).

Figure 12.7: Inclinometer B5 result on the location of today's dowels, before it was destroyed (Fifer Bizjak and Zupančič, 2009).



Slika 12.8: Hitrost potresnih valov na vzdolžnem profilu plazu Slano blato (Logar et al., 2005).

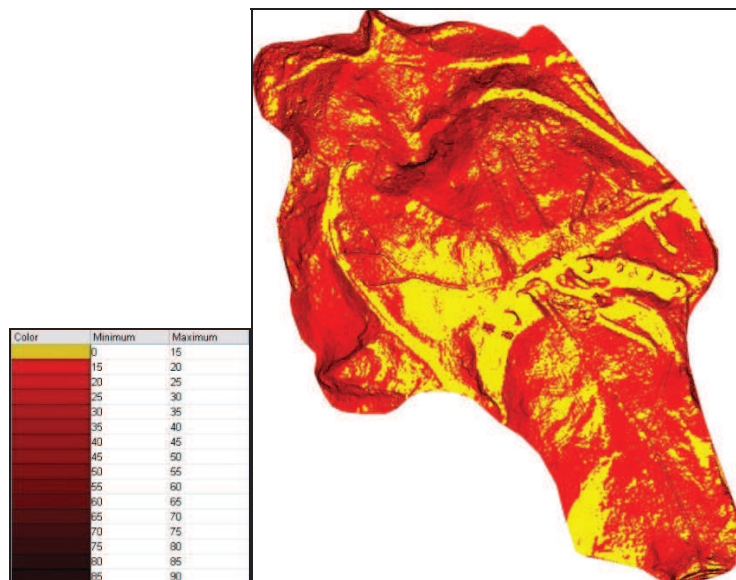
Figure 12.8: Seismic wave velocities at longitudinal profile of Slano blato landslide (Logar et al., 2005).

12.5 Rezultati novega opazovalnega sistema in LIDAR skeniranje plazu

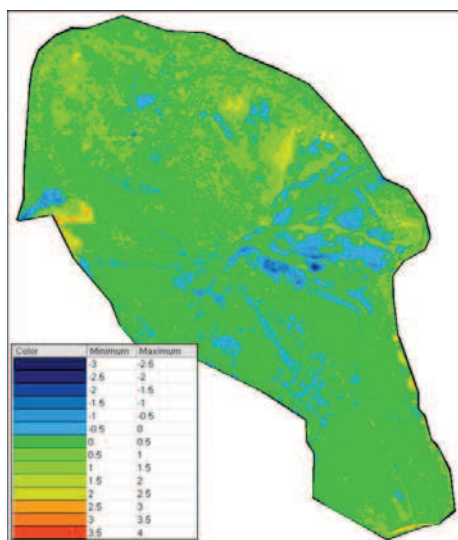
Leta 2005 so bile na lokaciji plazu nameščene tri kamere za opazovanje pomikov plazu. Prva kamera je locirana ob vodnjakih in omogoča opazovanje zgornjega dela plazu. Druga kamera je locirana na lokaciji Blatnega jezera, tretja pa na dnu spodnjega kanala nekaj deset metrov nad Slapom. Četrta kamera je postavljena izven plazu ob pregradi pri vasi Lokavec.

Leta 2007 se je dvakrat premerilo zgornji del plazu in zgornji kanal z LIDAR skeniranjem (osebni arhiv dežurnega geologa Marka Kočevarja, Kogoj et al., 2007). Prva meritev je bila opravljena februarja, druga pa oktobra 2007. S pomočjo skeniranja plazu se je lahko izrisalo detajlno karto plastnic, 3D model plazu, karto naklonov (slika 12.9), ocenilo pomike med obema ploskvama (slika 12.10) ter iz vrednotilo pomike značilnih objektov na plazu (slika 12.11). Ocena spremembe volumna plazu (razlike med ploskvami) kažejo na zanemarljive premike ploskev v zgornjem kanalu, na posedke v območju vodnjakov ter na priraste volumna ob zgornjem in stranskem odlomnem robu plazu. Na podlagi skeniranja plazu je bilo ocenjeno povečanje volumna plazine za ca 20 000 m³. Premike

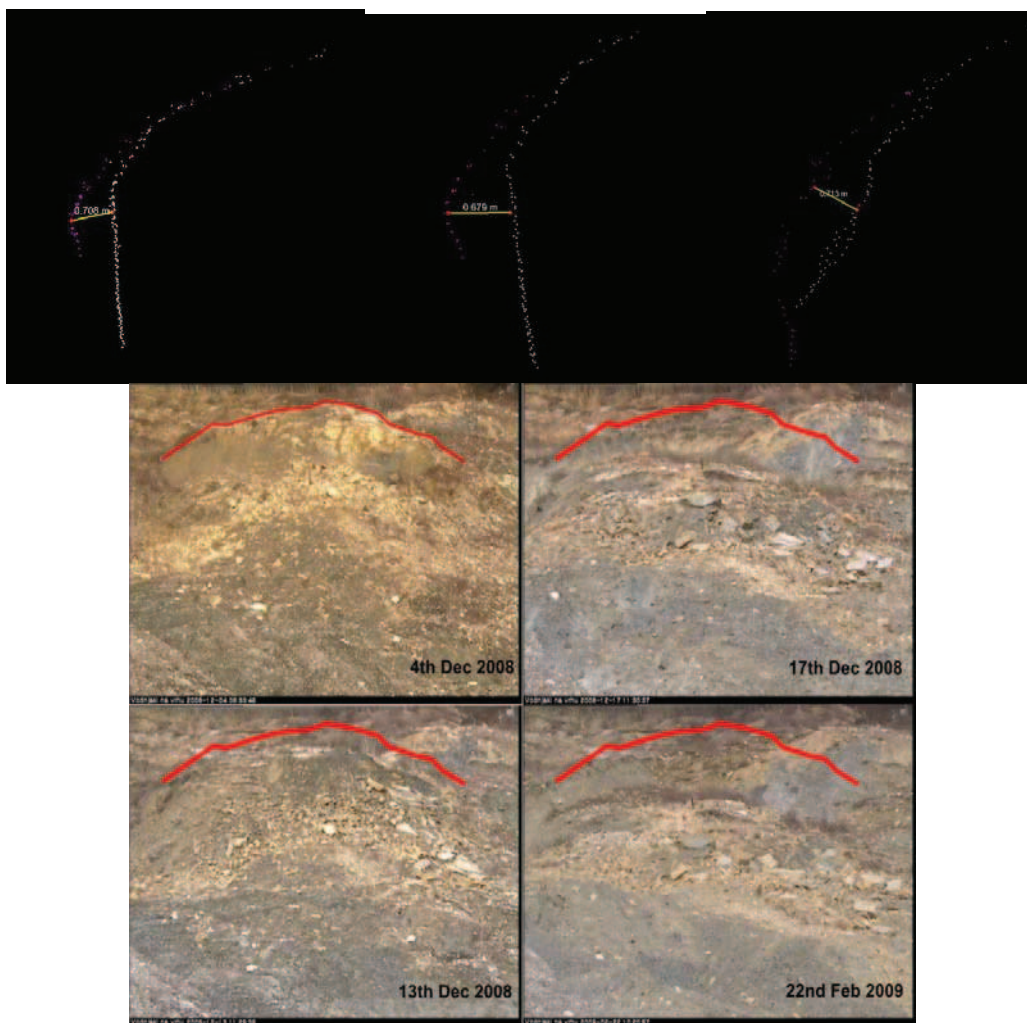
značilnih točk se je ocenilo na mestu flišne skale na zgornjem odlomnem robu plazu, na jašku pod vodnjaki ter na mestu izgradnje pregrade na dnu zgornjega kanala. Na skali se je ugotovilo pomike do 70 cm, na jašku približno 25 cm ter na mestu pregrade 54 cm. Na mestu pregrade so bili pomiki predvsem vertikalni (dvižki), na obeh ostalih dveh mestih pa predvsem horizontalni.



Slika 12.9: Karta naklonov (arhiv Marka Kočevarja).
Figure 12.9: Map of slopes (archive of Marko Kočevar).



Slika 12.10: Karta razlik ploskev (Kogoj et al., 2007).
Figure 12.10: Map of differences of two slopes (Kogoj et al., 2007).



Slika 12.11: Pomik skale na zgornjem odlomnem robu, ki ga je zaznalo LIDAR skeniranje plazu (arhiv Marka Kočevarja) in pomiki, ki so ga zaznale kamere dva meseca kasneje.

Figure 12.11: Movements of rock on main scarp as detected by LIDAR scanning and movements observed by TV cameras 2 months later.

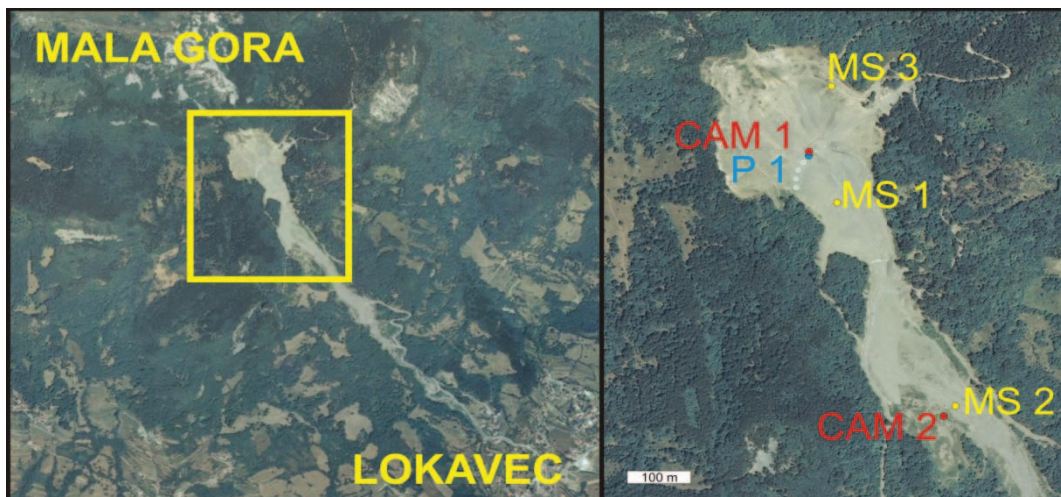
12.6 Nova opazovanja, vzpostavljena v letih 2007 - 2011

Leta 2007 in 2008 so bile na plazu 3 merske točke opremljene z merilci sukucije. Leta 2008 sta bila vgrajena dva merilca tlakov vode; en BAT piezometer je bil vgrajen na kontaktu podlaga plazina, približno 6 m za vodnjaki, en merilec pa je bil vgrajen v osrednjem vodnjaku (2008). Leta 2011 je bilo na plazu vgrajenih 6 geodetskih točk.

12.6.1 Meritve sukucije

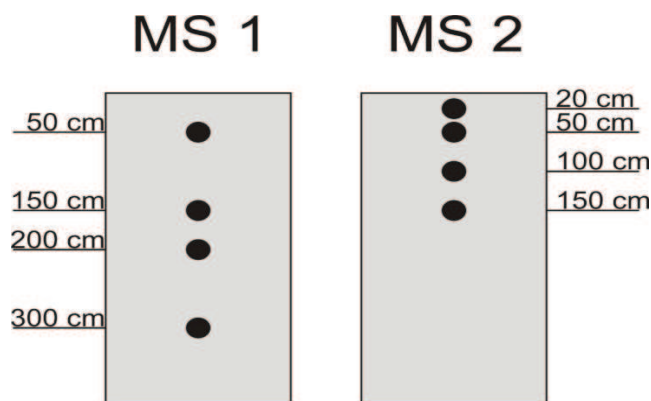
V območju plazu smo izbrali dve karakteristični točki za opazovanje sukucije. Prva točka (MS1) se nahaja v območju zgornjega kanala, kjer je naklon pobočja približno 15°, debelina plazu pa je približno 7-9 m. Druga točka (MS2) se nahaja na območju Blatnega jezera, kjer so se odložili blatni tokovi v skoraj vodoravni ravnini. Tretja točka (MS3) pa je vgrajena v odlomni rob plazu in se ne nahaja v plazini, temveč v flišni kamnini. Na vsakem merskem mestu smo vgradili po 4 merilce sukucije in razen v prvem primeru tudi 4 merilce temperature zemljine. Globino merilcev smo sprotno

prilagajali stanju zemljine in višini podzemne vode, ugotovljene med vgradnjo merilcev, saj so se merilniki sukcije vgrajevali le nad nivo podzemne vode. Lokacije merskih mest in položaje senzorjev prikazujta sliki 12.12 in 12.13. Za merjenje sukcije smo izbrali Watermark senzorje, vsi senzori so bili vgrajeni v ročno izvrtane vrtnice.



Slika 12.12: Lokacija kamer (CAM), merilcev sukcije (MS) in piezometra (P).

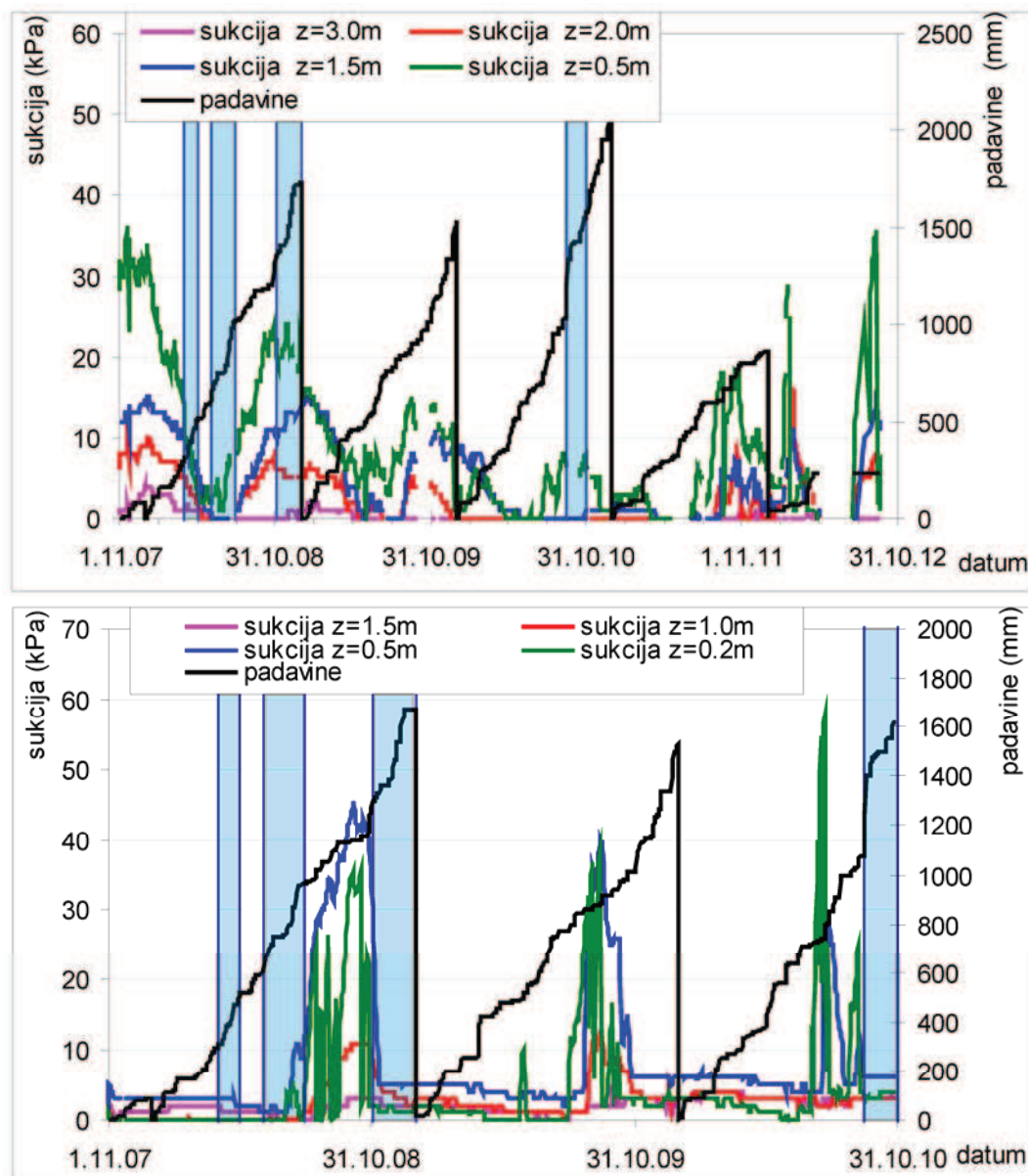
Figure 12.12: Locations of TV cameras (CAM), suction measuring station (MS) and piezometers (P).



Slika 12.13: Mesta vgradnje merilcev sukcije in temperature na lokaciji 1 in 2.

Figure 12.13: Suction and temperature profiles at suction measuring station 1 and 2.

Rezultati meritev sukcije na lokaciji MS1 ter na lokaciji MS2 so predstavljeni na sliki 12.14. Jasno je izraženo nihanje sukcije v odvisnosti od letnega časa. Obdobja z nizko sukcijo niso nujno v zimskem obdobju, ampak so pogojena z razporeditvijo padavin. Sukcija v zemljini se odziva na padavine z določenim časovnim zamikom. Večje spremembe so v pripovršinskih slojih.



Slika 12.14: Meritve sukcije na lokaciji MS1 (zgoraj) in MS2 (spodaj).

Figure 12.14: Suction measurements on location MS1 (upper) and MS2 (lower).

Na mestu MS2 opazujemo, da je sukcija na globini 0,2 m nižja od sukcije na globini 0,5 m. To je lahko ali posledica različne zrnivosti zemljine ali pa razpok na površini blatnega jezera. Na globini 1,5 m je sukcija ves čas konstantna. To pomeni, da razušitvene razpoke ne dosežejo te globine. Zaradi počasnega odziva na padavine se sukcija bolj odziva na deževna obdobja kakor na posamezne padavinske dogodke. To je posledica nizke vodoprepustnosti plazine. V mokrih obdobjih je sukcija na obeh merskih profilih praktično enaka 0, verjetno se v profilu pojavi celo pozitivni porni tlak, a ga vgrajeni senzori ne merijo. V bolj suhih delih leta sukcija počasi narašča.

Mersko mesto MS2 izkazuje sukcijo le v poletnih mesecih, ko je najmanj padavin in je evaporacija največja. Na MS1 vidimo, da se je v obdobju oktober 2007 - december 2010 sukcija konstantno zmanjševala, v letu 2011 pa je ponovno pričela naraščati. To je posledica padavin, ki so bile v obdobju 2007-2010 nad dolgoletnim povprečjem, v letu 2011 pa izrazito podpovprečne.

Povprečno globino podzemne vode v točki MS1 lahko ocenimo na 3 m, kar je skladno z opazovanji Lapanje et al. (2001). Na lokaciji MS2 pa lahko ocenimo gladino podzemne vode na 1 m.

Na lokaciji MS3 prihaja do hipnega zmanjšanja sukcije ob padavinskih dogodkih, temu pa sledi počasno naraščanje sukcije. Vzrok za tako obnašanje je lahko v slabo zatesnjeni vrtini ali v razpokah v flišni kamnini. Meritve v MS 3 zato niso reprezentativne.

Podatki geoloških opazovanj kažejo, da se je večina masnih premikov zgodila v obdobju nizke sukcije. Do porušitve flišnega bloka, prikazanega na sliki 12.11 je prišlo v času, ko je bila sukcija v zemljini okoli 20 kPa. Ta porušitev je posledica mehčanja fliša in ni povezana z gibanjem vode v plazini.

12.6.2 Geodetske meritve na površini

Leta 2011 smo na plaz vgradili 6 geodetskih točk za opazovanja z GPS merilci. Lokacije točk so prikazane na sliki 12.15. Izvedli smo tri meritve: junija in septembra 2011 ter januarja 2012.

Novembra 2011 sta bili zaradi pogozdovalnih del na lokaciji plazu uničeni dve točki (1 in 4). Med junijem 2011 in julijem 2012 točka 3 ob MS1 izkazuje 6 mm premikov, točka 2 izkazuje premik velikosti 1.1 cm, točki 5 in 6 izkazuje 10.7 in 4.6 cm pomikov. Vsi pomiki so bolj ali manj usmerjeni po padnici pobočja. Točki 5 in 6 sta na pobočju, za vodnjaki, kjer je naklon pobočja večji od 20°.

Terenska opazovanja smo izvajali v obdobju, ko so bile padavine pod dolgoletnim povprečjem. Zato so opravljene meritve le kazalnik stanja v določenem času in niso reprezentativne za povprečno obdobje.

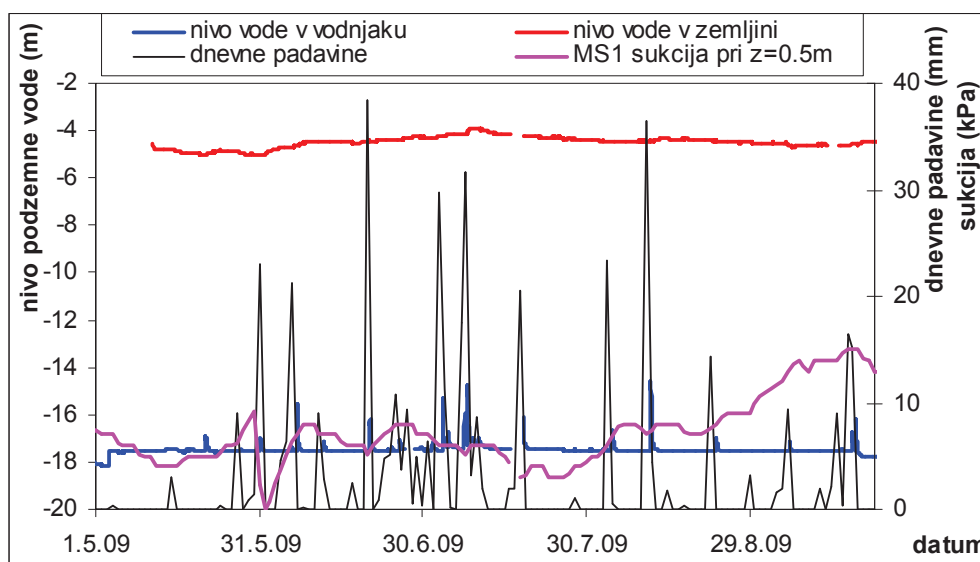


Slika 12.15: Lokacija geodetskih točk in pripadajoči pomiki točk.

Figure 12.15: Locations of geodetic points and associated movements.

12.6.3 Gibanje vode v vodnjaku

Na sliki 12.16 so prikazani rezultati zveznih meritev gladine vode v osrednjem vodnjaku ter v piezometru približno 6 metrov nad vodnjakom. Vidimo izrazita nihanja v nivoju vode v vodnjaku s padavinskimi dogodki. Nivo podzemne vode se počasi in le malo spreminja. Hitrost spreminjanja nivoja vode v piezometru v zemljini je podobna hitrosti spreminjanja sukcije na lokaciji merske točke MS1.



Slika 12.16: Nihanje nivoja vode v vodnjaku in v zemljini za vodnjakom.
Figure 12.16: Fluctuation of water level in dowel and in soil behind dowel.

12.6.4 Primerjava med pomiki plazu in sukcijo

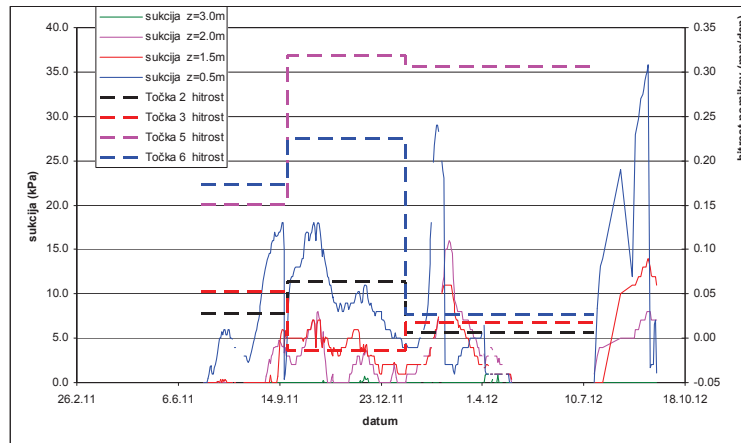
Na sliki 12.17 so prikazani rezultati hitrosti pomikov in meritev sukcije v točki MS1. Iz dobljenih rezultatov vidimo, da je hitrost pomikov točk 5 in 6, ki sta nad vodnjaki, večja od hitrosti točk 2 in 3, ki sta pod vodnjaki. Hitrosti v točki 5 in 6 so višje v obdobju z višjo sukcijo, kar je v nasprotju s pričakovanji. V primeru točk 2, 3 in 4 dodaten problem predstavlja tudi smer pomikov, ki je posledica premajhne natančnosti (ca 10. mm). V zgornjem kanalu plaz leze s hitrostjo 2-10 mm/leto.

Za kvalitetno povezavo med pomiki plazu in sukcijo na terenu bi potrebovali večletna opazovanja z različnimi vremenskimi pogoji in z bolj natančnimi meritvami. V točki 12.6.2 smo že omenili, da so vse meritve opravljene v izjemno sušnem letu, ki ni reprezentativno.

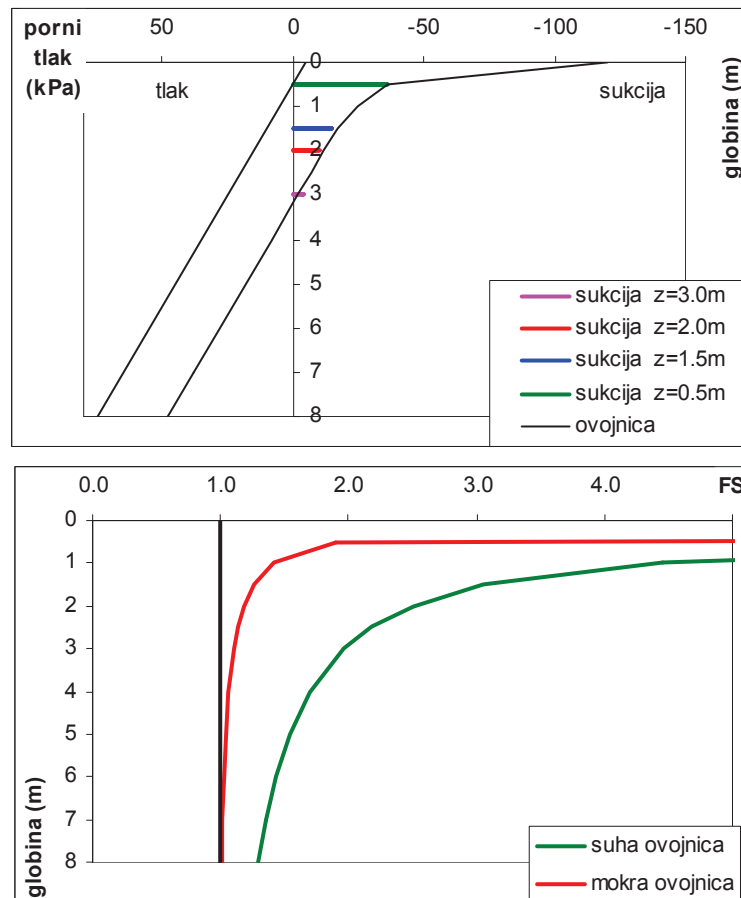
12.6.5 Ovojnica sukcije/pornih tlakov

Iz merjenih podatkov sukcije lahko (slika 12.14) lahko izrišemo ovojnico sukcije oz. pornih tlakov. Z ovojnico dobimo prikaz razporeditve tlakov po globini zemljine za najbolj sušno in najbolj mokro obdobje (slika 12.17). Vidimo, da je za primer sušnega obdobja sukcija različna od navidezno stacionarnega stanja samo do globine 1.5 m. Na večjih globinah pa je gradient približno enak 1. Ovojnico za mokro obdobje težko izrišemo, saj nam manjkajo podatki o pornih pritiskih oziroma o gladini podzemne vode v zemljini. Izrisana ovojnica je tako le približna. Po enačbi 11.2 lahko

izračunamo tudi faktor varnosti za različne globine plazine (slika 12.18). Minimalni faktor varnosti je v mokrem obdobju 1,01, v suhem obdobju pa 1,29. Minimalni faktor varnosti je ocenjen iz ocene pozitivnih pornih tlakov, ki jih na dani lokaciji ne merimo, ocene povprečnega naklona zgornjega kanala (15°) in strižnega kota 27° .



Slika 12.17: Spreminjanje hitrosti lezenja plazju in sukcije s časom.
Figure 12.17: Change in creep rate and suction with time.



Slika 12.18: Ovojnica pornih tlakov in spreminjanje faktorja varnosti z globino.
Figure 12.18: Pore pressure envelope and variation of factor of safety with depth.

13 LABORATORIJSKE PREISKAVE NA PLAZINI IZ PLAZU SLANO BLATO

13.1 Uvod

V tem poglavju so opisane meritve opravljene na UL FGG, ki smo jih izvedli za določitev vplivov sukucije na strižno trdnost, volumenske deformacije in lezenje pri konstantni obremenitvi plazine iz plazu Slano Blato. Ker smo s podatkov terenskih meritev ugotovili, da je območje sukucije med 0 in 100 kPa, smo se pri študiji vplivov sukucije na zgoraj našteje lastnosti omejili predvsem na to območje. Za potrebe doktorata smo tako izmerili retencijsko krivuljo ob različnih pogojih totalne napetosti. Pri tem smo si pomagali z različnimi postopki, ki bodo opisani v poglavju 13.2. Prav tako smo izmerili vpliv sukucije na strižno trdnost ob kontroliranih pogojih sukucije in hitrost lezenja zemljine ob znanih pogojih sukucije in totalne napetosti. Spremljajoče laboratorijske preiskave plazine so obsegale še indeksne preiskave, preiskave stisljivosti in strižne trdnosti v zasičenih pogojih. Pri preiskavah smo se opirali na standarde, ki jih podajamo v preglednici 13.1.

Večji del meritev predvsem na zasičeni zemljini povzemamo po drugih avtorjih in niso bile opravljene v sklopu te naloge (Majes et al. 2002, Logar et al, 2005, Petkovšek 2006, Petkovšek et al. 2009). Za potrebe izdelave doktorske disertacije so bile opravljene preiskave samo na vzorcu iz leta 2010. Avtor naloge pa je v večini preiskal tudi vzorce iz leta 2005 in 2007.

V tem poglavju so predstavljeni samo manj znani merski postopki in rezultati laboratorijskih preiskav. Povezave med posameznimi preiskavami in posledice določenih preiskav pa so podane v poglavju o vrednotenju preiskav.

Preglednica 13.1: Pregled uporabljenih standardov.

Table 13.1: Overview of used standards.

Ugotavljanje vlažnosti, w (%)	SIST/ISO/TS 17892-1:2004
Ugotavljanje gostote drobnozrnatih zemljin, ρ , ρ_d (t/m^3)	SIST/ISO/TS 17892-2:2004
Ugotavljanje gostote zrn - Metoda s piknometrom	SIST/ISO/TS 17892-3:2004
Ugotavljanje zrnastostne sestave	SIST/ISO/TS 17892-4:2004
Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem	SIST/ISO/TS 17892-5:2004
Preskus s konusom	SIST/ISO/TS 17892-6:2004
Enosni tlačni preskus drobnozrnatih zemljin	SIST/ISO/TS 17892-7:2004
Konsolidiran triosni tlačni preskus na z vodo zasičenih zemljinah	SIST/ISO/TS 17892-9:2004
Neposredni strižni preskus	SIST/ISO/TS 17892-10:2004
Ugotavljanje prepustnosti s konstantnim in spremenljivim hidravličnim padcem	SIST/ISO/TS 17892-11:2004
Atterbergove meje plastičnosti, w_p (%), w_L (%)	SIST/ISO/TS 17892-12:2004
Določitev vrednosti metilen modro, MBf (g/kg)	SIST EN 933-9:2009
Meja krčenja, w_s (%)	ASTM D4943-02
Določitev adsorpcije vode po Enslinu, w_A (%)	DIN 18 132:1995-12
Meritve sukucije s psihrometrom WP4-T	navodila proizvajalca opreme
Meritve sukucije z metodo izhlapevanja (Hyprop)	navodila proizvajalca opreme

13.2 Opisi postopkov in naprav

Preiskave v tej nalogi so bile opravljene na rekonstruiranih preizkušancih iz drobnih delcev (<0.063 mm). Vzorec intaktne plazine se je v laboratoriju mokro presejal in posušil v peči pri 105 ± 5 °C. Drobni delci so se nato navlažili z destilirano vodo do zelene vlage, pregnetli, pustili odležati vsaj 16 ur in vgradili v naprave. V kolikor se je postopek razlikoval od navedenega, je to dodatno omenjeno.

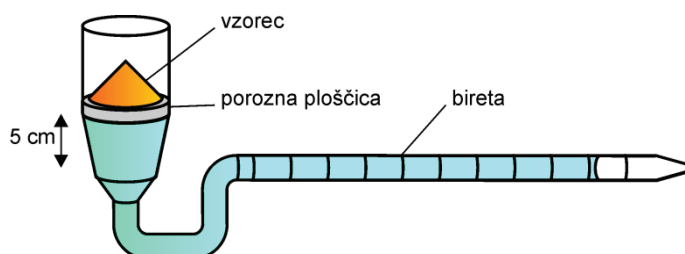
13.2.1 Meja krčenja

Z mejo krčenja določimo vlago, pri kateri zemljina preide v območje desaturacije. Pri sami preiskavi ne spremljamo sukcije ampak vlago in gostoto zemljine.

Preizkušance, navlažene na mejo židkosti, smo vgradili v posodice z znanim volumnom, jih nato sušili na zraku ter opazovali spreminjanje volumna. Volumen smo izmerili z metodo merjenja izpodriva vode (voska). Po določitvi volumna smo preizkušanec očistili voska in mu določili vlago. Za potrebe preiskave potrebujemo približno pet preizkušancev z izmerjenim volumnom pri različnih vlagah.

13.2.2 Vodovpojnost po Enslin-Neff postopku

Posušen vzorec zemljine se zdrobi in preseje skozi sito 0,4 mm (v naši preiskavi 0,25 mm). Pripravimo preizkušanec mase 1,00 g in ga vgradimo v napravo prikazano na sliki 13.1. Odčitavamo količino adsorbirane vode v določenih časovnih intervalih. Preiskava je končana, ko je vzorec vidno prepojen z vodo in se dva zaporedna odčitka medsebojno ne razlikujeta. Rezultat preiskave nam služi kot ocena za maksimalno možno vlago zemljine.



Slika 13.1: Enslin-Neff aparat.

Figure 13.1: Enslin-Neff apparatus.

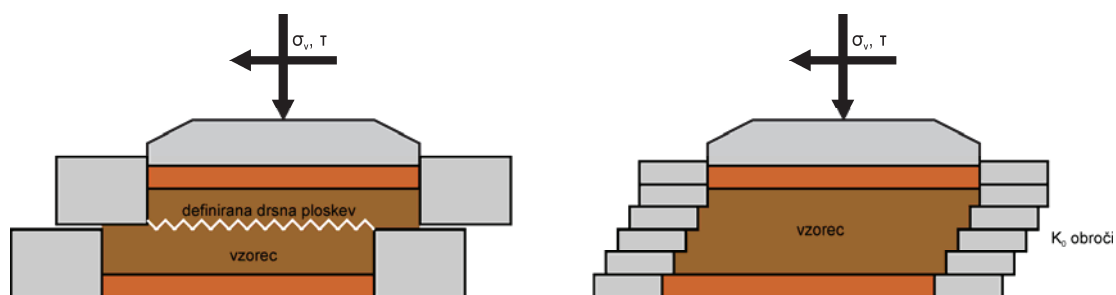
13.2.3 Sukcijski enostavni strižni aparat - SESA

V naslednjih poglavjih bom vrednotil preiskave opravljene v enostavnem strižnem aparatu, ki smo ga predelali za meritve sukcije. Ciklični strižni aparat DTA-136 proizvajalca Seiken (slika 13.2) je namenjen merjenju števila ciklov do pojava likvifikacije, merjenju strižnega modula pri deformacijah večjih od 10^{-4} (10^{-5}) ali tudi enostavni strižni preiskavi. Pri tem lahko preizkušanec zemljine obremenimo izotropno s celičnim tlakom ali pa ga obremenimo z vertikalno silo, bočno oporo preizkušancu pa nudijo K_0 obroči. K_0 obroči nudijo bočno oporo preizkušancu podobno kakor cilindrični nož (obroč) pri edometriški preiskavi, a ne nudijo nikakršnega strižnega opora v horizontalni (in vertikalni) smeri. Ker je zemljina bočno podprta z večjim številom K_0 obročev, se pri vsiljevanju bočnih deformacij deformira kakor zemljina pri čistem strigu. Zato taki napravi pravimo tudi enostavni strižni aparat. Razliko med direktnim in enostavnim strižnim aparatom podajamo na sliki

13.3. V osnovni verziji naprava meri: vertikalne pomike, horizontalne pomike, vertikalne sile, horizontalne sile, celični tlak, tlak porne vode in spremembe volumna preizkušanca. Vse razen vertikalnih pomikov in volumna pa lahko tudi reguliramo.



Slika 13.2: Enostavni strižni aparat DTA-136.
Figure 13.2: Simple shear apparatus DTA-136.



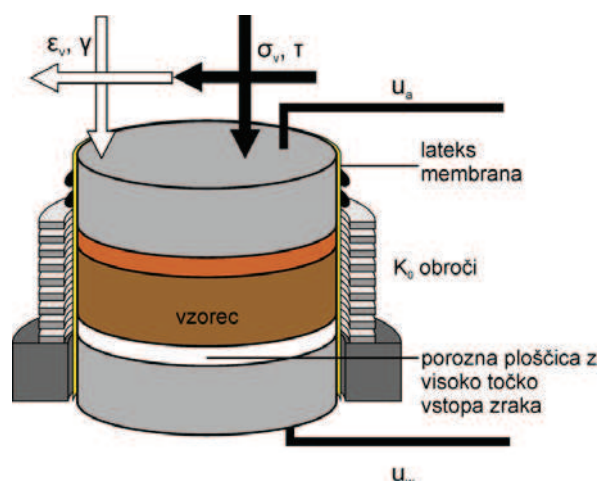
Slika 13.3: Direktni (levo) in enostavni strižni aparat (desno).
Figure 13.3: Direct (left) and simple shear apparatus (right).

Da bi omogočili merjenje sukcije na enostavnem strižnem aparatu, smo se odločili za predelavo obstoječe naprave. Pri predelavi je bilo potrebno predelati zgornjo in spodnjo kapo, preurediti cevi za zrak in vodo ter izdelati porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka. Zgornja in spodnja kapa sta bili predelani tako, da je omogočeno prepihanje kap in s tem odstranitev difuziranega zraka skozi porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka. Na spodnji kapi smo izdelali utore za silikonske tesnilne obroče (o-ringi), ki zagotavljajo zrakotesen stik med aluminijasto kapo in porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka. S predelavo cevi smo omogočili dovajanje zraka pri celičnem tlaku na zgornjo porozno ploščico. S tem smo si onemogočili izdelavo preiskav pri poljubnem razmerju vertikalne in bočne napetosti, vendar naprava omogoča uporabo K_0 postopka z vertikalno silo in K_0 obroči. Porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka smo izrezali iz večje plošče (16x16 cm) z visoko točko vstopa zraka podjetja Coors Inc. Površino porozne ploščice smo z brušenjem naredili bolj grobo in s tem zagotovili boljši kontakt med zemljino in porozno ploščico. V porozno ploščico smo izvrtali tudi dve luknji za pritrdilne vijake.

Z vijaki smo zagotavljali tlak med ploščico in spodnjo kapo ter s tem preprečili horizontalno premikanje ploščice in zagotavljali zrakotesnost stika. Točka vstopa zraka porozne ploščice je 1500 kPa.

Pred preiskavami je potrebno pripraviti napravo SESA za merjenje sukcije. Na sestavljeno spodnjo kapo in porozno ploščico z visoko točko vstopa zraka smo dovedli vakuum -92 kPa, izsesali zrak, nato pa smo porozno ploščico potopili v destilirano vodo. Zaradi razlike tlakov je voda pričela teči v porozno ploščico in jo pričela močiti. Po približno dveh urah se je porozna ploščica popolnoma prepojila z vodo. Da bi preverili dejansko tesnost sistema spodnja kapa – porozna ploščica in da bi preverili točko vstopa zraka porozne ploščice smo spodnjo kapo s ploščico vgradili v triosno celico (Triflex) in jo izpostavili razliki tlakov 500 kPa. V kolikor skozi sistem niso prihajali zračni mehurčki, je bila priprava spodnje kape s ploščico uspešna.

V napravi SESA merimo vertikalne pomike, horizontalne pomike, vertikalne sile, horizontalne sile (strižno silo na zgornji ploskvi), celični tlak, tlak porne vode in volumen izcejene vode (slika 13.4). Ker smo uporabljali K_0 postopek, smo uporabili še K_0 teflonske obroče, ki preprečujejo negativne bočne deformacije vzorca. Obtežbo smo nanašali preko vertikalne sile, v primeru sukcije 0 kPa pa so bili celični tlak, tlak na zgornji in tlak na spodnji porozni ploščici enaki. Med preiskavami smo zaradi zagotavljanja zasičenosti spodnje ploščice povišali tlak v celici in na vzorcu za 100 (meritev sukcije) oziroma 200 kPa (ostale preiskave). Ko pa smo na vzorcu zagotavljali sukcijo, smo na zgornjo porozno ploščico dovedli zrak pri celičnem tlaku. Sukcijo pa smo ustvarili z razliko tlakov med zgornjo in spodnjo porozno ploščico. Tako predelana naprava meri matrično sukcijo na osnovi osnotranslacijske metode.



Slika 13.4: Sukcijski enostavni strižni aparat - SESA.

Figure 13.4: Suction simple shear apparatus.

Postopki volumenskega obnašanja zemljine ali določitve strižne trdnosti se ne razlikujejo dosti od klasičnih postopkov (edometer in direktni strig). V primeru vzorcev, obremenjenih s sukcijo, je bilo potrebno dnevno preprihati prostor pod spodnjo porozno ploščico in izmeriti volumen zraka. Volumen zraka je enak volumnu vode, ki je stekla skozi prostor pod porozno ploščico, zmanjšanjem za težo vode, ki je iztekla iz tega prostora. V primeru bremenske stopnje s spreminjanjem sukcije smo ohranili vse ostale količine ter spremenili le tlak na spodnji porozni ploščici.

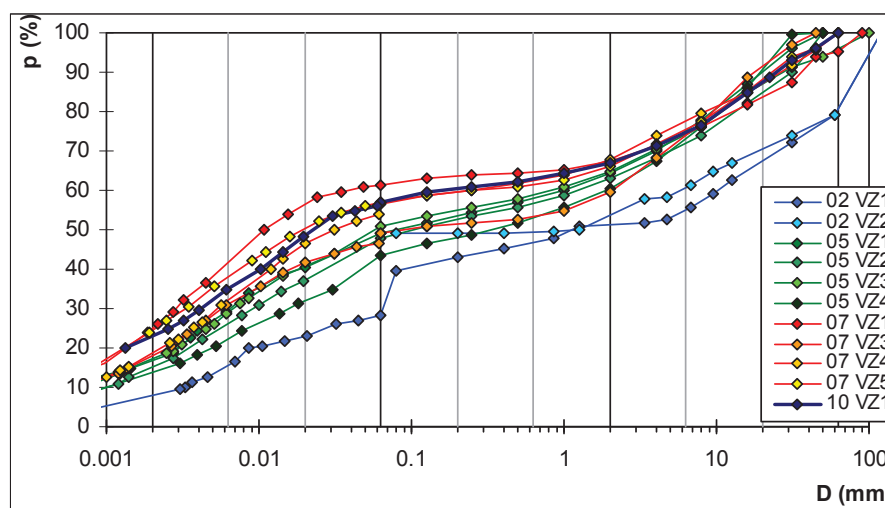
Med preiskavami lezenja zemljine smo namesto postopnega striženja preizkušanca hipno nanesli horizontalno obtežbo. Ker smo obtežbo nanašali preko pnevmatičnega bata, smo za zvišanje obtežbe potrebovali približno 6 s.

13.3 Predstavitev zemljine

Iz plazine na plazju Slano Blato v območju med vodnjaki in Blatnim jezerom je bilo od sprožitve plazju v letu 2000 odvzetih več zaporednih vzorcev zemljine. Med posameznimi vzorci so sicer manjša razhajanja, osnovne značilnosti pa ostajajo enake. Na sliki 13.1 prikazujemo krivulje zrnivosti plazine, določene v obdobju 2002-2010, v preglednici 13.2 pa so predstavljene indeksne lastnosti. Iz slike 13.5 vidimo, da je plazina sestavljena iz 50-60% drobne frakcije, 10-20% peska in 30-40% gramoza. Prav tako vidimo, da se zrnavostna sestava vzorcev s časom spreminja. Največ drobnih zrn imajo vzorci iz leta 2007 in 2010, kar nakazuje na možnost spreminjanja zrnavostne sestave plazine zaradi preperavanja flišnih zrn.

Drobna zrna so sestavljena iz mineralov illita/muskovita in klorita, visoka pa je tudi vsebnost karbonatov in kremenca (Petkovšek, 2006). V flišu so prisotni tudi sulfatni in sulfidni minerali na ploskvah šibkosti ter poogleneli ostanki rastlin. Po obnašanju se drobno frakcijo klasificira kot pusto (CL) do mastno glino (CH) z mejo židkosti od 45 do 50% in mejo plastičnosti od 18 do 20%.

Kemične analize izvirnih voda iz plazju Slano blato izkazujejo različno visoko vsebnost soli (preglednica 13.3) (Petkovšek, 2006). Iz preglednice 13.2 lahko ocenimo, da med solmi v zemljini prevladujejo sulfati – sadra ($\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$), glauberjeva sol ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10 \text{H}_2\text{O}$) in melanterit ($\text{FeSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$), znaten je tudi delež pirita (FeS_2). Povprečna molalnost vode 0.01 mol/L. Iz teh podatkov lahko sklepamo na osmotsko sukucijo do 100 kPa. Zaradi nizke vrednosti osmotske sukucije bomo slednjo zanemarili.



Slika 13.5: Zrnavostne sestave plazine.

Figure 13.5: Sieving analysis of landslide body.

Preglednica 13.2: Indeksne lastnosti plazine.

Table 13.2: Index properties of landslide body.

leto odvzema	vzorec	Nar. vlaga	Nar. gostota	Suha gostota	Gostota zrn	Preiskava zrnivosti	zrna pod (μm)	Meja židkosti	Meja plastičnosti	Meja krčenja	Indeks plastičnosti	Vodovpojnost	Metilen modro vrednost
		w	ρ	ρ_d	ρ_s			w_L	w_P	w_S	I_P	w_A	MBf
		%	t/m^3	t/m^3	t/m^3			%	%	%	%	%	g/kg
2002	VZ1	27.0			2.69	da							
	združen						500	45	18		27		
	združen						63	49	20		29		
2005	združen						500	34	18		16		
	združen						500	45	14		31	56	
	VZ1	15.6	2.04	1.8		da							
	VZ2	15.7	1.83	1.6		da							
	VZ3	14.0	1.66	1.5		da							
	VZ4	10.2	1.71	1.6		da							
	kamni	0.9-5.4	2.15-2.59	2.04-2.57									
2007	VZ1	16.5				da	63	45	18		27	62	
	VZ2	14.3					63	50	19		31		
	VZ3	16.5				da	63	49	17		32	63	
	VZ4	21.8				da	63	46	17		29		
	VZ5	17.5				da	63	47	17		30		
2010	VZ1				2.72	da	63	51	20	18	31	68	42.1

Preglednica 13.3: Kemijska sestava izvirkih vod (Petkovšek, 2006).

Table 13.3: Chemical composition of spring water (Petkovšek, 2006).

Parameter	Enota	Izraženo kot	Postopek	Vrednosti
pH	-	-	ISO 10523	7,1 – 8,0
Elektroprevodnost	$\mu\text{S/cm}$	-	ISO 7888	700 - 1700
Nitrati	mg/l	NO_3	JUS U.M1.058	3,2 – 35,6
Sulfati	mg/l	SO_4	ISO 9280	120 - 752
Kloridi	mg/l	Cl	JUS H.Z1.140	1,8 - 71
Ortofosfati	mg/l	PO_4	JUS U.M1.058	< 1
Kalcij	mg/l	Ca	DIN 38406-3	92 - 108
Kalij	mg/l	K	JUS H.Z1.117	2,5 – 9,4
Magnezij	mg/l	Mg	DIN 38406-3	18 - 111
Natrij	mg/l	Na	JUS H.Z1.117	18 - 200
Hidrogenkarbonati	mg/l	HCO_3	JUS U.M1.058	23 - 98

13.4 Meja krčenja

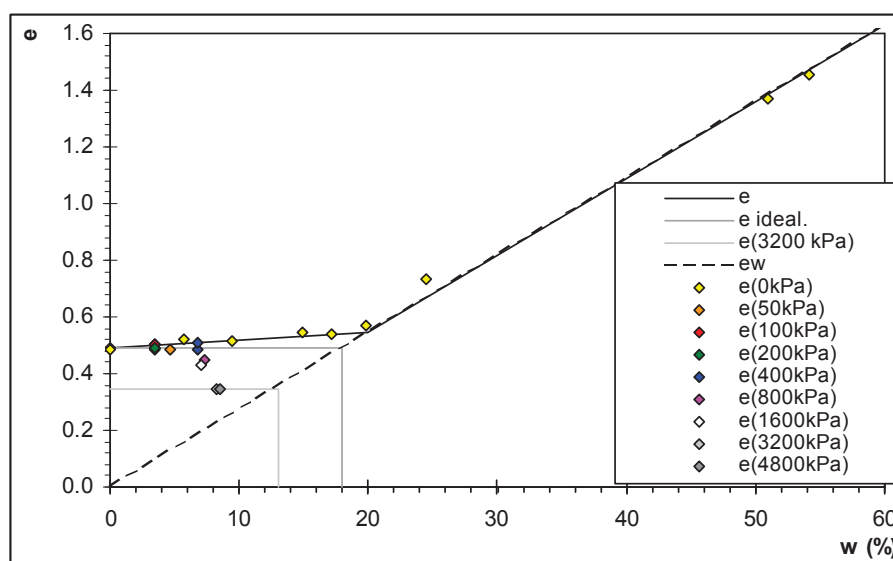
Meja krčenja je pri obravnavi nezasičene zemljine pomembna preiskava. Z njo lahko posredno določimo točko vstopa zraka, s tem pa tudi območje kapilarne zasičenosti in desaturacije na retencijski krivulji preiskovane zemljine. Posredno pa tudi volumenske deformacije, ki jim bo zemljina izpostavljena, v kolikor bi se popolnoma izsušila.

Izmerjeno krčenje zemljine zaradi sušenja smo prikazali na sliki 13.6. Iz slike vidimo, da se zemljina prične sušiti pri vlagi 20%. Nato pa se ob majhnih spremembah volumna posuši do popolnoma suhe zemljine (črta e). V kolikor obnašanje zemljine idealiziramo tako, da zanemarimo volumenske spremembe zasičene zemljine, dobimo mejo krčenja 18% (črta e ideal.).

Opisan postopek velja le za stanje v zemljini brez vertikalne obtežbe. Da bi preverili vpliv obtežbe na mejo krčenja, smo v edometrično celico vgradili preizkušance, jih obremenili do želene vertikalne obtežbe in jih nato pri konstantni obtežbi sušili. Med sušenjem smo spremljali vertikalne pomike. Ko se je graf višine vzorca v odvisnosti od časa spremenil v logaritemsko premico (slika 13.7), smo celice razgradili in preizkušancem po že opisanem postopku določili vlago in gostoto. Med razgradnjo smo opazili, da so vzorci pri vertikalnih obremenitvah pod 800 kPa razpadli na manjše kose, saj so se tudi bočno krčili. Končna vertikalna obremenitev je bila tako v resnici višja. Vzorci pri obremenitvah 400, 3200 in 4800 kPa se še niso bili popolnoma ekvilibrirani z okolico, saj še niso imeli višje vlage, kot jo ima zračno suha zemljina (3-4%). Ekvilibracijo je oteževala manjša višina preizkušancev in s tem otežena izmenjava vodnih hlapov ter dolgo sušenje zgornje kape (porozne ploščice) edometra.

Zgoraj opisan postopek je podoben metodi merjenja sukcije z ekvilibracijo relativne vlage. Razlike med našim postopkom in sukcijskim edometrom na principu ekvilibracije relativne vlage so: nismo imeli prepihanja zgornje kape edometra, nismo spremljali sprememb teže vzorca in nismo imeli konstantne relativne vlage zraka. Prav tako pa z našim postopkom zagotavljamo samo eno sukcijo (100-150 MPa), ki ustreza relativni vlagi zraka 70%.

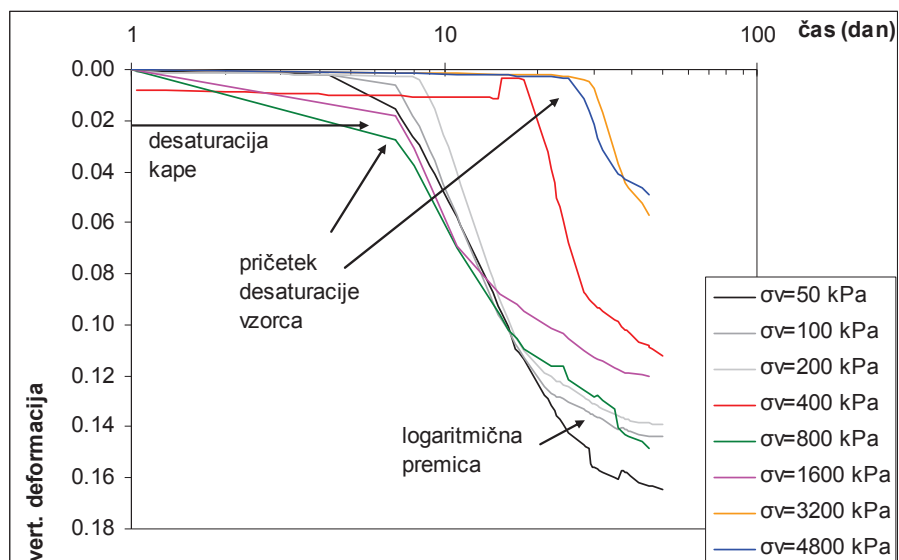
Iz slike 13.6 vidimo, da imajo šele obtežbe nad 800 kPa vpliv na mejo krčenja. Popolnega volumenskega obnašanja v odvisnosti od vertikalne obremenitve ni možno razločiti, saj nismo merili vlage in gostote preizkušancev pri različnih vlagah. Po idealiziranem postopku pa lahko določimo mejo krčenja preizkušancev pri 3200 in 4800 kPa na 13%.



Slika 13.6: Vpliv vertikalne obtežbe na mejo krčenja.
Figure 13.6: Influence of vertical load on shrinkage limit.

13.5 Vodovpojnost po Enslin-Neff postopku

Vzorcju smo določili adsorpcijo vode po Enslin-Neff postopku. Po Petkovšek (2006) je rezultat preiskave hkrati tudi najbolj vlažno možno stanje zemljine. Izmerjena vodovpojnost po Enslin-Neff postopku je prikazana v preglednici 13.2.



Slika 13.7: Časovni razvoj vertikalnih deformacij med sušenjem v edometru.

Figure 13.7: Development of vertical deformations vs. time in oedometer.

13.6 Edometrske preiskave

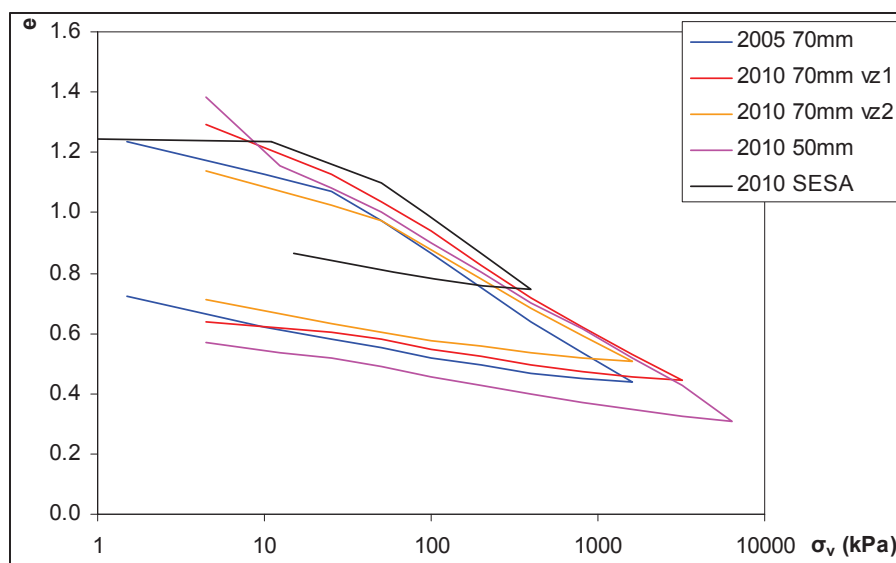
Edometrski preskusi so bili opravljeni na zemljinah, navlaženih na mejo židkosti. S pomočjo edometriških preskusov ugotavljamo zvezo napetost količnik por oziroma volumenske deformacije (slika 13.8) od vertikalne napetosti. Z židkimi preizkušanci določimo deviško kompresijsko linijo, v našem primeru pa smo s ponavljanjem testov preverili tudi ponovljivost rezultatov ter vpliv velikosti obroča oziroma razmerja višina/premer na rezultat edometrske preiskave. Preiskavo smo opravili tudi v sukcijskem enostavnem strižnem aparatu (SESA), da bi preverili morebitni prenos obtežbe na K_0 obroče pri večjih deformacijah. Rezultati so pokazali, da je razlika v suhi gostoti med vzorcem iz leta 2005 (Petkovšek, 2006) in vzorcem iz leta 2010 do 8%, testi na istem vzorcu iz leta 2010 pa so pokazali na približno 1% napako med posameznimi preizkušanci, ki pa ni posledica različnih obročev, saj se ponovi tudi pri ponovitvi testa v isti napravi. Preizkušanec vgrajen v napravo SESA je izkazoval 2-4% manjše gostote, kar bi pomenilo do 30% redukcijo sile. Vendar pa se redukcija sile manjša z večanjem bremenske stopnje (8% pri vertikalni napetosti 400 kPa). Tudi sicer ni edometrska krivulja zamaknjena le v vertikalni smeri, ampak je tudi nagnjena pod drugim naklonom. Iz tega lahko sklepamo, da je napaka posledica razlik med preizkušanci, napake merjenja volumna zemljine in prenosa sile na K_0 obroče. Samo napaki merjenja volumna zemljine tudi ne moremo pripisati celotne napake, saj bi bila v tem primeru napaka merjenja volumna večja od 10%. Vsaj deloma lahko razlike pripišemo tudi prenosu sile na K_0 obroče (par 10%), kar bo pri meritvah lezenja povzročalo dodatne negotovosti.

Pomemben rezultat edometrske preiskave so parametri stisljivosti zemljine predstavljeni v poglavju o Cam clay modelu, saj bomo z njimi opisali obnašanje zemljine. Povzetek teh parametrov podajamo v preglednici 13.4. Na preizkušancu 2010 70mm vz2 smo poleg edometrske preiskave izvajali tudi meritve vodoprepustnosti s spremenljivim hidravličnim padcem za vsako bremensko stopnjo. Pri vseh ostalih preiskavah pa smo ocenili vodoprepustnost po Taylorjevem postopku.

Preglednica 13.4: Parametri stisljivosti zemljine.

Table 13.4: Soil compressibility parameters.

	2005 70mm	2010 70mm vz1	2010 70mm vz2	2010 50mm	2010 SESA
$e (\sigma_v=1)$	1,56	1,59	1,50	1,47	1,77
λ	0,148	0,144	0,136	0,137	0,176
K	0,038	0,038	0,036	0,037	0,037



Slika 13.8: Edometrijski testi v različnih napravah.

Figure 13.8: Oedometer tests performed on different apparatuses.

13.7 Meritve sukcije

Meritve sukcije smo opravili na več načinov:

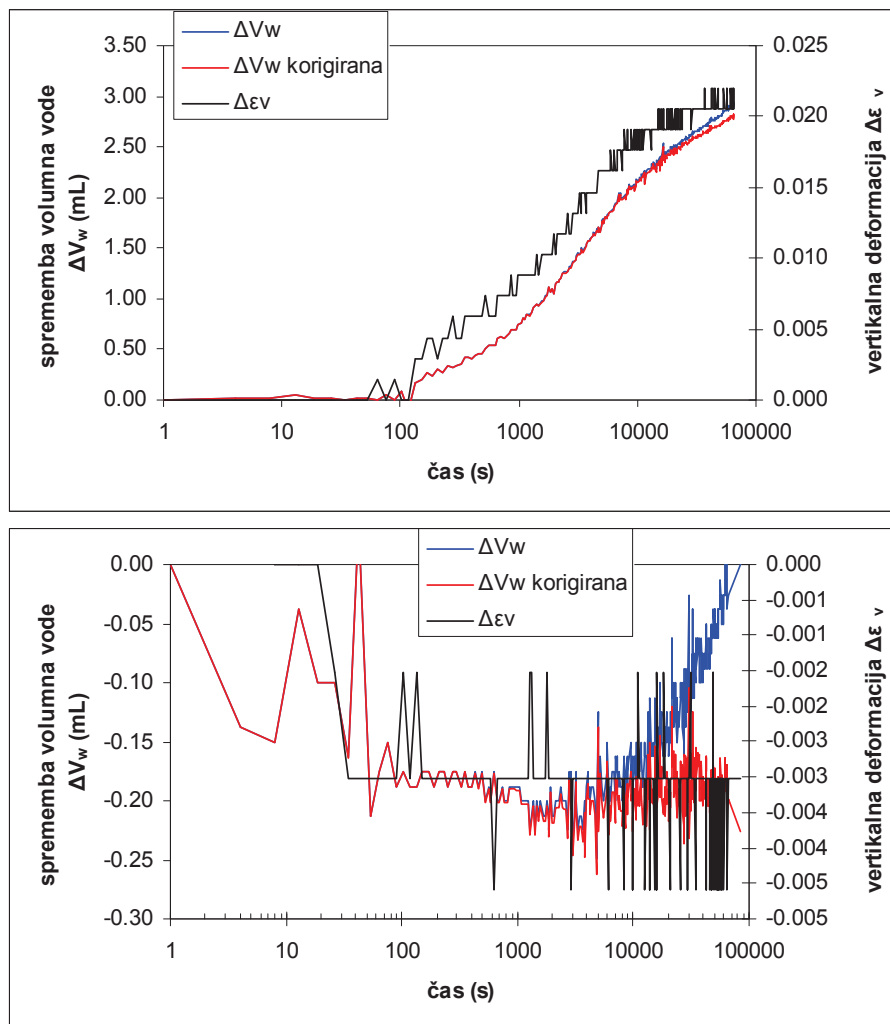
- v psihrometru WP4-T (Decagon devices),
- z Watermark senzorjem sukcije,
- v tlačnem loncu,
- s tenziometrom,
- napravi HYPROP,
- po metodi filter papirja in
- v napravi SESA.

Starejše meritve povzemamo po Petkovšek (2006) in Petkovšek et al. (2009). Vzorcem zemljine iz leta 2010 pa smo sukcijo izmerili le v napravi HYPROP, s psihrometrom WP4-T in v napravi SESA.

V napravi HYPROP smo merili sukcijo v območju 0-100 kPa različno vlažnih zemljin brez vertikalne obtežbe. Pri meritvi sukcije vzorca, vgrajenega pri vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku, smo morali preiskavo ustaviti zaradi prevelikih krčitvenih deformacij.

V SESA smo merili sukcijo v območju 25-500 kPa pri vertikalnih obtežbah 50, 100, 200 in 400 kPa. Vzorce smo najprej obremenjevali do želene vertikalne obtežbe po postopku za edometrijske preiskave.

Pri željeni vertikalni obteži smo nato vzorec obremenjevali s sukucijskimi bremenskimi stopnjami (0-25-50-100-200-300-500 kPa). Pri vsaki sukucijski bremenski stopnji smo počakali, da se ustalil volumen vode v vzorcu (slika 13.9). Ko smo končali z bremenskimi stopnjami, smo vzorec razbremenili v obratnem vrstnem redu. Med preiskavo smo količino difuziranega zraka skozi spodnjo porozno ploščico preverjali z obliko grafa spremembe volumna vode, »prepihovanjem« prostora pod spodnjo porozno ploščico z vodo in spremembo količine vode, ki smo jo izmerili v napravi in tisto, ki smo jo izmerili iz tež preizkušanca pred in po testu. Difuziran zrak je predstavljal problem predvsem pri razbremenilnih stopnjah. Kljub preprihovanju spodnje porozne ploščice smo ugotovili, da to ni zadostno, saj smo težko preprihali celotni difuziran zrak. Probleme smo imeli zaradi oblike spodnje kape in tesnjenja spodnje porozne ploščice, ki je povzročil razmik med aluminijasto kapo in porozno ploščico. Namesto nepredvidljivega popravljanja meritev s količino preprihanega zraka smo se odločili za popravek spremembe volumna vode v skladu s Henryevem zakonom (koncentracija raztopljenega zraka) in 1. Fickovim zakonom (difuzija). Pri tem smo upoštevali le stacionarno stanje (hipno spremembo koncentracije zraka v vodi), difuzijsko konstanto pa smo ocenili na podlagi količine raztopljenega zraka. Popravek tako predvideva linearno večanje količine difuziranega zraka s časom ter eksponentno rast hitrosti difuzije z razliko tlakov.



Slika 13.9: Sukucijska bremenska stopnja 200-300 kPa (zgoraj) in 300-150 kPa (spodaj) pri vertikalni napetosti 100 kPa.

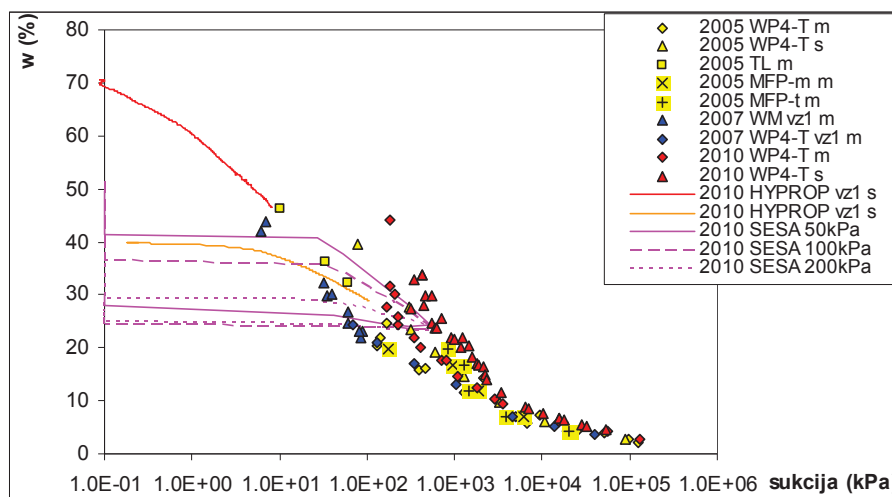
Figure 13.9: Suction load step 200-300 kPa (upper) and 300-150 kPa (lower) at vertical load 100 kPa.

V nasprotju z običajnimi preiskavami volumenskih sprememb v odvisnosti od sukcije (Matyas in Radhakrishna 1968, Fredlund in Morgenstern, 1976, Alonso et al. 1990) smo vzorce zemljine najprej obremenili z vertikalno obtežbo ter šele nato vzpostavili sukcijo in ne najprej obremenili s sukcijo ter šele nato vzpostavili vertikalnim obremenitvam. To smo naredili zato, da bi čim bolj posnemali dogajanje v naravi, saj se je plazina najprej odložila kot blatni tok, se skonsolidirala in bila šele nato izpostavljena sukciji.

V psihrometru WP4-T smo zmerili sukcijo zemljine v območju 300 do 400000 kPa. Pri tem smo merili sukcijo zemljine, ki smo jo navlažili do zelene vlage (retencijska krivulja močenja) in sukcijo zemljine, ki smo jo najprej navlažili do meje židkosti in nato posušili do zelene vlage (retencijska krivulja sušenja).

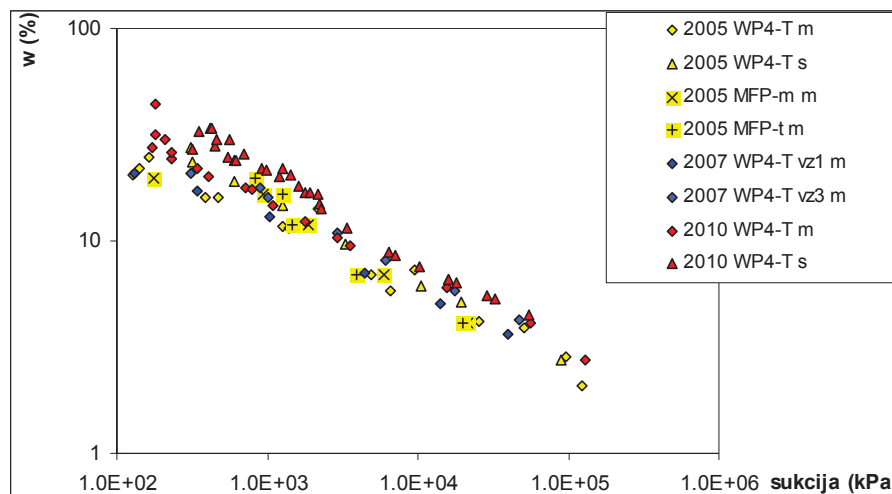
Sukcije izmerjene s psihrometrom WP4-T in po nekontaktni metodi filter papirja so totalne sukcije, vse ostale meritve pa so meritve matrične sukcije.

Na sliki 13.10 predstavljamo meritve sukcije. K našim meritvam so priložene meritve na vzorcu plazine iz leta 2005 (Petkovšek, 2006) in leta 2007 (Petkovšek et al., 2006). Na sliki 13.10 so predstavljene vse meritve sukcije, ker pa slika predstavlja preveč podatkov in je težko berljiva, smo jo razdelili na več slik. Na sliki 13.11 smo prikazali vse meritve sukcije plazine s psihrometrom WP4-T in po metodi filter papirja. Iz slike vidimo ločenost podatkov. Če to ločenost primerjamo z mejo židkosti, vidimo, da so podatki razvrščeni od najbolj pustih (2005 in 2007 vz1) do bolj mastnih (2007 vz3 in 2010). V območju sukcij pod 3000 kPa pa se jasno vidi tudi razlika med vzorci, ki smo jih sušili ali vlažili. Primerjava meritev z metodo filter papirja pokaže na zanemarljivo osmotsko sukcijo, ki je manjša od napake meritve, saj je totalna sukcija pogosto manjša od matrične.



Slika 13.10: Meritve sukcije na vzorcih plazine. TL – tlačni lonec, MFP-m metoda filter papirja (matrična), MFP-t metoda filter papirja (totalna), WM Watermark senzor, m retencijska krivulja močenja, s retencijska krivulja sušenja. Velja tudi za naslednje slike.

Figure 13.10: Suction measurements on soil from landslide body. TL – pressure plate, MFP-m filter paper method (matrix suction), MFP-t filter paper method (total suction), WM watermark sensor, m soil water characteristic curve – wetting, s soil water characteristic curve – drying. Also for the next figures.



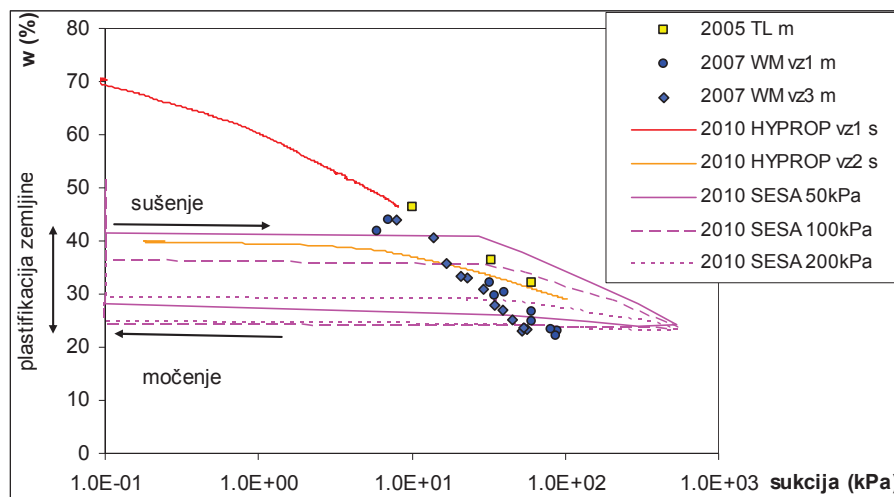
Slika 13.11: Meritve sukcije s psihrometrom z ohlajenim ogledalcem WP4-T in metodo filter papirja.

Figure 13.11: Suction measurement with dew-point potentiometer WP4-T and filter paper method.

Na sliki 13.12 prikazujemo meritve pri sukcijah manjših od 500 kPa. Raztros meritev je precejšen. Meritve HYPROP vz1 dobro sovpadajo z meritvami sukcije v tlačnem loncu iz leta 2005. Oba preizkušanca sta bila v naprave vgrajena pri visoki vlagi (vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku oziroma pri meji židkosti). Meritve z Watermark merilniki sukcije prav tako kažejo podoben trend, vendar so bili Watermark merilniki sukcije samo vlaženi, medtem ko so bile ostale meritve opravljene na krivulji sušenja. Napaka, ki je pri tem nastala, ni nujno samo posledica histereze zemljine, delno je tudi posledica histereze merilnika, ki pa je nismo preverjali.

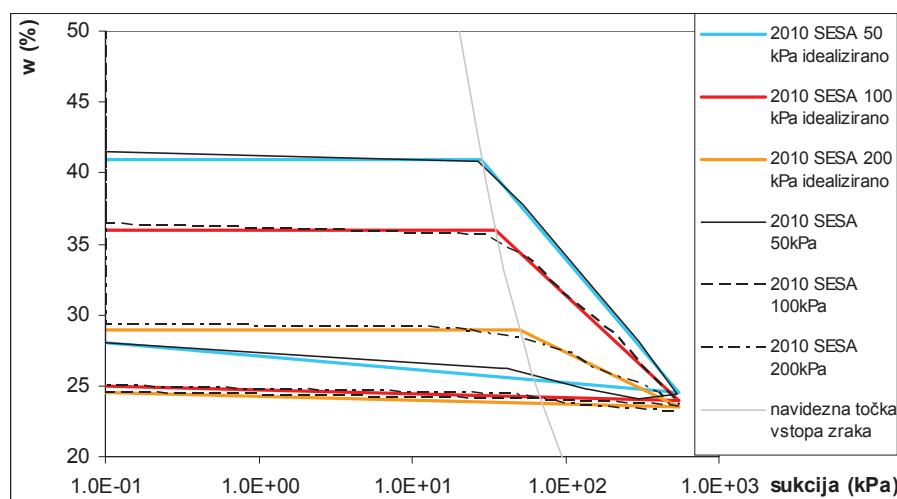
Pri meritvah izvedenih v napravi SESA pri različnih vertikalnih obtežbah opazimo močan vpliv vertikalne obtežbe na retencijsko krivuljo zemljine. Večanje vertikalne obtežbe povečuje gostoto preizkušanca, poveča navidezno točko vstopa zraka (pričetek sušenja zemljine, če bi zanemarili volumenske deformacije) in spreminja naklon retencijske krivulje tako v fazi sušenja kakor v fazi močenja (slika 13.13). Pri tem lahko prav tako opazimo plastične deformacije zemljine, ki jih je povzročilo povečanje sukcije. Plastične deformacije se izkazujejo kot različna vlaga pri sukciji 0 kPa pred in po preiskavi. Iz meritev volumna zemljine lahko sklepamo, da razlika ni posledica ujetih zračnih mehurčkov.

Vpliv plastičnega utrjevanja zemljine zaradi vertikalne obtežbe preprečuje oceno natančnosti meritev z Watermark senzorji. Pri meritvah z Watermark senzorji sukcije smo za vsako točko pripravili vzorec zemljine. Tako pripravljene vzorci so v bistvu ležali vsak na svoji retencijski krivulji, saj so imeli različno napetostno pot.



Slika 13.12: Meritve sukcije z različnimi metodami v območju sukcije 0-500 kPa.

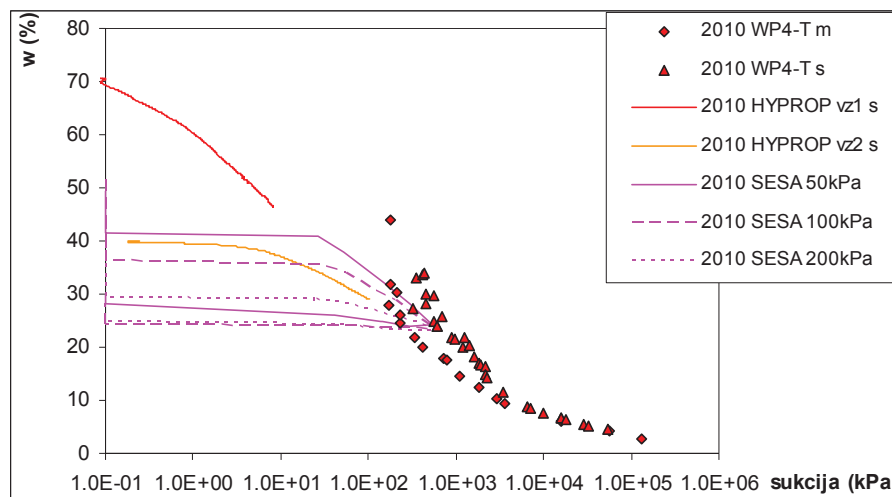
Figure 13.12: Suction measurements with different methods for range of suction 0-500 kPa.



Slika 13.13: Meritve sukcije v napravi SESA.

Figure 13.13: Suction measurements in SESA apparatus.

Slika 13.14 prikazuje vse meritve na vzorcu iz leta 2010. Vidimo že prej omenjeno histerezo vzorcev, merjenih v napravi WP4-T. Ostale meritve, predvsem tiste merjene v napravi SESA, pa se približajo meritvam v napravi WP4-T na sušenih vzorcih. To je pričakovano, saj so bile vse meritve prav tako izvedene na retencijski krivulji sušenja. Prav tako vidimo dokaj dobro ujemanje meritev sukcije z različnimi metodami. V območju nizkih sukcij se moramo zavedati velikega pomena totalnih napetosti. Totalne napetosti spreminjajo gostoto zemljine in s tem obliko retencijske krivulje. Retencijska krivulja je materialno-strukturna lastnost zemljine, zato vpliva totalnih napetosti (oziroma napetostne poti) ne smemo zanemariti. Vpliv totalne napetosti na retencijsko krivuljo je podalo tudi več avtorjev (Fredlund in Rahardjo, 1993, Kawai et al., 2000, Vanapalli et al., 1999, Casini et al., 2007), njihova opažanja pa so podana v teoretičnem delu doktorata.



Slika 13.14: Predstavitev vseh meritev na vzorcu iz leta 2010.

Figure 13.14: Presentation of all measurements on the sample from year 2010.

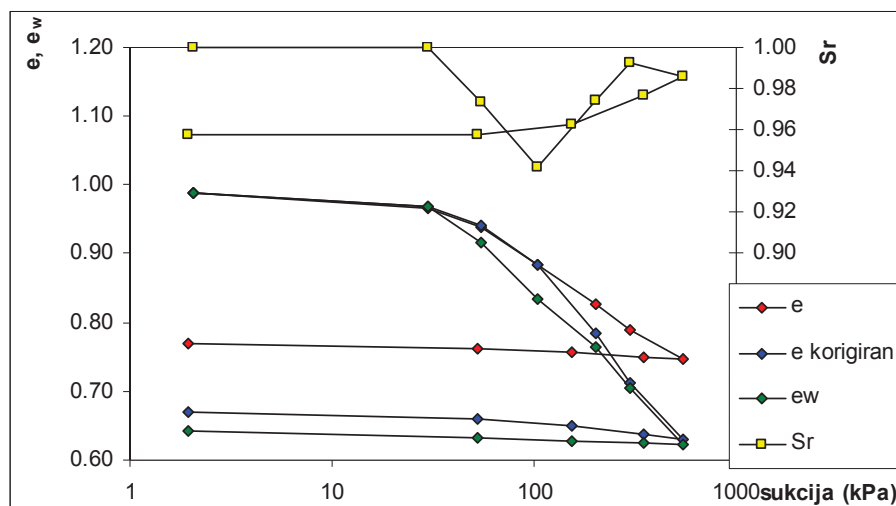
13.8 Volumenske deformacije v odvisnosti od sukcije

Poleg merjenja količine vode smo preizkušancem v napravi SESA merili tudi vertikalne deformacije. Če primerjamo količnik por ocenjen iz vertikalnih deformacij in količnik z vodo zasičenih por (slika 13.15), vidimo, da se vzorcu prične manjšati stopnja zasičenosti pri sukciji nad 100 kPa. To manjšanje stopnje zasičenosti je le navidezno, saj se je pričel vzorec tudi bočno stiskati, kar je možno opaziti tudi med razgradnjo vzorca. Končna stopnja zasičenosti brez upoštevanja bočnega stiskanja bi morala biti 85%, če pa bočno stiskanje upoštevamo in naredimo korekcijo bočnega stiskanja oziroma izmerimo premer preizkušanca po preiskavi, pa dobimo končno stopnjo zasičenosti 95%, kar je blizu merske napake zasičenega vzorca. Iz vsega tega lahko sklepamo, da je bil preizkušane ves čas popolnoma zasičen. Začetne in končne stopnje zasičenosti vseh preizkušancev vgrajenih v napravo SESA so podane v preglednici 13.5. Do 5% napake pri meritvi stopnje zasičenosti lahko pričakujemo pri vzorcih, ki smo jim suho gostoto izmerili na 1% natančno. Natančne meritve spremembe volumna vzorca pa bi bile možne le, če bi znali izmeriti spremembo volumna vode v celici (sukcijska triaksialna celica), kar pa v napravi SESA ni možno. Kasneje bomo v modelu zemljine tudi sicer pojasnili bočne in vertikalne deformacije.

Preglednica 13.5: Začetno in končno stanje preizkušancev v napravi SESA.

Table 13.5: Initial and final state of the test samples in suction simple shear apparatus.

Vertikalna obremenitev	Začetno stanje			Končno stanje		
	Vlaga	Suha gostota	Stopnja zasičenosti	Vlaga	Suha gostota	Stopnja zasičenosti
σ_v (kPa)	w (%)	ρ_d (t/m ³)	Sr (%)	w (%)	ρ_d (t/m ³)	Sr (%)
50	45,6	1,18	95,5	29,1	1,50	97,3
100	49,2	1,13	94,9	26,3	1,56	96,3
200	44,6	1,18	93,5	26,9	1,54	95,2
400	48,0	1,17	98,7	27,3	1,52	93,8



Slika 13.15: Volumensko obnašanje preizkušanca pri vertikalni obremenitvi 100 kPa med sukcijskim obremenjevanjem. Narejena je približna korekcija zaradi bočnega stiskanja.

Figure 13.15: Void ratio of test sample at 100 kPa vertical stress during suction loading and the approximate correction of void ratio.

13.9 Preiskave strižne trdnosti

Preiskave strižne trdnosti materiala na plazini so bile opravljene v več fazah in na različne načine. Opravljale so se bile za potrebo opisa blatnih tokov na plazju in načrtovanja sanacije plazju Slano blato (Majes et al., 2002, Logar et al., 2005) in ugotavljanja vpliva sukcije na trdnost plazine (Petkovšek et al., 2009).

Leta 2002 so bile opravljene triosne CIU preiskave na vzorcih plazine pripravljenih na 3 različne načine:

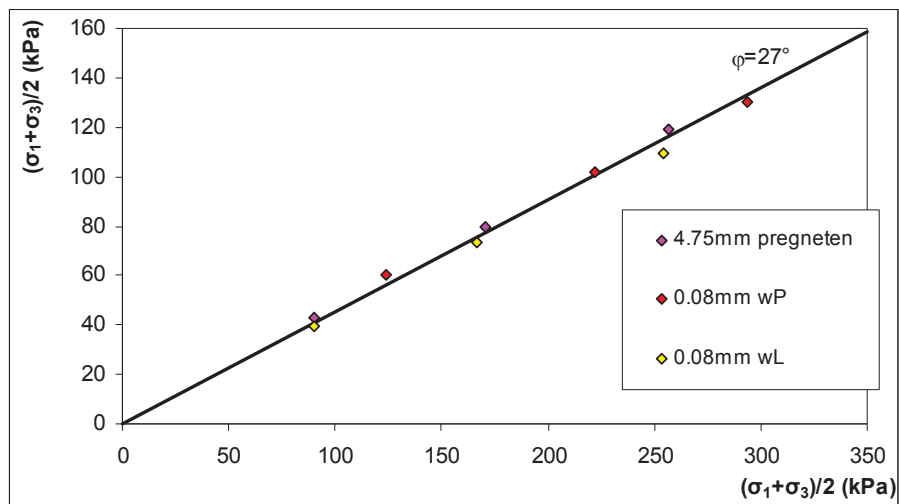
- vzorec pri naravni vlagi pregneten skozi sito 4,75 mm,
- vzorec pri meji židkosti in vzorec pri meji plastičnosti na zrnih 0-0.08 mm.

Preskusi izkazujejo podobne strižne karakteristike (slika 13.16), vendar so strižni koti nekoliko višji kakor jih izkazujejo direktne strižne preiskave (slika 13.17, preglednica 13.6). Preiskave nakazujejo na zanemarljiv vpliv peščenih zrn in priprave preizkušancev na strižne lastnosti materiala.

Podobno obnašanje imajo tudi direktne strižne preiskave (slika 13.17), ki izkazujejo strižni kot 24° . Vzorci iz leta 2007 (Petkovšek et al., 2009), ki med preiskavo niso bili preplavljeni in izkazujejo vpliv sukcije na strižne lastnosti zemljine, so bili izvedeni v fazi vgradnje merilcev sukcije in so služili za potrditev ugodnih vplivov sukcije. Ideja je bila, da bi iz teh preiskav izrisali krivulje strižnega kota ϕ^a in ϕ^b predstavljenega na sliki 5.4.

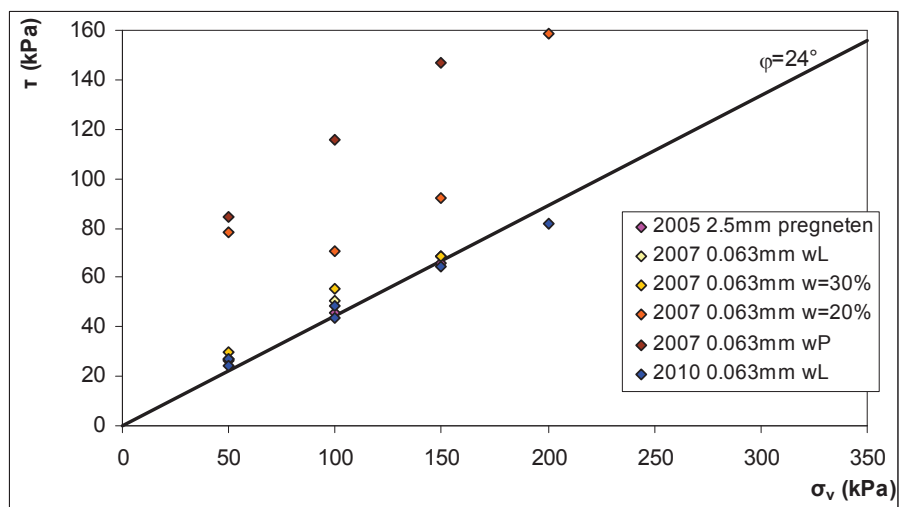
Vpliv sukcije na strižne lastnosti zemljine se je poznal samo v primeru vzorca pripravljenega pri vlagi 15%, ki je imel sukcijo pred preiskavo približno 450 kPa, in vzorca pripravljenega pri 20% vlagi, ki je imel sukcijo pred preiskavo ocenjeno na 150 kPa. Pri slednjem se že pozna vpliv spremembe sukcije zaradi stiskanja zemljine. Oba vzorca sta bila zbita in ne pregnetena v kalup, kar bi posledično lahko bil vzrok tudi za nekoliko višji strižni kot. Vzorec pripravljen pri 30% vlagi (sukcija 40 kPa) je med preiskavo popolnoma izničil vpliv sukcije. Zaradi močnega vpliva obremenitve vzorca na sukcijo v

direktnem strižnem aparatu in ker vzorcem nismo bili zmožni zagotavljati kontroliranih pogojev sukcije, se je leta 2007 vse vplive sukcije na strižno trdnost tal vrednotilo le skozi preiskave nedrenirane strižne trdnosti (omenjene kasneje).



Slika 13.16: Preiskave v triosni celici.

Figure 13.16: Results of triaxial tests.



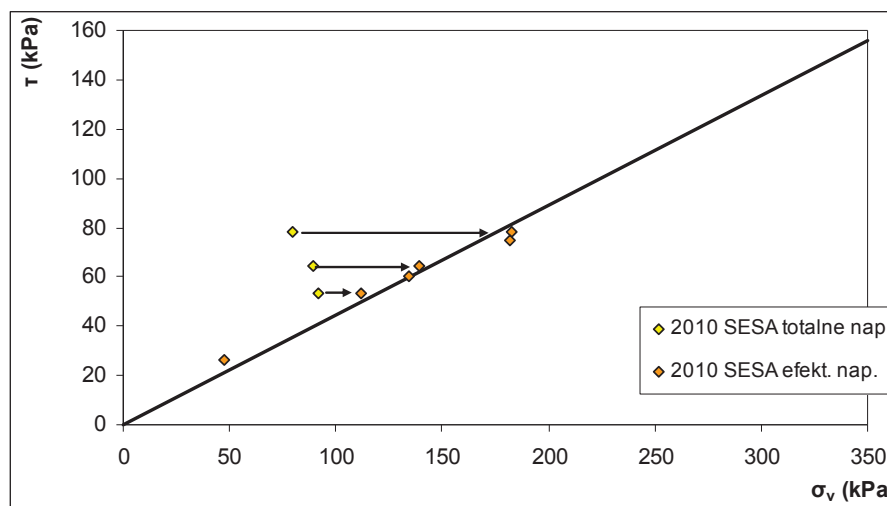
Slika 13.17: Preiskave v direktnem strižnem aparatu.

Figure 13.17: Results of direct shear tests.

V letu 2010 smo obstoječe podatke strižne trdnosti dopolnili z meritvami v napravi SESA in sicer v pogojih brez in z sukcijo. Pri tem smo opravili preiskavo strižne trdnosti pri vertikalni obtežbi 100 kPa in znani sukciji ter pri vertikalni obtežbi, ki ustreza enakemu efektivnemu stanju, če upoštevamo Bishopov popravek efektivne napetosti.

$$(\sigma') = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

Iz slike 13.18 vidimo, da je obnašanje preizkušancev v totalnih napetostih podobno obnašanju direktnih strižnih preiskav nepreplavljenih vzorcev iz leta 2007. V kolikor pa upoštevamo Bishopov popravek efektivne napetosti, vsi rezultati padejo na porušnico preplavljenih vzorcev.



Slika 13.18: Preiskave v direktnem strižnem aparatu.

Figure 13.18: Results of direct shear tests.

Preglednica 13.6: Rezultati različnih strižnih preiskav različnih vzorcev in/ali različnih metod.

Table 13.6: Shear strength parameters of different samples and/or by different test methods.

vzorec iz leta	opis	test	w (%)	ρ (t/m ³)	ρ_d (t/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	ϕ (°) (c=0kPa)
2002	4,75mm, pregneten	CIU	31,0	1,95	1,49	1,6	27,5	28,0
	0,08mm, w=w _p	CIU	25,0	2,01	1,61	10	24,5	27,0
	0,08mm, w=w _L	CIU	39,0	1,84	1,32	1,4	25,5	25,5
	2,5mm, pregneten	DS	47,6	1,79	1,22	7,0	21,5	24,0
2007 vz1	0,063 mm, w=w _p	DS	16,1	1,81	1,56	53	32,0	
	0,063 mm, w=20%	DS	22,0	1,96	1,61	34	27,5	
	0,063 mm, w=30%	DS	27,4	1,92	1,51	12	21,5	26,5
	0,063 mm, w=w _L	DS	48,8	1,72	1,16	7,4	22,5	25,5
2010	0,063 mm, w=w _L	DS	50,3	1,73	1,15	4,0	22,0	23,5
	0,063 mm, w=w _L	DS	54,8	1,68	1,09	10	19,5	23,0
	0,063 mm, w=w _L	SESA	39,2	1,78	1,28	9,1	20,2	23,5

DS direktni strig, CIU nedrenirana izotropno konsolidirana triaksialna preiskava

Petkovšek (2006) že omenja vpliv sukije na nedrenirano strižno trdnost zemljin. Na to je sklepala na podlagi podobnih oblik retencijske krivulje in krivulje nedrenirana strižna trdnost-vlaga. Primer krivulje nedrenirana strižna trdnost vlaga prikazuje slika 13.19. Iz slike vidimo, da imajo vsi vzorci podobno obnašanje pri visoki vlagi. Opazovan lom krivulje pa je lahko posledica zmanjšanja stopnje zasičenosti vzorcev oziroma loma retencijske krivulje. Lom retencijske krivulje je bil opazovan z dvema različnima trendoma, ki so jih podajali rezultati meritve sukije v tlačnem loncu in rezultati meritve sukije v psihrometru z ohlajevalnim zrcalcem in metodo filter papirja (Petkovšek, 2006).

Koumoto in Houlsby (2001) sta ugotovila neposredno zvezo med vlago in nedrenirano strižno trdnostjo:

$$w = ac_u^{-b} \quad (13.1)$$

Kjer sta a in b oblikovna parametra krivulje.

Petkovšek (2006) je vlago v zgornji enačbi zamenjala z enačbo retencijske krivulje. Ugotovila je naslednjo relacijo med nedrenirano strižno trdnostjo in sukcijo (Petkovšek, 2006):

$$c_u = K \tan(\varphi') \psi \quad (13.2)$$

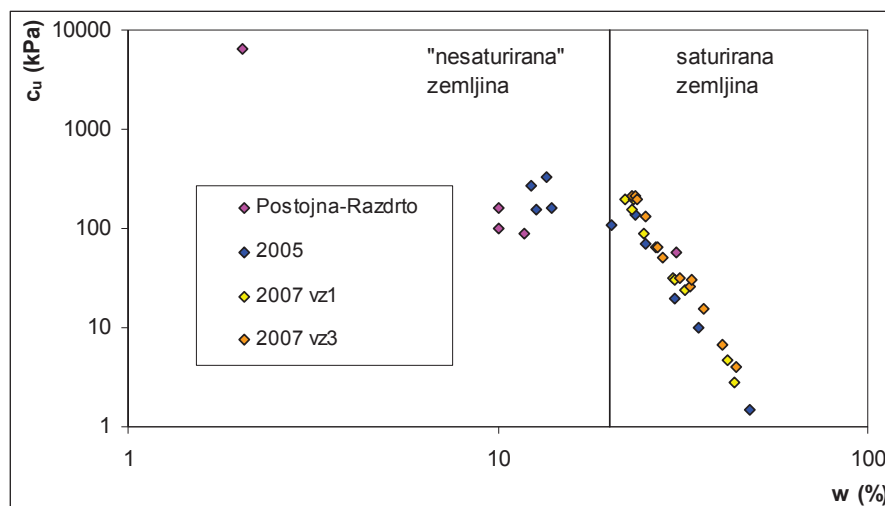
kjer je K koeficient odvisen od stopnje zasičenosti.

Z zgornjo enačbo je ugotovila zadovoljivo obnašanje sivice, flišnega laporja in pliocenskih glin SV Slovenije. Čeprav so vlage flišnega laporja (Postojna-Razdrto) v desaturiranem območju, so laporji zaradi visoke gostote blizu 100% stopnje zasičenosti. Petkovšek (2006) je tako vse analize opravila le za $K=1$. Za strižni kot pa je privzela 20° .

Če izrišemo graf nedrenirane strižne trdnosti v odvisnosti od sukcije, zloma krivulje ni več (slika 13.20). Sukcije vzorcev iz leta 2005 in vzorcev iz AC Postojna- Razdrto so se ocenile na podlagi izdelane retencijske krivulje vzorca iz leta 2005. Sukcije iz leta 2007 pa so bile merjene z Watermark sensorji.

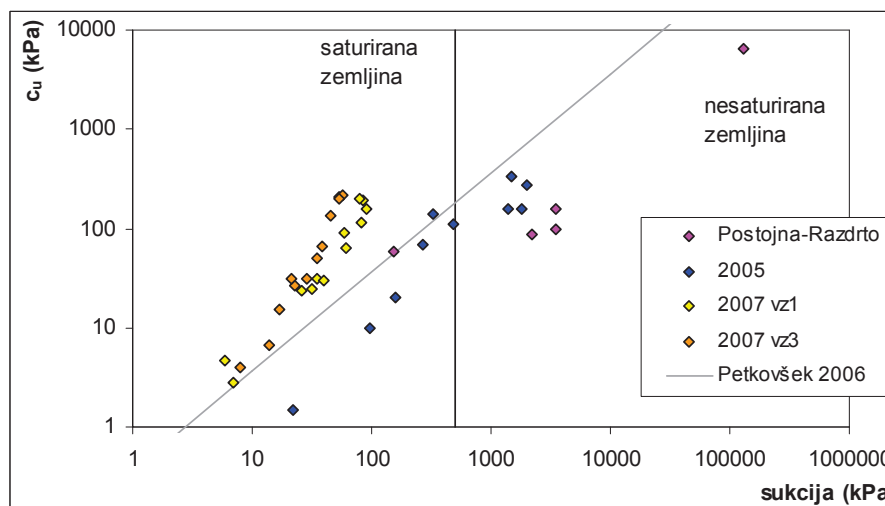
Različne relacije sukcija - nedrenirana strižna trdnost, ki so vidne iz slike 13.20, bi lahko bile posledica nepravilne ocene sukcije, nepravilnega delovanja Watermark sensorjev sukcije, ali posledica različnih načinov merjenja nedrenirane strižne trdnosti (enoosna tlačna trdnost, padajoči konus). Na problem z merjenjem sukcije z Watermark sensorji smo že opozorili. Tudi v tem primeru Watermark sensorji izkazujejo prenizko izmerjene sukcije, saj kršijo enačbo (13.2).

Nedrenirana strižna trdnost zemljine je odvisna tudi od napetostnega stanja v zemljini. Vsi opisani testi so bili opravljeni na navlaženih in pregnetenih vzorcih zemljine brez vertikalne obtežbe, zemljina v plazini pa je podvržena tudi totalnim obremenitvam (lastni teži) in ne samo sukciji. Ocene nedrenirane strižne trdnosti v odvisnosti od sukcije in totalne obremenitve bomo podali v naslednjem poglavju.



Slika 13.19: Relacija nedrenirana strižna trdnost-vlaga.

Figure 13.19: Relation between undrained shear strength and water content.



Slika 13.20: Relacija nedrenirana strižna trdnost-sukcija za fliš (Petkovšek, 2006).

Figure 13.20: Relation between undrained shear strength and suction for flysch samples (Petkovšek, 2006).

13.10 Lezenje

Da bi preverili vpliv strižnega lezenja na pomike plazu Slano blato, smo opravili serijo preiskav s konstantno vertikalno obremenitvijo pri različnih stopnjah strižne obremenitve. Preiskave smo opravili pri različnih vertikalnih napetostih, različnih stopnjah strižne obremenitve τ / τ_{\max} in pri različnih sukcijah.

Preiskava lezenja je podobna enostavni strižni preiskavi, le da namesto konstantnega prirasta deformacij, vzorcu vsilimo konstantno horizontalno silo ter spremljamo razvoj deformacije s časom. Vzorci so bili obremenjeni različno dolgo, od 8 ur do 10 dni. Stopnje s krajšim časom obremenitve smo naredili zaradi prevelikih deformacij, ki bi jih imeli, če bi vzorec obremenili samo z eno stopnjo.

Preiskave lahko razdelimo v več skupin:

- preiskave lezenja pri isti stopnji strižne obremenitve (τ / τ_{\max}) in različnih vertikalnih obremenitvah
- preiskave lezenja pri isti vertikalni obremenitvi in pri različnih stopnjah strižne obremenitve brez sukucije
- preiskave lezenja pri isti vertikalni obremenitvi in isti stopnji strižne obremenitve z in brez sukucije
- preiskave lezenja s postopnim obremenjevanjem

V prvih treh sklopih smo preizkušanec hipno obremenili le z eno stopnjo strižne obremenitve. V zadnjem sklopu preiskav, ki je zlasti pomemben, saj najbolje ponazarja stanje v naravi, pa smo strižne obremenitve nanašali postopoma. Pri tem tudi ta preiskave ne povzame točno stanja v naravi, saj na plazu ne prihaja do hipne obremenitve, temveč počasnega večanja strižne obremenitve zaradi gibanja vode oziroma spreminjanja pornih tlakov. Stopnjo strižne obremenitve (τ / τ_{\max}) smo vedno izračunali na stanje brez sukucije oziroma smo zanemarili vplive sukucije!

13.10.1 Preiskave lezenja pri isti stopnji strižne obremenitve in različnih vertikalnih obremenitvah

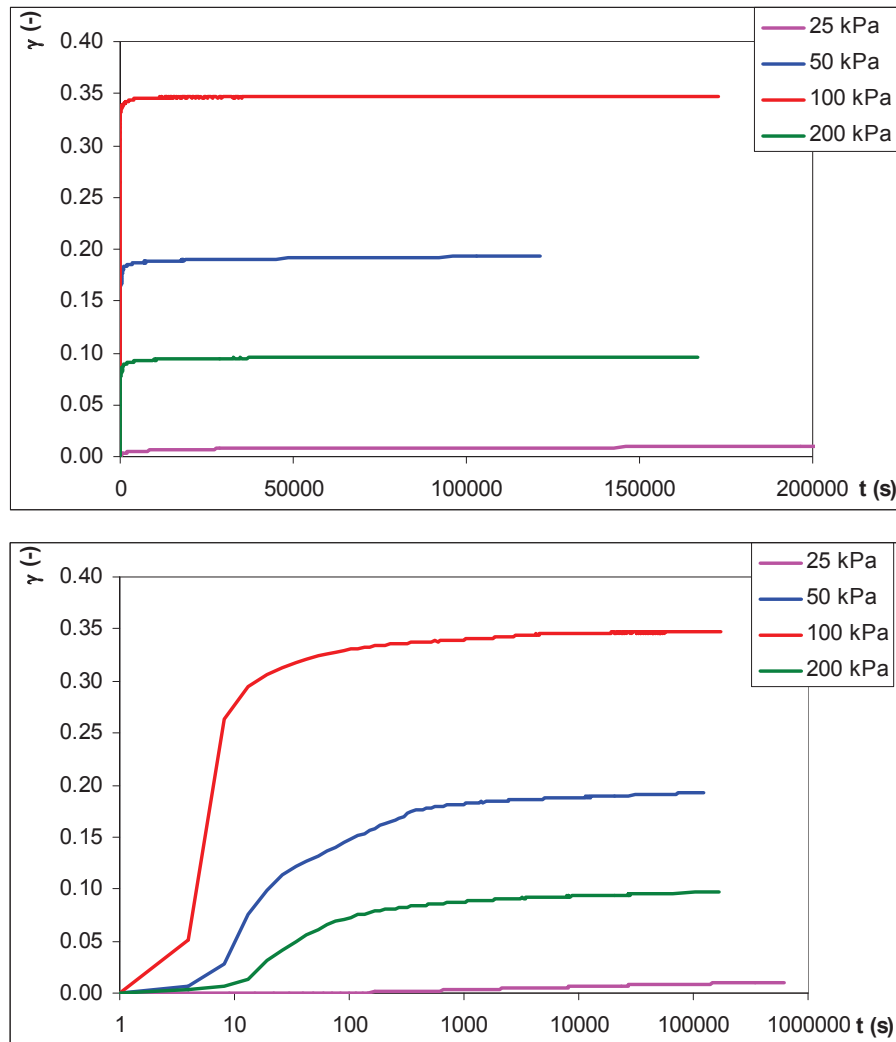
Opravili smo štiri preiskave pri stopnji strižne obremenitve ($\tau / \tau_{\max} = 0,56$) ter pri vertikalni napetosti 25, 50, 100 in 200 kPa. Iz slike 13.21 vidimo skoraj trenuten razvoj strižnih deformacij in majhno lezenje zemljine za vse bremenske stopnje. Vidimo, da pri vertikalni obremenitvi 25 kPa preizkušanec ni imel začetnih deformacij, ampak je imel samo lezenje. Preizkušanci obremenjeni pri 50, 100 in 200 kPa pa so imeli začetne strižne deformacije med 10 in 35 %, ki pa niso razporejene glede na stopnjo vertikalne obremenitve. Mislimo, da so začetne deformacije v večji meri posledice prirasta pornih pritiskov v vzorcu, ki pa ga zaradi dreniranih pogojev preiskave nismo zmožni meriti. Iz diagrama v logaritmu časa vidimo, da se lezenje obnaša kot logaritemska premica. Začetni počasen prirast deformacije je tudi posledica približno 6 sekundnega časa nanosa obtežbe.

13.10.2 Preiskave lezenja pri isti vertikalni obremenitvi in pri različnih stopnjah strižne obremenitve brez sukucije

Opravili smo 5 preiskav pri vertikalni napetosti $\sigma_v = 100$ kPa ter dve pri vertikalni napetosti $\sigma_v = 50$ kPa (slika 13.22). V obeh primerih so imeli preizkušanci pri višji stopnji strižne obremenitve večje strižne deformacije. Na primeru vertikalne obremenitve $\sigma_v = 100$ kPa in stopnji strižne obremenitve $\tau / \tau_{\max} = 0,49$ vidimo velik raztros začetnih strižnih deformacij, ki so med 5-10%. Preizkušanec obremenjen s stopnjo strižne obremenitve $\tau / \tau_{\max} = 0,81$ pa se je porušil po približno 10 s.

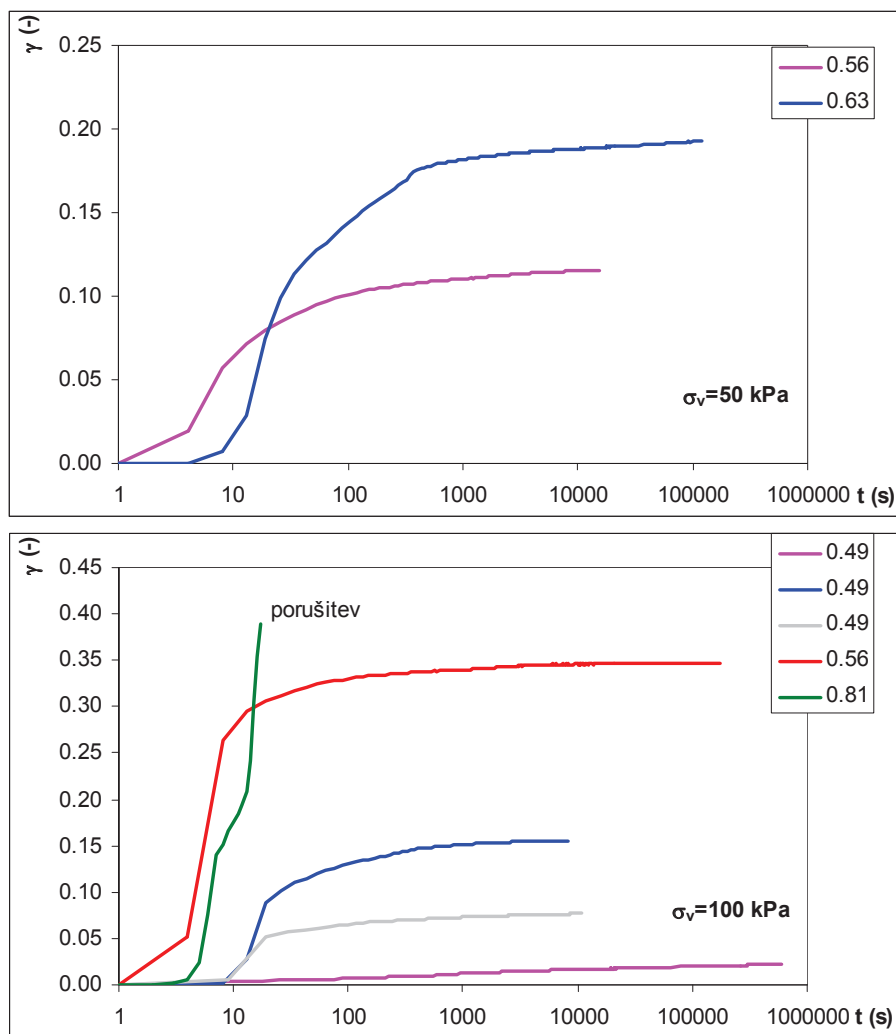
V enem izmed testov pri vertikalni obremenitvi $\sigma_v = 100$ kPa in stopnji strižne obremenitve $\tau / \tau_{\max} = 0,49$ ni prišlo do začetnih deformacij. Slednjega si ne znamo pojasniti. Eden izmed možnih razlogov je premajhna gostota vzorca med pripravo ali pa napačno napetostno stanje na vzorcu kot posledica napačno obrnjenega ventila med celotno preiskavo. Rezultatov te preiskave ne bomo upoštevali.

Na primeru preiskav pri enaki stopnji strižne obremenitve in na primeru preiskav pri enakih vertikalnih obtežbah vidimo, da so začetne deformacije skorajda hipne (do nekaj 10 s), temu sledi prehodno območje in lezenje zemljine z logaritmичnim upadom hitrosti lezenja.



Slika 13.21: Lezenje zemljine pri različnih vertikalnih obremenitvah in pri enaki stopnji strižne obremenitve $\tau / \tau_{\max} = 0,56$.

Figure 13.21: Creep tests at different vertical loads and same shear stress ratio $\tau / \tau_{\max} = 0,56$.



Slika 13.22: Lezenje zemljine pri enakih vertikalnih obremenitvah (zgoraj 50 kPa , spodaj 100 kPa) in pri različnih stopnjah strižne obremenitve.

Figure 13.22: Creep tests at same vertical loads (upper 50 kPa, lower 100 kPa) and different shear stress ratio.

Za opravljene preskuse smo določili hitrosti lezenja oziroma naklona logaritemske premice, ki jih podajamo v preglednici 13.7. Ugotovili smo, da imamo precejšnje raztrose hitrosti lezenja v primeru enake stopnje strižne obremenitve τ / τ_{\max} in celo v primeru ponovitve meritev.

Da bi lažje razložili naključnost meritev, smo preverili natančnost določitve logaritemske premice sekundarne konsolidacije v edometru. V edometru imamo zelo dobro določene robne pogoje in razmerje med glavnimi napetostmi. Na sliki 13.23 vidimo raztros naklona logaritemske premice za primer strižnega lezenja in za primer sekundarne konsolidacije. V obeh primerih imamo približno enak raztros podatkov. V primeru edometriških testov vidimo majhno zanesljivost izmerjenega naklona logaritemske premice sekundarne konsolidacije, saj ta variira za kar 50%. Sekundarne konsolidacije v edometru ne smemo primerjati z lezenjem bočno obremenjenih vzorcev, zanimiva pa je podobna nenatančnost merjenja lezenja.

Preglednica 13.7: Rezultati naklona logaritemske premice lezenja za preiskovane stopenjske obremenitve.

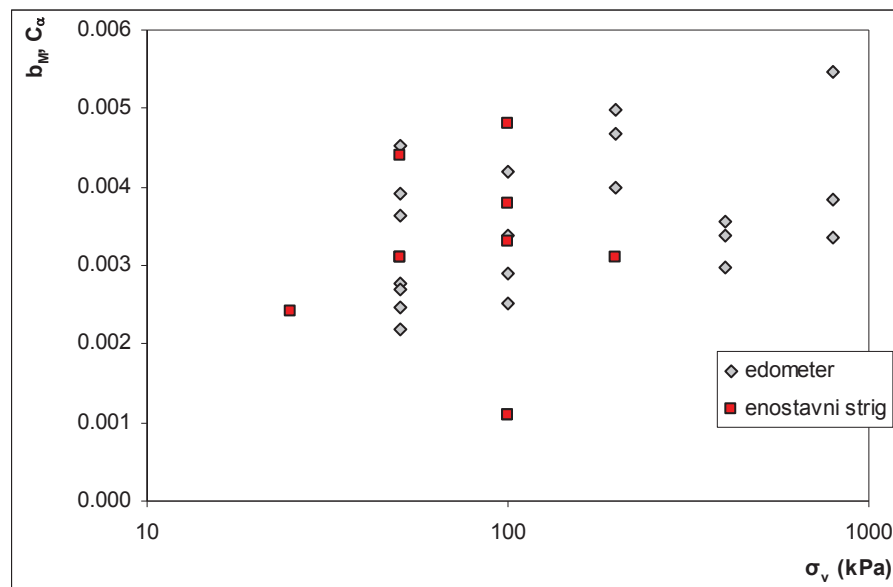
Table 13.7: The slope of logarithmic line for the creep tests.

σ_v (kPa)	τ / τ_{\max}	b_M^*
25	0.56	0.0024
50	0.56	0.0031
100	0.56	0.0011**
200	0.56	0.0031
50	0.56	0.0031
50	0.63	0.0044
100	0.49	0.0038
100	0.49	0.0048
100	0.49	0.0033***
100	0.56	0.0011**
100	0.81	/

* naklon logaritemske premice

** rezultat testa je lomljena logaritemska premica

*** vprašljivo napetostno stanje na vzorcu



Slika 13.23: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja in sekundarne konsolidacije.

Figure 13.23: Slope of logarithmic line for shear creep and secondary consolidation.

13.10.3 Preiskave lezenja pri isti vertikalni obremenitvi in isti stopnji strižne obremenitve z in brez sukcije

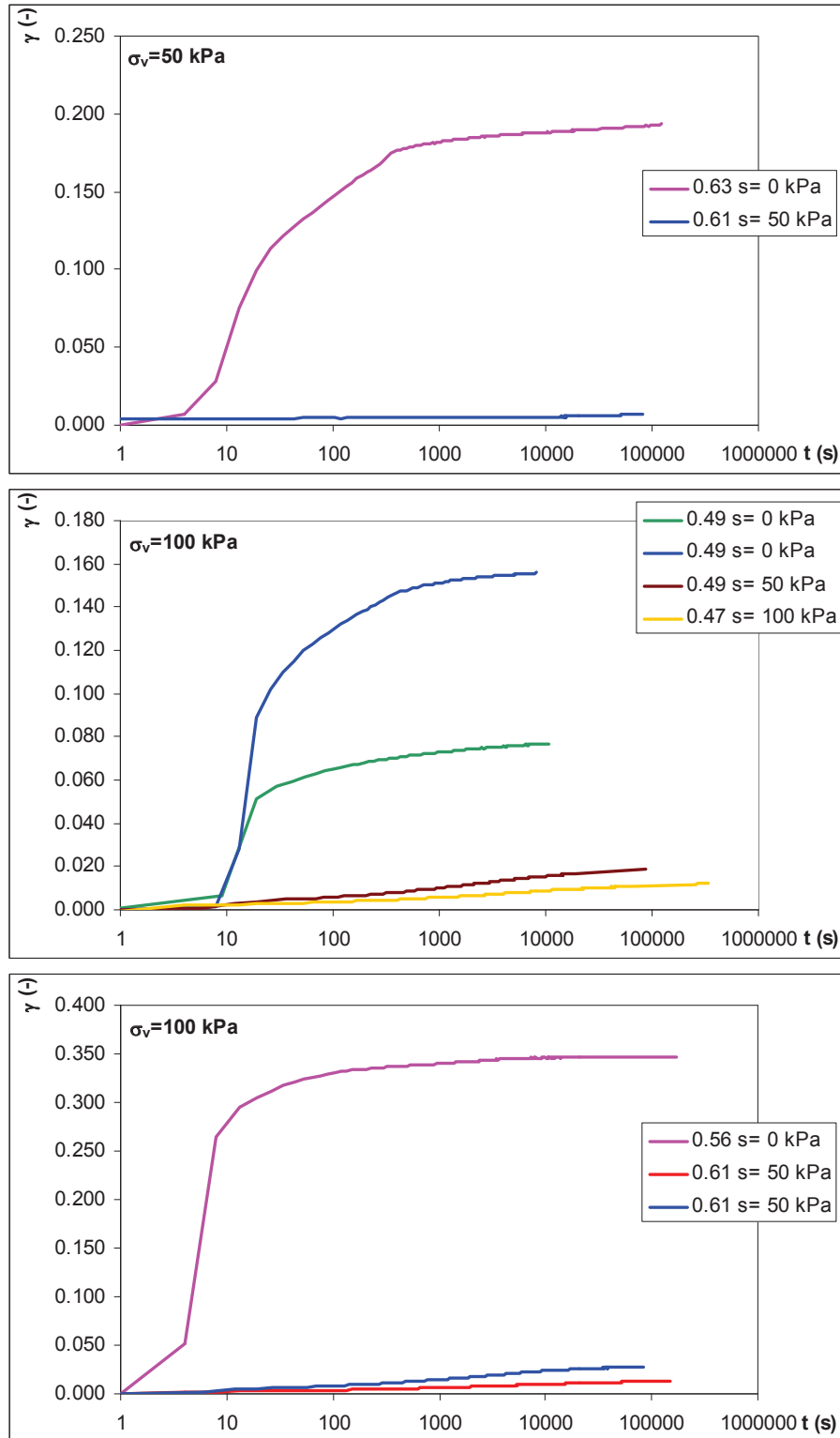
Da bi preverili vpliv sukcije na lezenje zemljine, smo opravili serijo preiskav pri sukciji 50 kPa in test pri sukciji 100 kPa. Na sukcijo 50 kPa smo se omejili na podlagi terenskih meritev sukcije in velikosti vertikalne obtežbe. V kolikor je sukcija večja od vertikalne obremenitve, lahko pričakujemo bočne deformacije in do drugačno napetostno stanje v zemljini. Teste smo opravili za vertikalno napetost $\sigma_v = 50$ in 100 kPa. Iz slik 13.24 vidimo zmanjšanje deformacij kot posledico sukcije na vzorcu. Pričakujemo, da bi višje sukcije imele še večji vpliv na zmanjšanje strižnih deformacij. Tudi naklon logaritemske premice se je zmanjšal (slika 13.25).

13.10.4 Preiskave lezenja s postopnim strižnim obremenjevanjem

Večina deformacije vzorcev med strižnim obremenjevanjem je posledica volumenskega krčenja vzorca med obremenjevanjem. Zaradi volumenskega krčenja se povečajo porni pritiski, ki zmanjšajo efektivno napetost v zemljini. S tem se poveča dejanska stopnja strižne obremenitve, ki pa je ne upoštevamo, saj deleža prirasta pornega tlaka ne poznamo. Da bi odpravili nastanek presežnih pornih tlakov, smo na določenih preizkušancih opravili postopno povečevanje strižne obremenitve.

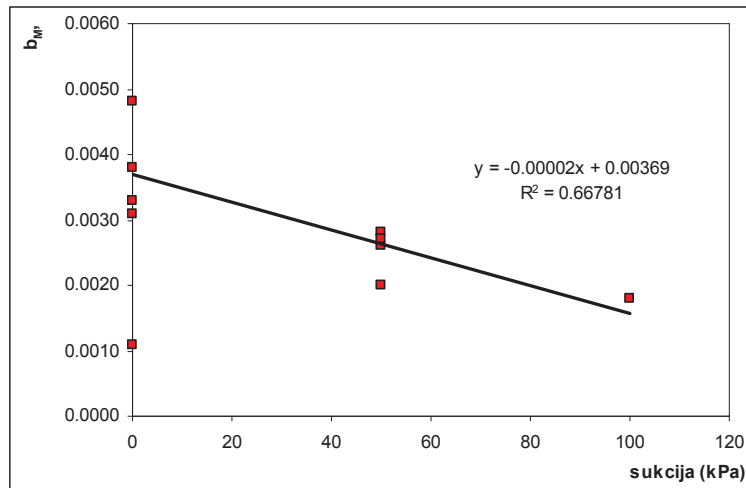
Iz slik 13.26 in 13.27 vidimo, da preizkušanci izkazujejo nižje strižne deformacije kakor v primeru preizkušancev obremenjenih na isto stopnjo vendar samo z eno stopnjo obremenitve. Preizkušanci izkazujejo značilno obliko konsolidacijske linije med bremensko stopnjo, ko jim zmanjšamo sukcijo brez spremembe stopnje strižne obremenitve.

Na sliki 13.28 predstavljamo naklone logaritemske premice strižnega lezenja z upoštevanjem prispevka sukcije oziroma z izvrednotenjem razmerja τ / τ_{\max} v efektivnih napetostih z upoštevanjem Bishopove korekcije efektivnih napetosti. Iz dobljenih rezultatov ne moremo sklepati na vpliv strižnega stanja na hitrost lezenja, saj je raztros rezultatov prevelik.

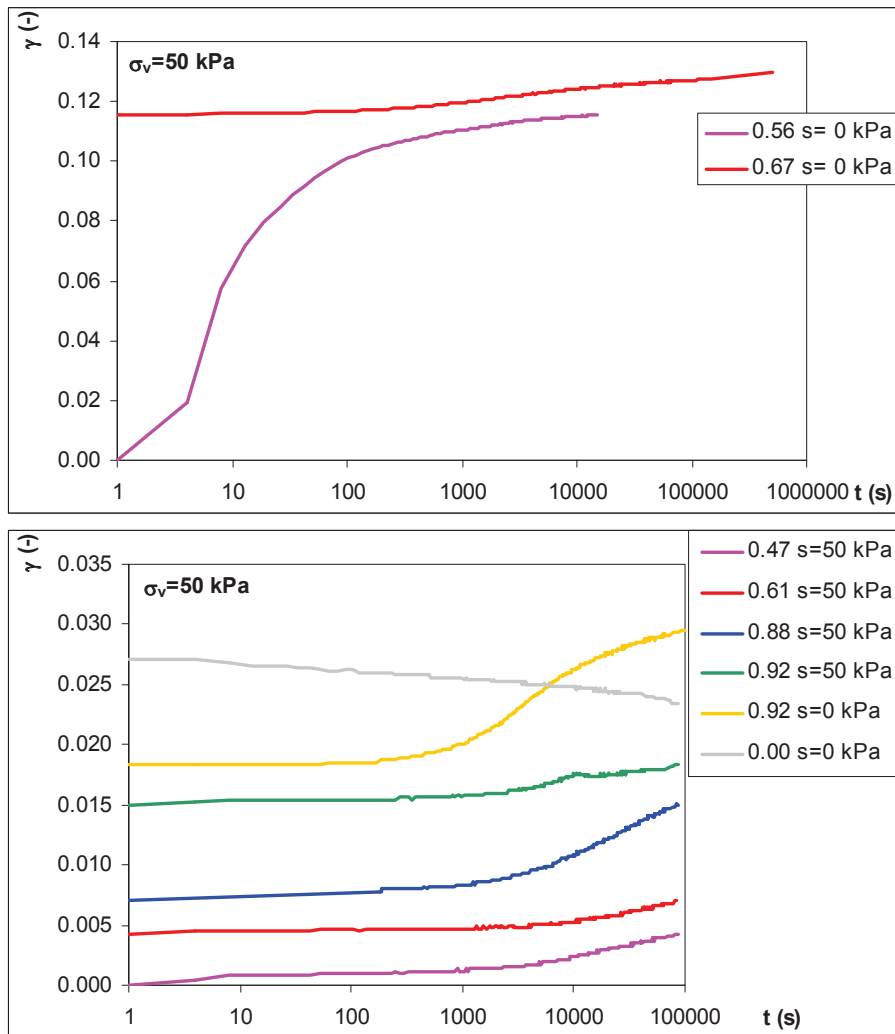


Slika 13.24: Lezenje zemljine pri vertikalni obremenitvi 50 in 100 kPa, s stopnjo strižne obremenitve 0.49 in 0.61 ter z in brez sukcije.

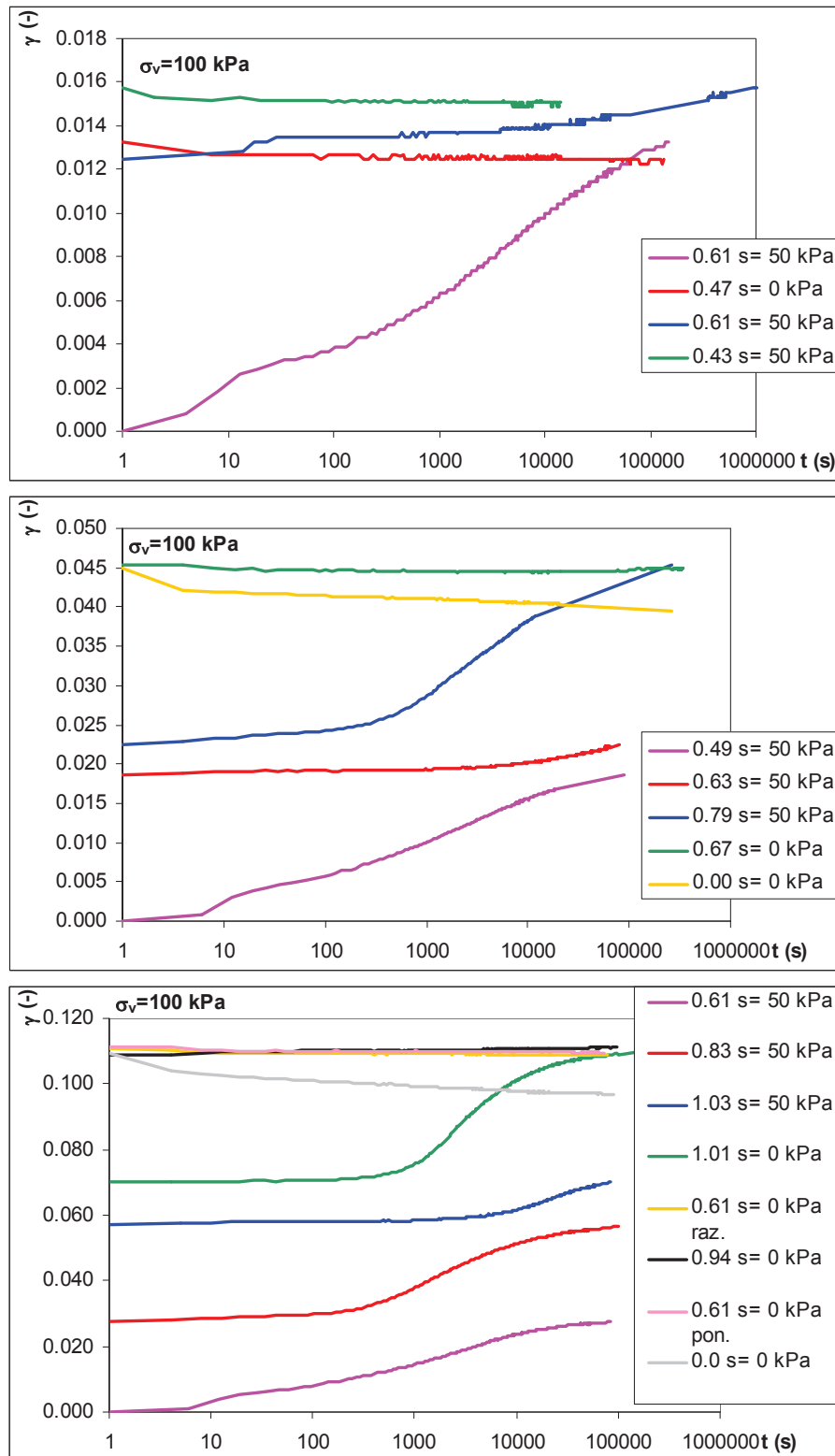
Figure 13.24: Creep tests at vertical load of 50 and 100 kPa, shear stress ratio of 0.49 and 0.61 and with or without suction.



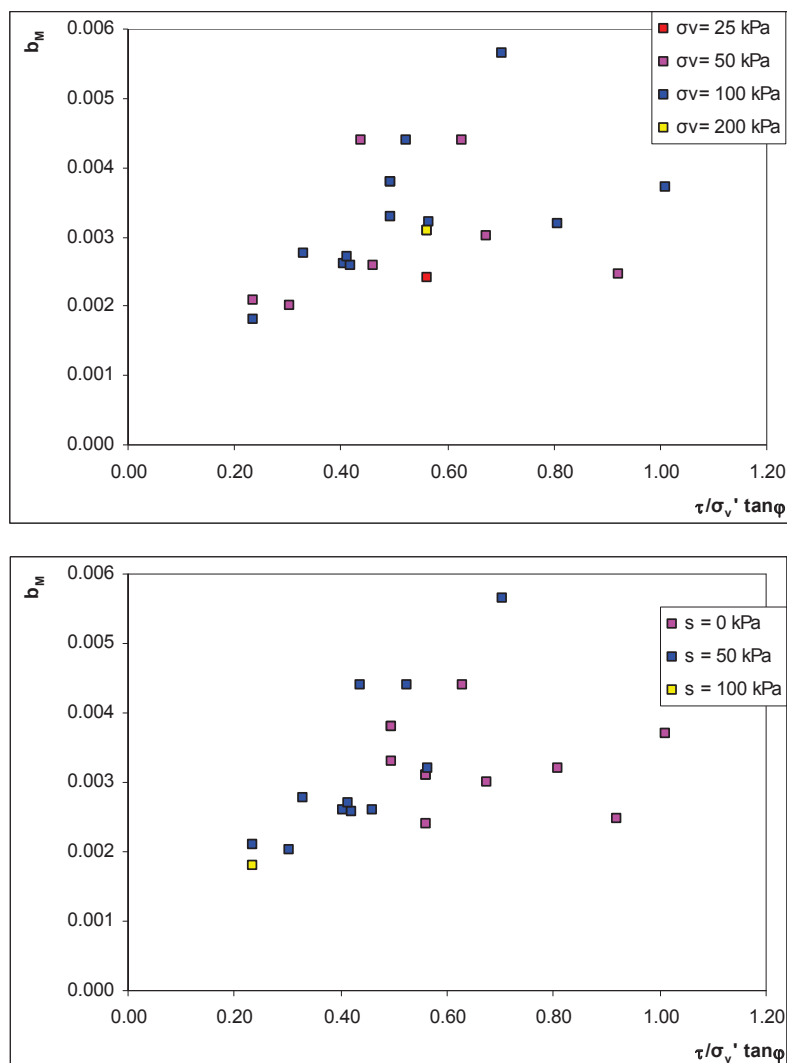
Slika 13.25: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja v odvisnosti od sukcije.
Figure 13.25: Relation between slope of logarithmic line for shear creep and suction.



Slika 13.26: Lezenje zemljine pri vertikalni obremenitvi 50 kPa za različne načine postopnega obremenjevanja. Zaporedje nizov podaja vrstni red strižnega obremenjevanja.
Figure 13.26: Creep tests at vertical load of 50 kPa and different load paths. The sequence of sets gives the order of shear loading.



Slika 13.27: Lezenje zemljine pri vertikalni obremenitvi 100 kPa za različne načine postopnega obremenjevanja. Zaporedje nizov podaja vrstni red strižnega obremenjevanja.
 Figure 13.27: Creep tests at vertical load of 100 kPa and different stress paths. The sequence of sets gives the order of shear loading.



Slika 13.28: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja za različne stopnje strižne obremenitve z upoštevanjem prispevka sukcije.

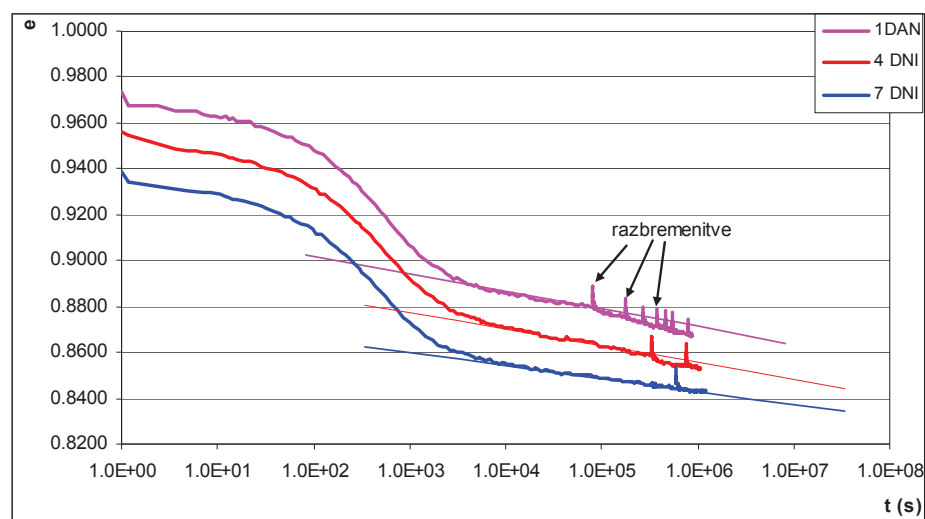
Figure 13.28: Slope of logarithmic line for shear creep for different shear stress ratio with calculated suction contribution.

13.10.5 Vpliv razbremenitve in ponovne obremenitve

Na plazju Slano blato ne bo prišlo do enosmernega obremenjevanja zemljine, ampak do nihanja pornih tlakov kot posledica vremenskih vplivov oziroma do spreminjanja sukcije zemljine. Nihanje obremenjevanja in razbremenjevanja smo simulirali v edometru in v enostavnem strižnem aparatu. V edometru smo vzorec zemljine stopenjsko obremenjevali in razbremenjevali med vertikalno obtežbo 50 in 100 kPa in sicer na treh vzorcih z različnimi časi obremenjevanja in razbremenjevanja (1, 4 ali 7 dni). V enostavnem strižnem aparatu pa smo povečevali oziroma zmanjšali strižno obremenitev.

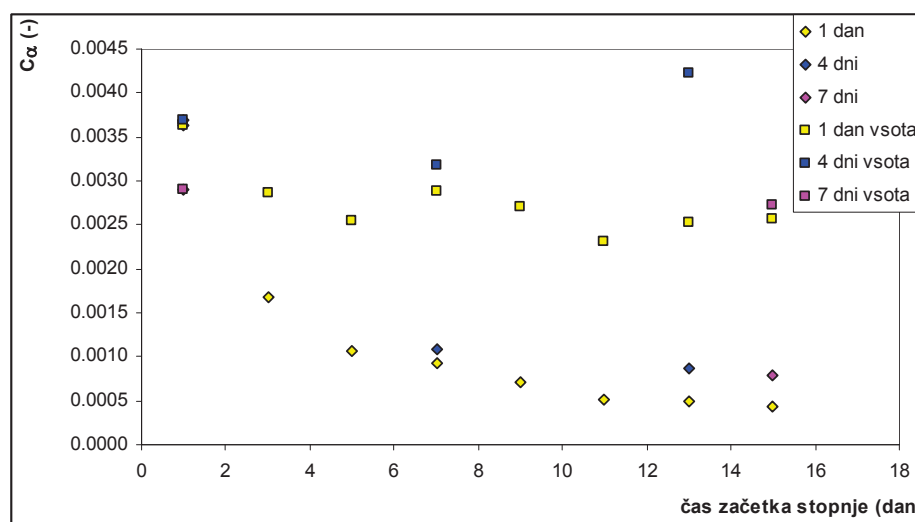
V edometru je imela vsaka nadaljnja stopnja obremenjevanja manjši naklon logaritemske premice sekundarne konsolidacije. V primeru, ko bi seštevali čas obremenitve pri določeni obremenilni stopnji (100 kPa), bi dobili nadaljevanje prejšnje obremenilne stopnje (slika 13.29). Na sliki 13.30 prikazujemo dejanske naklone logaritemske premice sekundarne konsolidacije in popravljene naklone za seštevke časa obremenilnih stopenj.

Podobno obnašanje smo izmerili tudi v primeru enostavnega striga za dva različna vzorca pri različnih sukijah in nivojih strižne obremenitve (slika 13.31 in 13.32). Obe preiskavi imata le eno stopnjo obremenitve in ponovne obremenitve.



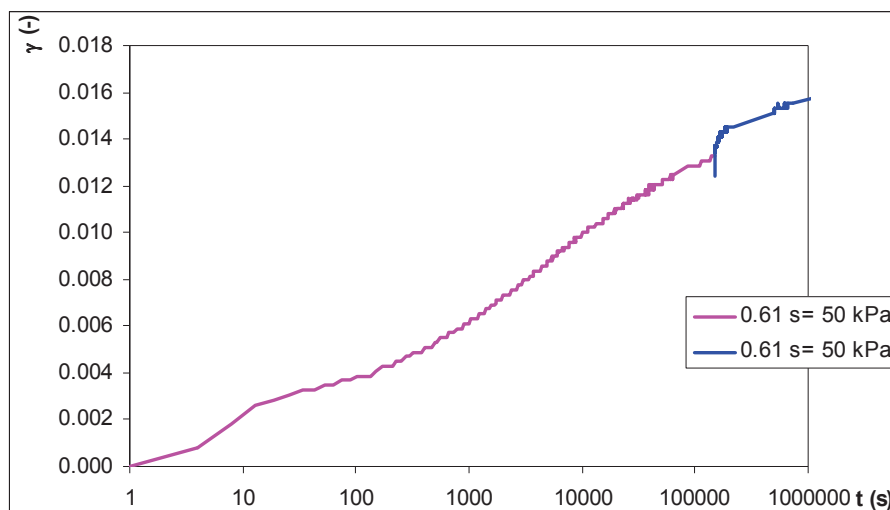
Slika 13.29: Konsolidacija primarne obremenitve in vseh ponovnih obremenitev, če smo sešteli čas prve obremenitve in ponovnih obremenitev.

Figure 13.29: Consolidation of primary loading and all reloading load steps, if sum of time of primary loading and reloading was used.



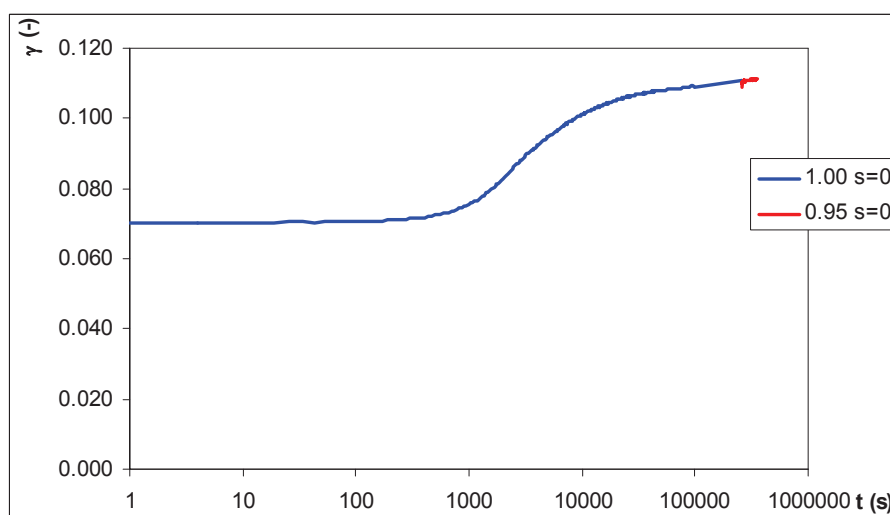
Slika 13.30: Naklon logaritemske premice sekundarne konsolidacije v primeru, ko smo upoštevali čas stopnje, in v primeru, ko smo sešteli čas vseh obremenitev.

Figure 13.30: Slope of logarithmic line for secondary consolidation in case when loading time and sum of loading time was used.



Slika 13.31: Primarna obremenitev in ponovna strižna obremenitev za primer vzorca pri stopnji strižne obremenitve 0,61 in sukciji 50 kPa.

Figure 13.31: Primary loading and reloading for sample at shear stress ratio 0,61 and suction 50 kPa.



Slika 13.32: Primarna obremenitev in ponovna strižna obremenitev za primer vzorca pri stopnji strižne obremenitve 0,95 in sukciji 0 kPa.

Figure 13.32: Primary loading and reloading for sample at shear stress ratio 0,95 and suction 0 kPa.

13.10.6 Zaključki

Na podlagi meritev lezenja lahko zaključimo, da so bile začetne deformacije po nanosu strižne obremenitve vzorcev zelo različne. Nakazuje se zveza med velikostjo deformacij in stopnjo strižne obremenitve ter odvisnost strižnih deformacij od hitrosti obremenjevanja. Vse preiskave izkazujejo ugoden vpliv sukcije na velikost deformacij. Velik vpliv na začetne deformacije ima verjetno tudi generacija pornih pritiskov kot posledica volumenskega krčenja zemljine, ki pa je nismo mogli meriti.

Lezenje zemljine v enostavnem strižnem aparatu je odvisno od stopnje obremenitve (slika 13.28), vendar so bile napake pri vrednotenju večje od dejanske spremembe hitrosti lezenja. Prav tako ne moremo zaznati vpliva vertikalne napetosti ali sukcije na velikost lezenja.

14 VREDNOTENJE REZULTATOV PREISKAV IN NUMERIČNO MODELIRANJE

V prvem sklopu tega poglavja bomo analizirali rezultate preiskav zasičene (točka 14.1) in nezasičene zemljine (točka 14.2) in predpostavili materialni model obnašanja zemljine (točka 14.3). Na koncu pa bomo prenesli z materialnim modelom poskušali opisati spreminjanje sukucije na plazu Slano blato (14.4). V tem poglavju bomo tudi opisali hitrost lezenja s časom in ocenili pomike na plazu Slano blato (14.5).

Model, ki ga želimo postaviti, mora biti podoben Cam clay modelu ali modificiranemu Cam clay modelu. Prav tako pa smo že opisali dva modela, ki preslikavata modificiran Cam clay model na obnašanje nezasičene zemljine. Preverili bomo obnašanje modificiranega Cam clay modela na zasičeni plazini iz plazu Slano blato in preverili obnašanje nezasičenih vzorcev. V drugem delu pa bomo ločeno od prvega modela predpostavili model lezenja in preverili njegovo obnašanje.

14.1 Zasičena zemljina

Zasičeno zemljino bomo ovrednotili z modificiranim Cam clay modelom. Iz podatkov v preglednicah 13.4 in 13.6 smo si izbrali parametre stisljivosti modificiranega Cam clay modela, na podlagi strižnih preiskav pa smo ocenili strižni kot φ' na 27° in kohezijo c' na 0 kPa. Vsi parametri modificiranega Cam clay modela so prikazani v preglednici 14.1. Za čim boljše vrednotenje smo malce spremenili modificiran Cam clay model. Uporabili smo popravek modela tečenja, ki je podoben popravku BEM modela (Alonso et al., 1990) (enačba (8.40)). Parameter α je izbran tako, da K_0 stanje ne povzroči bočnih deformacij. Razbremenilni strižni modul smo zapisali kot funkcijo sferične napetosti p' :

$$G = G_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}} \right)^m \quad (14.1)$$

kjer je G_{ref} referenčni strižni modul pri sferični napetosti p'_{ref} , m oblikovni parameter.

Preglednica 14.1: Parametri modificiranega Cam clay modela.

Table 14.1: Parameters of modified Cam clay model.

parameter	enota	količina
φ'	°	27.0
c	kPa	0.0
M		1.07
K_0		0.55
ρ_s	t/m ³	2.72
$\Gamma=v(p'=1)$		2.59
λ		0.154
κ		0.038
α		0.37
G_{ref}	kPa	17

14.1.1 Izbira parametra α

Parameter α ni neodvisen materialni parameter, ampak je odvisen od strižnega kota. Koefficient mirnega zemeljskega pritiska lahko zapišemo kot:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' = \frac{6 - 2M}{6 + M} \quad (14.2)$$

Kjer je K_0 koefficient mirnega zemeljskega pritiska, M konstanta trenja zemljine.

Prav tako pa imamo definirano razmerje med q' in p' ter p' in p'_0 :

$$\eta = \frac{q}{p} = \frac{3 - 3K_0}{1 + 2K_0} = \frac{9M}{18 - 3M} \quad (14.3)$$

$$\frac{p'_0}{p'} = \frac{(18 - 3M)^2 + 81}{(18 - 3M)^2} = \frac{45 - 12M + M^2}{36 - 12M + M^2} \quad (14.4)$$

Razmerje med plastičnimi, strižnimi in volumenskimi deformacijami je definirano po enačbi:

$$\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2q'\alpha}{M^2(2p' - p'_0)} = \frac{18\alpha(18 - 3M)}{M((18 - 3M)^2 - 81)} \quad (14.5)$$

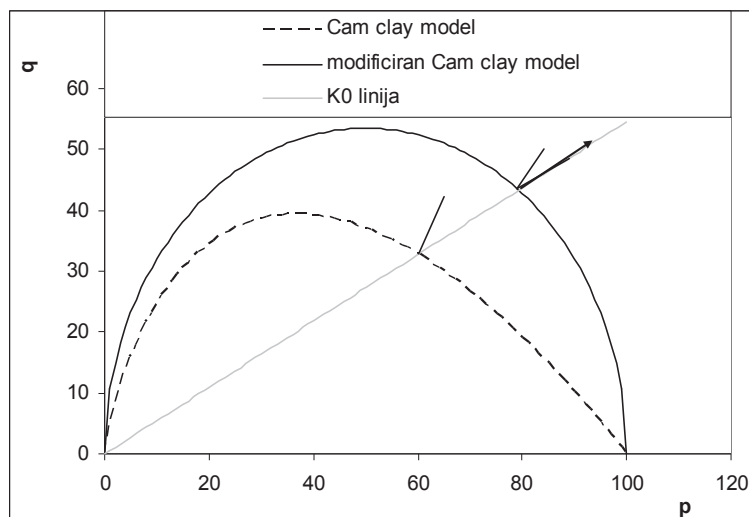
Deformacije ε_3 (v bočni smeri) izračunamo po naslednji enačbi:

$$d\varepsilon_3^p = \frac{1}{3}d\varepsilon_v^p - \frac{1}{2}d\varepsilon_d^p \quad (14.6)$$

Če v zgornjo enačbo vstavimo razmerja med $d\varepsilon_d^p$ in $d\varepsilon_v^p$, q' in p' ter p' in p'_0 , dobimo pogoj za parameter α .

$$\alpha = \frac{M((18 - 3M)^2 - 81)}{27(18 - 3M)} \quad (14.7)$$

Primer funkcije tečenja za Cam clay in modificiran Cam clay prikazuje slika 14.1. Na sliki smo tudi označili potrebno smer tečenja, da zagotavljamo nične bočne deformacije ob K_0 obremenjevanju.



Slika 14.1: Meja tečenja za modificiran in originalni Cam clay model. S puščico je prikazan popravek »smeri« tečenja.

Figure 14.1: Yield surface for original and modified Cam clay model. The corrected flow rule is shown by arrow.

14.1.2 Popravek strižnega kota φ'

Gutierrez et al. (2009) podajajo popravek strižnega kota zemljine v enostavnem strižnem aparatu, saj je strižni kot odvisen od rotacije osi glavnih napetosti. Strižni kot v strižnem aparatu izračunamo iz razmerja strižne sile in vertikalne obtežbe, dejansko pa je definiran na razmerju glavnih napetosti. Napaka, ki jo pri tem naredimo, je odvisna od rotacije osi glavnih napetosti. Rotacija osi glavnih napetosti pa je odvisna od stopnje obremenitve vzorca zemljine in se spreminja od začetka striženja do porušitve. Podajamo enačbe za popravek strižnega kota zemljine v enostavnem strižnem aparatu pri porušitvi:

$$\tan \varphi_{ss} = \frac{\sin \varphi \sin 2\alpha}{1 + \sin \varphi \cos 2\alpha} \quad (14.8)$$

kjer je φ_{ss} strižni kot enostavnega striga, α kot rotacije glavnih osi izračunan kot:

$$\kappa \tan \alpha = \frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \varphi_{ss} \quad (14.9)$$

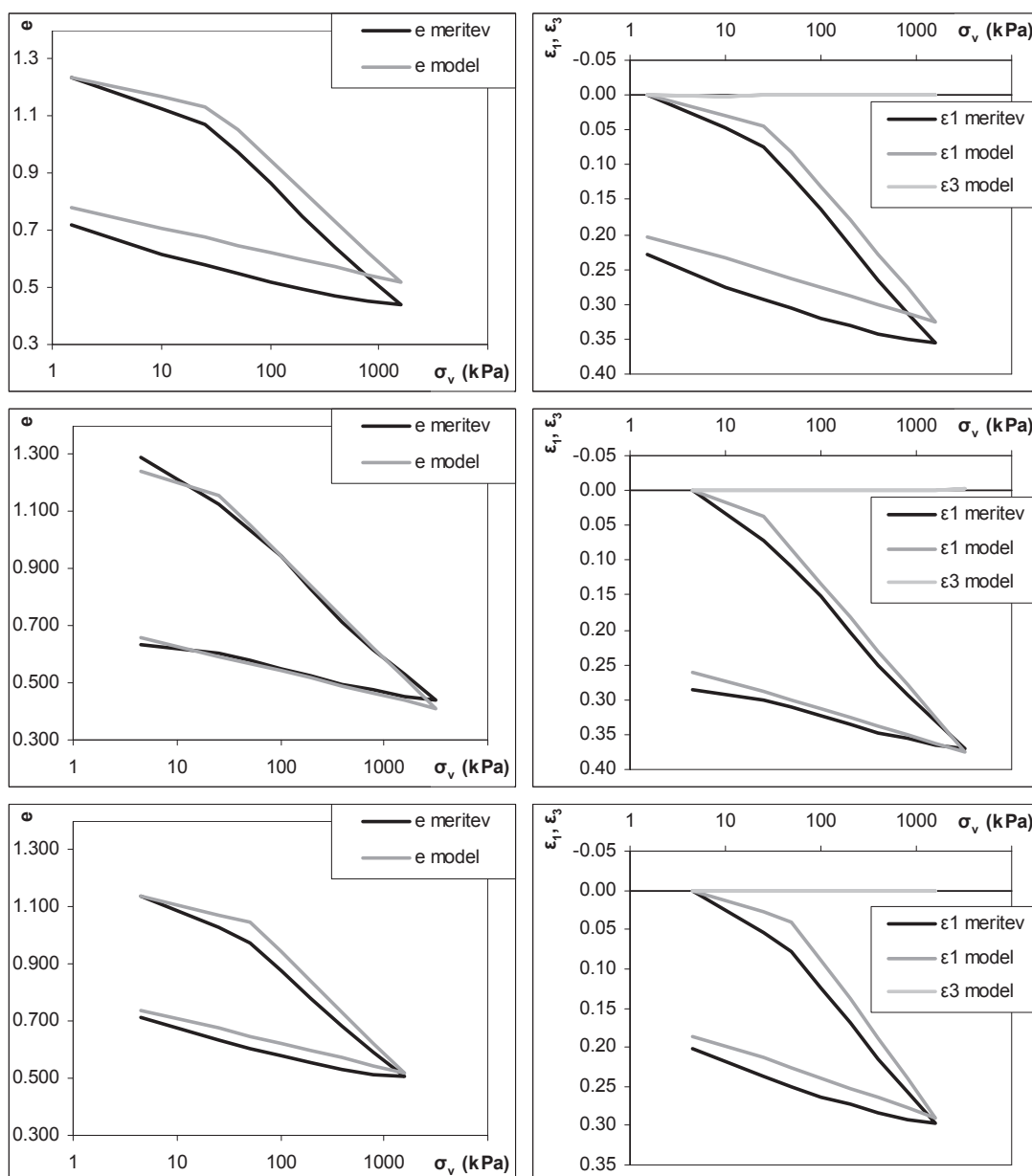
kjer je κ razmerje med horizontalnimi in vertikalnimi napetostmi (običajno K_0)

V našem primeru dobimo iz rezultatov direktnih in enostavnih strižnih preiskav popravljen strižni kot na 27° , kar je enako strižnemu kotu dobljenem s triosnimi preiskavami.

14.1.3 Vrednotenje edometrskih preiskav

Z izbranimi parametri (preglednica 14.1) smo ovrednotili vse edometrskе preiskave, preiskave v triosni celici in enostavne strižne preiskave SESA. Rezultati edometrskih preiskav in modelne napovedi edometrskih preiskav so prikazane na sliki 14.2. Kljub temu, da smo uporabili samo en niz parametrov smo dobili dobro ujemanje z vsemi edometrskimi meritvami. Največje odstopanje je pri edometru z oznako 2005 70 mm, ki je pripadal drugemu vzorcu zemljine in je imel nekoliko drugačne

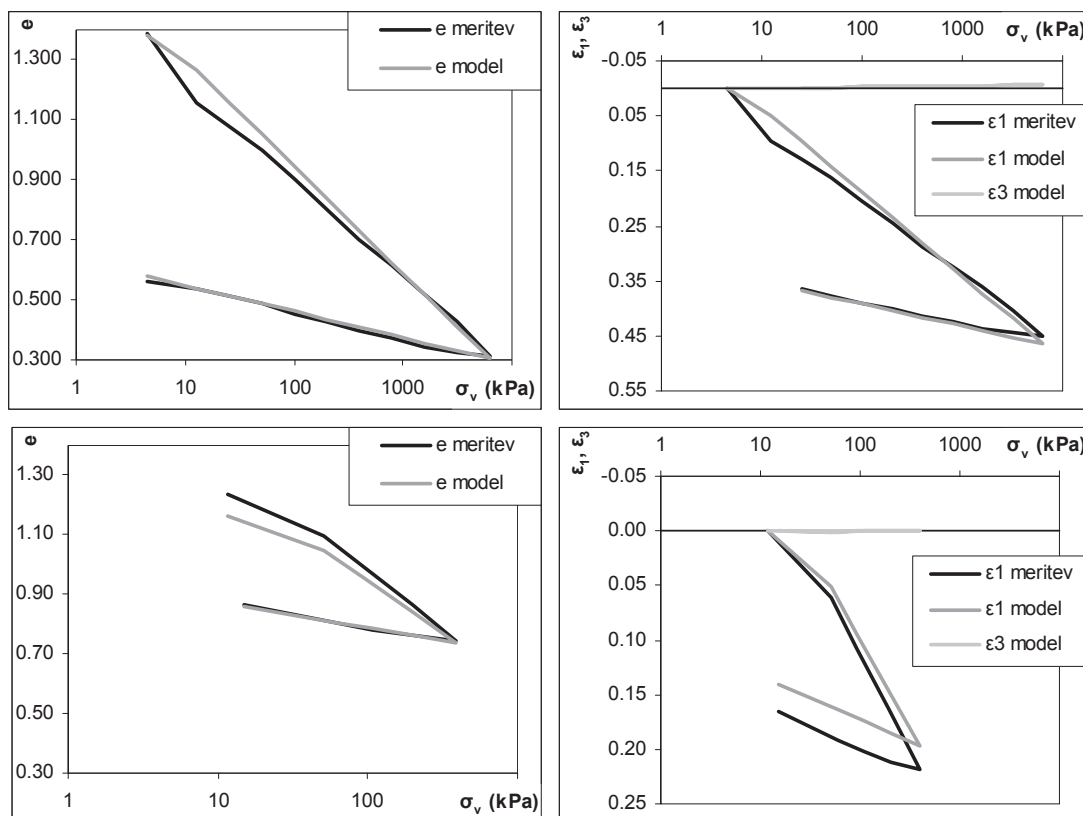
indeksne lastnosti. Maksimalne računске bočne deformacije, ki jih sicer ne bi smelo biti, so približno 0,5%, običajno pa so manjše od 0,1%. Računske bočne deformacije so posledica elastičnih deformacij in ne čisto dobrega ujemanja predpostavljene razbremenilnega strižnega modula pri vseh testih. Razbremenilni strižni modul, je namreč odvisen tudi od začetnega stanja zemljine.



se nadaljuje...

Slika 14.2: Edometerske meritve in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2005 70 mm, 2010 70 mm vz1, 2010 70 mm vz2, 2010 50 mm in 2010 SESA.

Figure 14.2: Odometer measurements and model prediction.

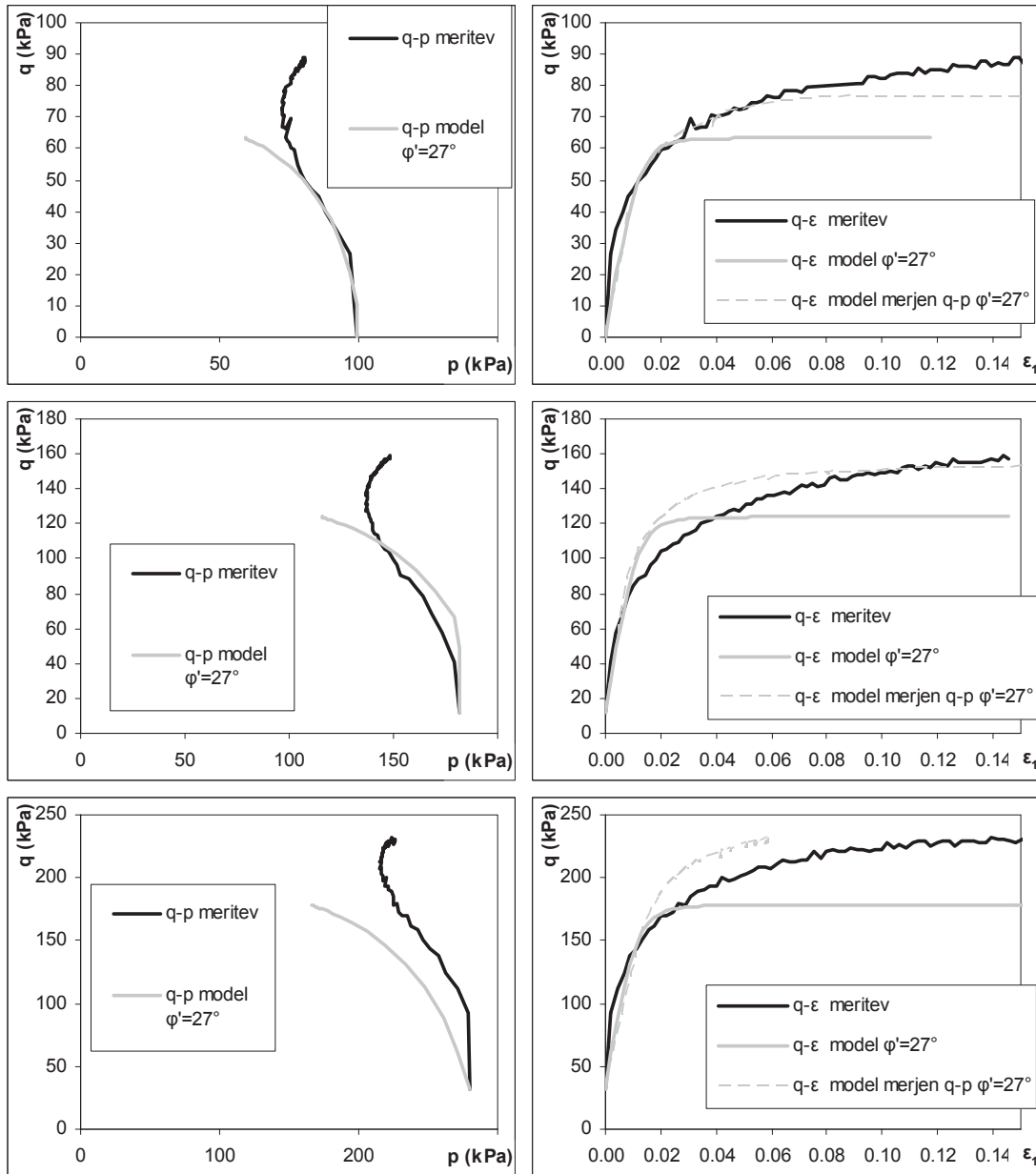


Slika 14.2: Edometrične meritve in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2005 70 mm, 2010 70 mm vz1, 2010 70 mm vz2, 2010 50 mm in 2010 SESA.

Figure 14.2: Odometer measurements and model prediction.

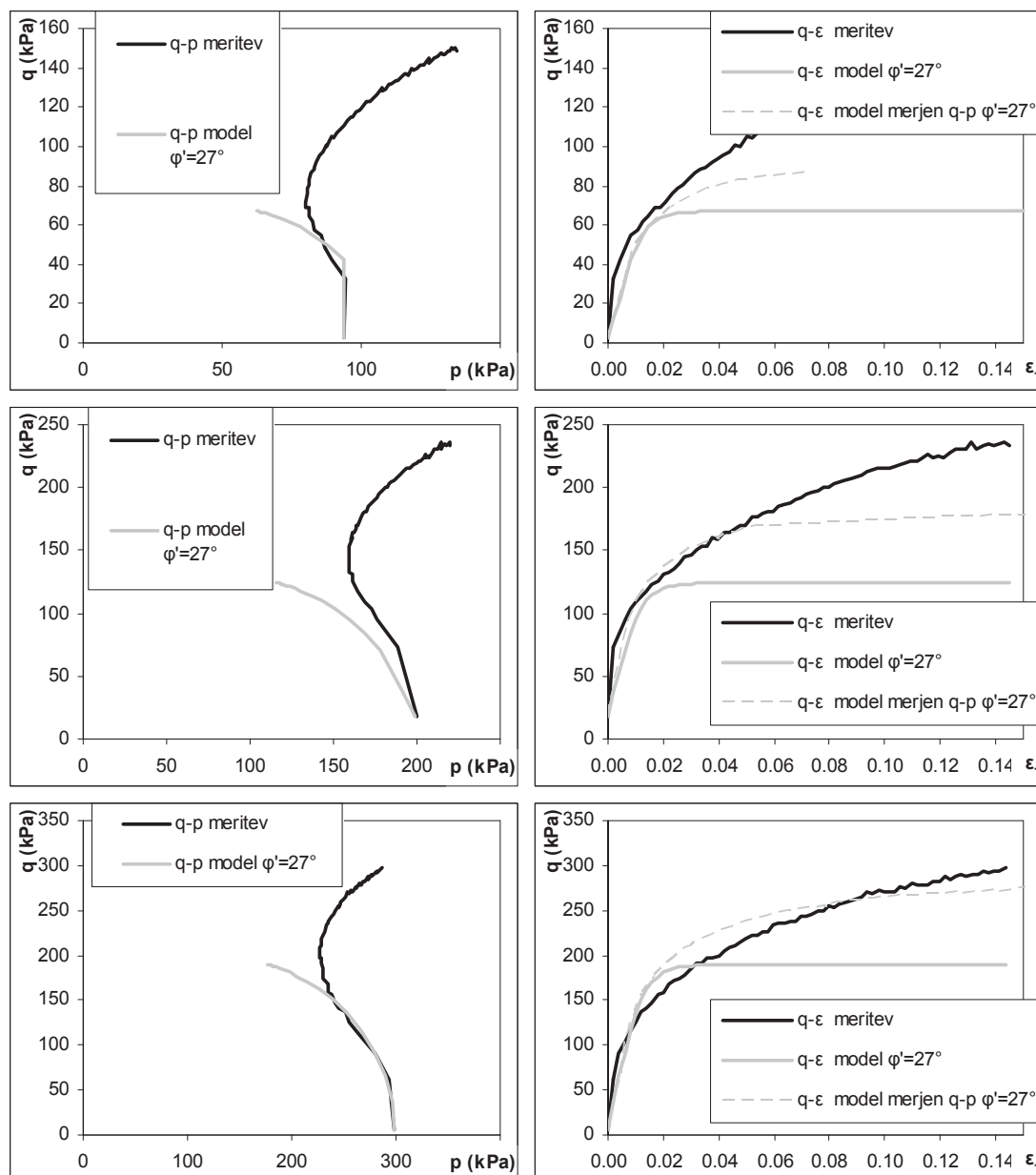
14.1.4 Triosne preiskave

Na slikah 14.3 in 14.4 prikazujemo modelno napoved in dejansko obnašanje triosnih preiskav. Pri vrednotenju preiskav smo vzorcu vsiljevali deformacijo in ne napetostnih pogojev. Predstavljeni so rezultati testov na zemljini vgrajeni na meji židkosti in zemljini vgrajeni na meji plastičnosti. Vzorci vgrajeni pri meji plastičnosti izkazujejo manjšo prekonsolidacijo ($OCR=1.1$). Dobili smo dokaj slabo ujemanje modelne napovedi z meritvami. Pri deformacijah večjih od 5% za primer židkega materiala in pri deformacijah večjih od 2% za primer plastičnega materiala model odpove, saj ne povečuje več deviatorja napetosti in sferne napetosti. To je posledica modelnega obnašanja, saj bi povečanje napetosti pomenilo premik meje tečenja, kar pa zaradi nedreniranih pogojev ni možno, saj niso možne volumenske deformacije. V kolikor se v model, vstavi dejanske napetosti se modelna napoved še bolje ujema z meritvami (črtkana črta).



Slika 14.3: CIU meritve v triosni celici in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2002 0.08 mm $w = w_L$ stopnje 100, 200 in 300 kPa.

Figure 14.3: Results from triaxial cell for CIU test. From the top to bottom are test samples: 2002 0.08 mm $w = w_L$ at 100, 200 in 300 kPa.



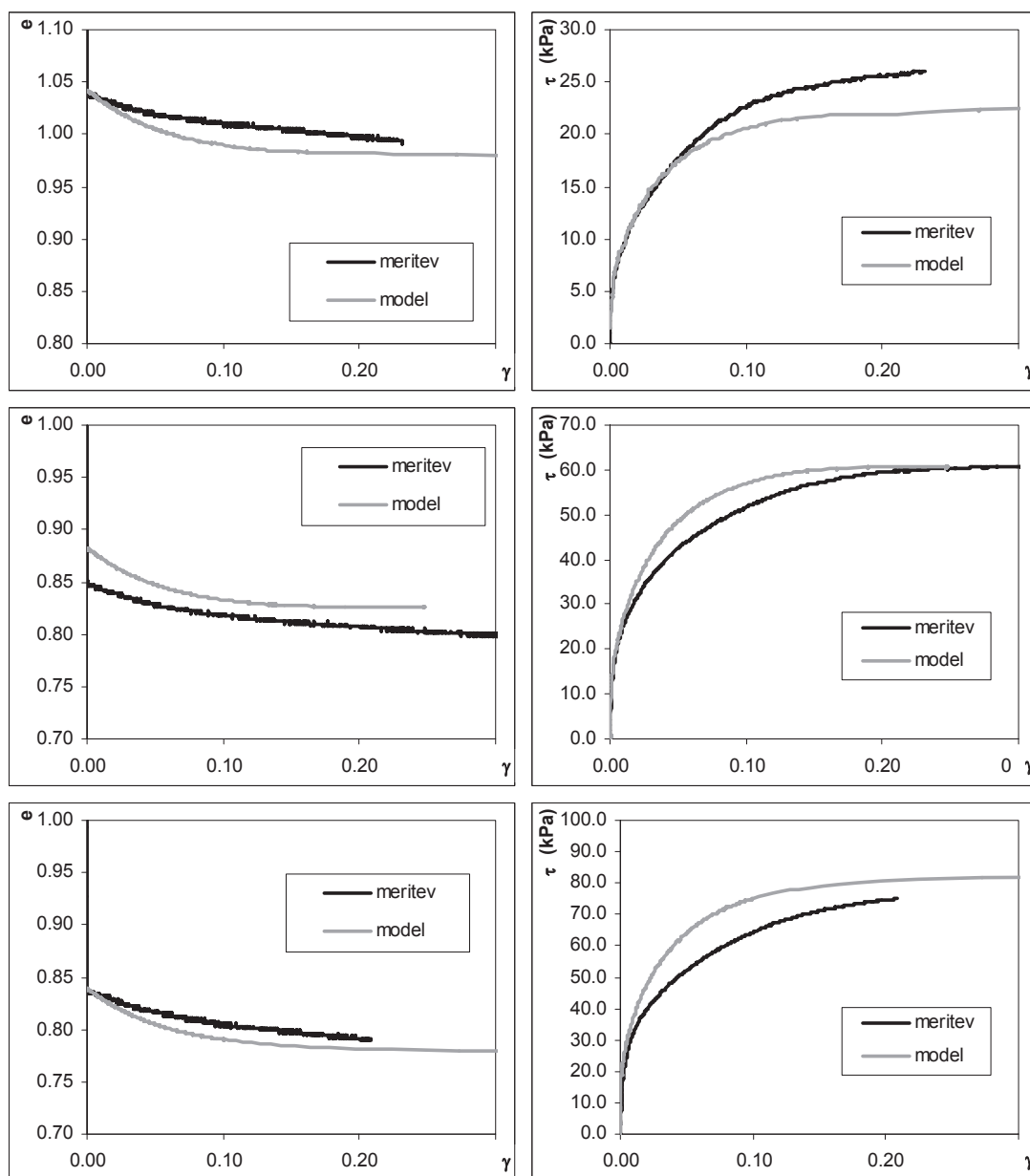
Slika 14.4: CIU meritve v triosni celici in modelna napoved. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci: 2002 0.08 mm $w = w_p$ stopnje 100, 200 in 300 kPa.

Figure 14.4: Results from triaxial cell for CIU test. From the top to bottom are test samples: 2002 0.08 mm $w = w_p$ at 100, 200 in 300 kPa.

14.1.5 Enostavne strižne preiskave

Podobno kakor triosne preiskave smo preverili tudi obnašanje zemljine v enostavnem strižnem aparatu. Izvedli smo samo eno enostavno strižno preiskavo in sicer pri vertikalnih obremenitvah 50, 150 in 200 kPa. Na sliki 14.5 podajamo meritve in modelno obnašanje enostavnih strižnih preiskav. V enostavnem strižnem aparatu merimo le vertikalno obremenitev in strižno napetost na zgornji ploskvi. Za izračun modificiranega Cam clay modela pa potrebujemo vse tri glavne napetosti. Te smo izračunali po enačbah, ki jih za enostavni strižni preskus predpostavljajo Gutierrez et al. (2009). Vidimo zadovoljivo ujemanje meritev na območju strižnih deformacij do ene polovice maksimalne obremenitve, nato pa se obnašanje modela prične razlikovati od merjenega. Preizkušanca pri 150 in

200 kPa vertikalne obremenitve pri večjih strižnih deformacijah podcenjujeta strižne deformacije. Preizkušane pri 50 kPa, izkazuje višjo strižno trdnost kakor jo ima modelna napoved in precenjuje strižne deformacije. To je posledica kohezije, ki so jo preiskave v enostavnem strižnem aparatu izkazovale, v modelu pa jih nismo upoštevali. Če bi izračunali strižni kot zemljine na podlagi maksimalnih strižnih napetosti, bi dobili strižni kot $24,1^\circ$, kar je enako strižnemu kotu izmerjenemu v direktnem strižnem aparatu. Iz tega vidimo, da moramo v model podati pravilno izračunani strižni kot. Na sliki 14.5 tudi vidimo, da so se vsi preizkušanci med preiskavo stiskali. Modelna napoved stikanja preizkušancev med striženjem je nekoliko večja od dejanskega obnašanja.



Slika 14.5: Meritve v enostavnem strižnem aparatu. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci pri vertikalni obremenitvi 50, 150 in 200 kPa.

Figure 14.5: Results from simple shear tests. From the top to bottom are test samples with vertical stress 50, 150 in 200 kPa.

14.2 Nezasičena zemljina

Vpliv sukcije na volumenske spremembe in trdnost zemljine bomo opisali z Bishopovim (1959) popravkom efektivne napetosti. V prvem delu bomo ovrednotili celotno retencijsko krivuljo, v drugem in tretjem delu pa bomo ovrednotili vpliv sukcije na deformacijske in trdnostne lastnosti zemljine. Med vrednotenjem retencijske krivulje bomo že upoštevali volumenske spremembe, ki jih povzroči sukcija.

14.2.1 Retencijska krivulja

V poglavju 4 smo obravnavali retencijsko krivuljo in načine opisa retencijske krivulje. Za opis retencijske krivulje lahko uporabimo enega izmed naslednjih parametrov: gravimetrična vlaga, stopnja zasičenosti, volumetrična vlaga ter druge iz teh količin izpeljane vrednosti. Ker se zemljina stiska zaradi efektivnih napetosti, ki so posledica prirasta totalne napetosti in prispevka sukcije, bi bilo smiselno volumetrično vlago zemljine zapisati kot maksimalno možno vlago, ki je posledica gostotnega stanja kot posledica napetostne poti in zmanjšanje maksimalne možne vlage zaradi stopnje zasičenosti zemljine. Volumetrično vlago bomo tako zapisali po naslednji enačbi:

$$\theta = nSr = \frac{v-1}{v} Sr = \frac{e}{e+1} Sr \quad (14.10)$$

Stisljivost zemljine bomo opisali v naslednjem poglavju. V tem poglavju pa se bomo omejili na vpliv sukcije na stopnjo zasičenosti zemljine.

Iz preiskave meja krčenja (slika 13.6) lahko izračunamo stopnjo zasičenosti v odvisnosti od vlage za primer vzorca brez vertikalne obtežbe. Iz retencijske krivulje lahko zemljini z znano vlago pripišemo sukcijo. V preglednici 14.2 podajamo vse izmerjene količine ter ocenjene sukcije iz retencijske krivulje. Na sliki 14.6 je podana odvisnost gravimetrične vlage, volumetrične vlage in stopnje zasičenosti od sukcije. Na sliki 14.7 pa so prikazane različne funkcije za opis retencijske krivulje. Vse funkcije smo prilagodili tako, da izkazujejo odvisnost stopnje zasičenosti od sukcije. Pri tem se moramo zavedati, da sta Fredlund in Xingov (1994) in van Genuchtenov (1980) model namenjena opisu vlage v odvisnosti od sukcije. Najboljše ujemanje med napovedjo stopnje zasičenosti v odvisnosti od sukcije in dejanskimi meritvami izkazuje funkcija Brooks in Corey (1964) (prikazana spodaj), ki jo bomo uporabili v nadaljevanju. Parametre funkcije podajamo v preglednici 14.3.

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

Preglednica 14.2: Meritve sukcije, vlag in stopnje zasičenosti za vzorec 2010.

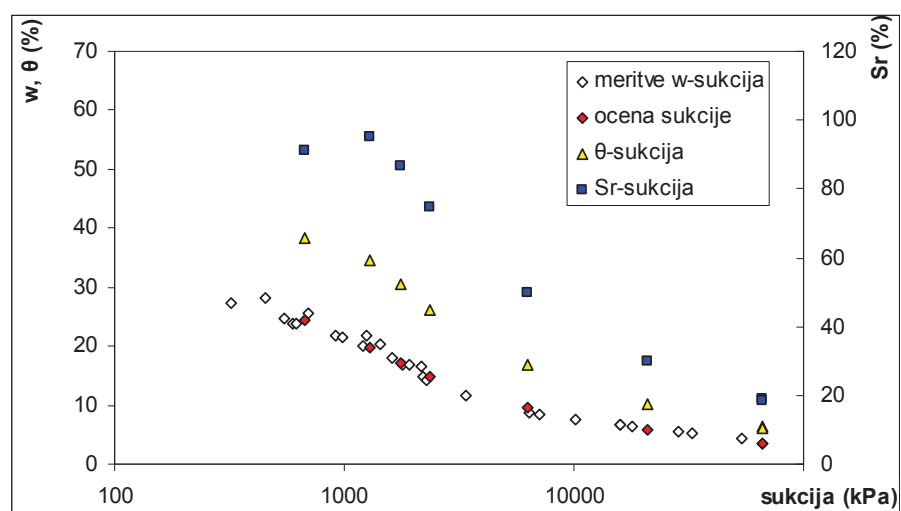
Table 14.2: Suction, volumetric and gravimetric water content and saturation measurements for sample 2010.

w (%)	e	e_w	S_r (%)	θ (%)	sukcija (kPa)
54.1	1.455	1.473	101	60.0	-
51.0	1.392	1.386	100	58.0	-
24.5	0.731	0.665	91	38.4	679
19.9	0.570	0.540	95	34.4	1284
17.2	0.538	0.467	87	30.4	1760
14.9	0.543	0.405	75	26.2	2350
9.5	0.518	0.257	50	16.9	6251
5.7	0.520	0.156	30	10.2	21033
3.4	0.493	0.094	19	6.3	66313
3.4	0.505	0.094	19	6.2	66335
0.0	0.493	0.000	0	0.0	1000000
0.0	0.484	0.000	0	0.0	1000000

Preglednica 14.3: Parametri Brooks in Coreyve (1964) funkcije.

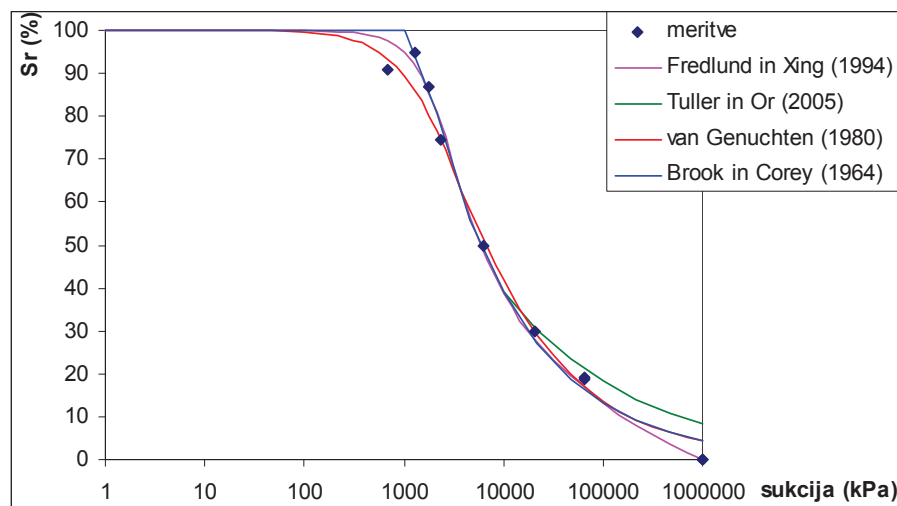
Table 14.3: Parameters of Brooks and Corey (1964) function.

Parameter	
S_{r_s} (%)	100
S_{r_r} (%)	0
α_{BC}	1360 kPa
λ_{BC}	0,473



Slika 14.6: Meritve sukcije, vlage in stopnje zasičenosti za primer neobremenjenega vzorca.

Figure 14.6: Suction, volumetric and gravimetric water content and saturation measurements for unloaded sample.



Slika 14.7: Opis meritev z različnimi funkcijami za opis retencijske krivulje.

Figure 14.7: Measured data and different functions for description of the soil water characteristic curve.

14.2.2 Volumenske spremembe v odvisnosti od sukcije

Za opis volumenskih sprememb z modificiranim Cam clay modelom moramo poznati napetostno stanje na vzorcu. Če hočemo uporabiti popravek efektivnih napetosti, moramo poznati odvisnost parametra popravka efektivne napetosti χ od sukcije ali stopnje zasičenosti. Slednjega bomo v našem primeru določili iz meritve meje krčenja. Poleg tega moramo upoštevati nastanek krčitvenih razpok. Slednje moramo upoštevati pri vrednotenju meje krčenja in sukcijjskih edometrijskih preiskav. Pojav krčitvenih razpok si bomo podrobneje pogledali pri vrednotenju edometrijskih preiskav.

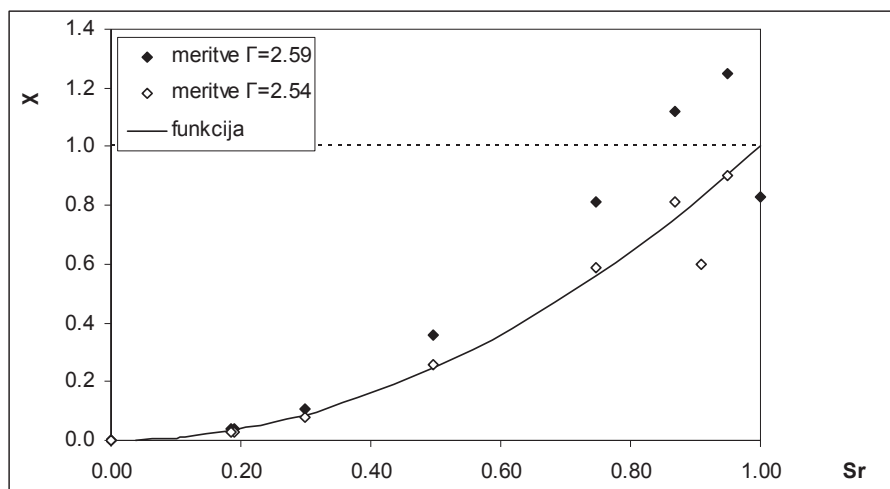
14.2.2.1 Krčenje zemljine.

Iz preglednice 14.2 lahko razberemo vrednosti sukcije, stopnje zasičenosti in količnika por v odvisnosti od vlažnosti. Efektivna sferna napetost je $p' = \chi(u_a - u_w)$ ter $q = 0$, saj preizkušanci niso bili obremenjeni s totalnimi napetostmi. Na podlagi modificiranega Cam clay modela lahko za vsak količnik por iz preiskave meje krčenja izračunamo potrebno sferno napetost p' za volumensko stanje vzorca. Parameter popravka efektivne napetosti χ pa je razmerje med potrebno sferno napetostjo in sukcijo. Iz slike 14.8 vidimo rezultat takšne analize. Tako dobljeni parameter χ je na območju stopnje zasičenosti 80-100% večji od 1. To bi pomenilo, da manjša sukcija povzroči večjo sferno napetost. Vendar, če malenkost prilagodimo deviško kompresijsko krivuljo, dobimo parameter χ enak 1 pri popolnem zasičenju. Edini popravek deviške kompresijske krivulje je, da smo spremenili količnik por pri $p' = 1$ kPa. S tem smo zemljino umetno stisnili za 2%. Podoben rezultat bi dobili, če bi malenkost spremenili naklon deviške kompresijske krivulje. Iz narejene analize smo dobili zvezo med parametrom χ in stopnjo zasičenosti:

$$\chi = Sr^2 \quad (14.11)$$

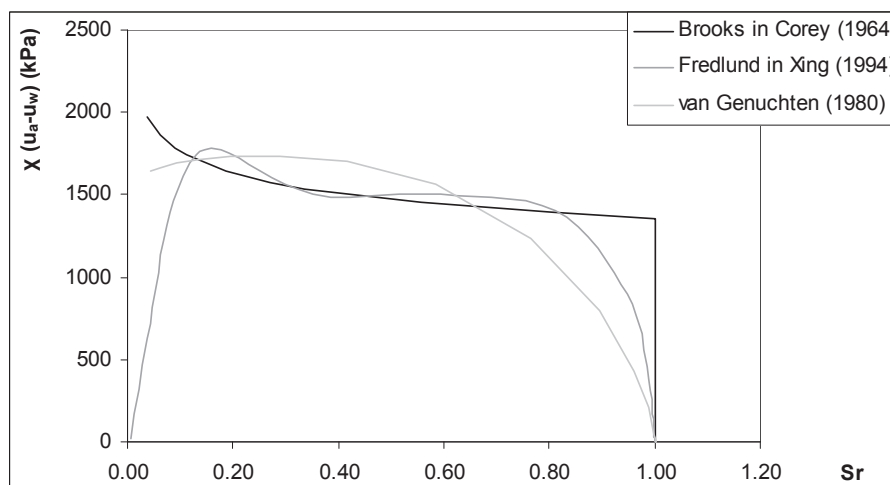
Na sliki 14.9 smo izrisali $\chi(u_a - u_w)$ oziroma sukcijjsko napetost (Lu in Likos, 2006), ki smo jo izračunali na podlagi napovedi stopnje zasičenosti, ki so jo podale različne funkcije za opis retencijske krivulje (slika 14.7). Iz slike vidimo, da Fredlund in Xingov (1994) model retencijske krivulje

popolnoma izniči sukucijsko napetost v zemljini, če slednjo popolnoma posušimo. Brooks in Coreyev (1964) model in van Genuchtenov (1980) model pa izkazujeta podobno obnašanje pri nizkih stopnjah zasičenosti. Pri visokih stopnjah zasičenosti pa imamo problem togosti van Genuchtenovega opisa, ki prehitro zmanjšuje stopnjo zasičenosti zemljine. Na podlagi različnih funkcij za opis retencijskih krivulj in enačbe za popravek efektivne napetosti χ smo izračunali predvideno obnašanje vzorca zemljine med preiskavo meje krčenja (slika 14.10). Iz slike vidimo, da van Genuchtenov (1980) in Fredlund in Xingov (1994) model izkazujeta desaturacijsko območje že pri vlagi 30%. Vsi modeli dobro opišejo obnašanje zemljine med 15 in 3 % vlage. Pri vlagah pod 3% pa Fredlund in Xingov model popolnoma izniči sukucijsko napetost v zemljini in s tem močno povzroči nabrekaje vzorca. Brook in Coreyev (1964) model pa preceni vpliv sukucije in preveč stisne vzorec zemljine. Van Genuchtenov (1980) model v tem območju najboljše zajame obnašanje zemljine. Zavedati se moramo, da vlaga pod 3% v naravi skorajda ni možna, saj ima zračno suha zemljina vlago 3-4%.



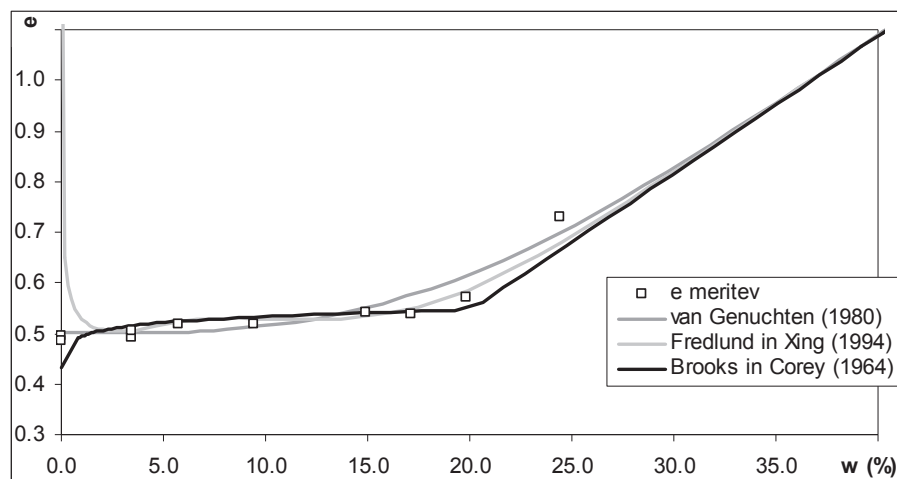
Slika 14.8: Odvisnost parametra popravka efektivne napetosti χ od stopnje zasičenosti.

Figure 14.8: Correlation between effective stress parameter χ and saturation.



Slika 14.9: Sukucijska napetost v odvisnosti od stopnje zasičenosti.

Figure 14.9: Suction stress correlation with saturation.

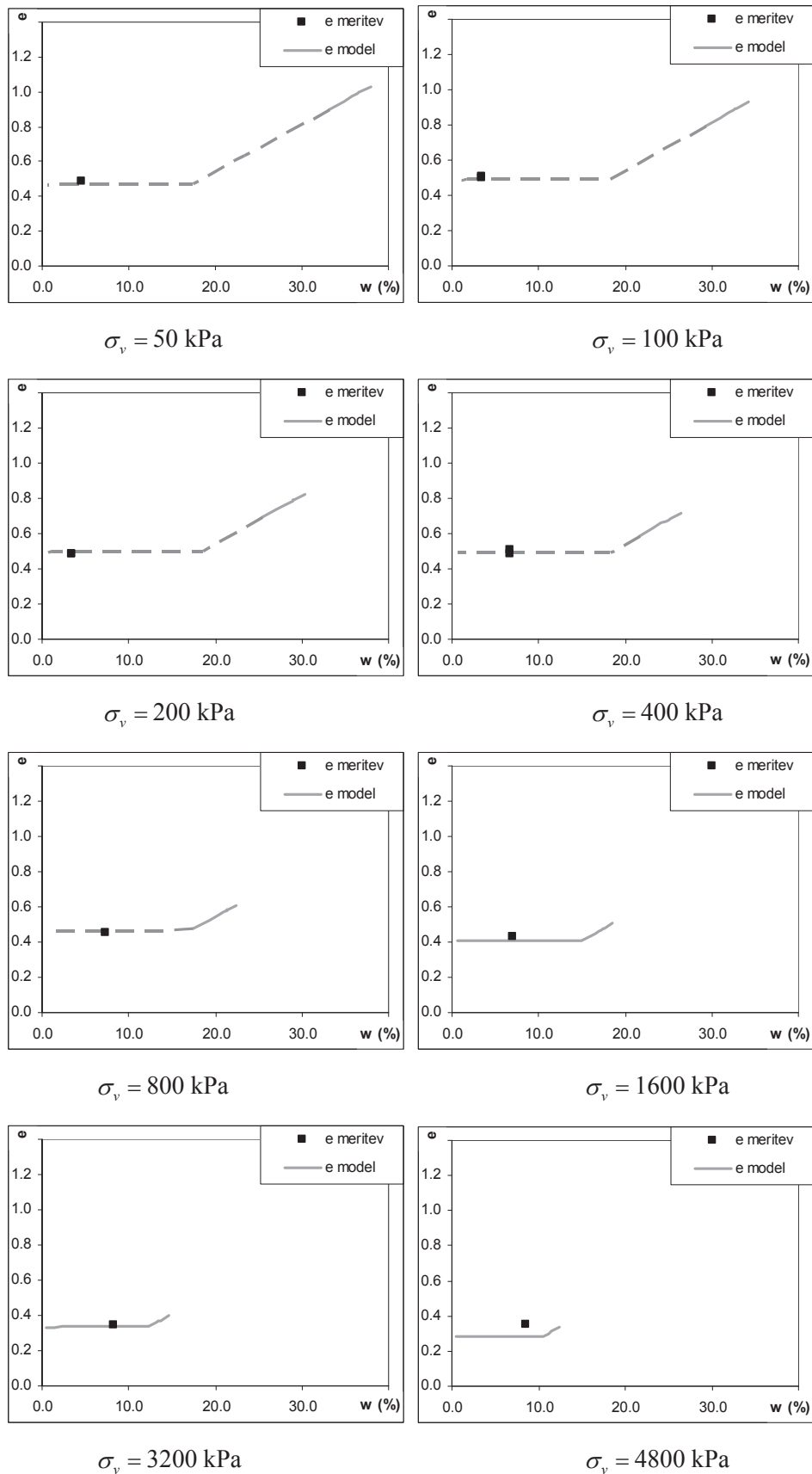


Slika 14.10: Krčenje vzorca med sušenjem in modelne napovedi krčenja.

Figure 14.10: Shrinkage of the sample during drying and shrinkage prediction by different models.

Na sliki 13.6 smo podali tudi vpliv vertikalne obtežbe na mejo krčenja oziroma količnik por pri meji krčenja. Zaradi pomanjkljive opreme nismo zmožni izdelati celotne krivulje sušenja ampak samo eno točko na tej liniji. Ob ponovitvah bi bili sicer zmožni narediti več točk, vendar bi bila takšna preiskava zelo zamudna. Namesto tega lahko uporabimo modificiran Cam clay model, Bishopov popravek efektivne napetosti ter vpliv krčitvenih razpok na efektivno napetostno stanje. Na sliki 14.11 tako podajamo modelno napoved sušenja vzorca zemljine v edometru pri različnih bremenskih stopnjah. Pri vrednotenju smo zanemarili zvišanje totalne vertikalne napetosti zaradi krčitvenih razpok. Del krivulje sušenja vzorca, kjer so po modelni napovedi krčitvene razpoke je označen s črtkano črto. Vzorci z vertikalno obremenitvijo pod 800 kPa izkazujejo krčitvene razpoke. Vzorec obremenjen z 800 kPa sicer izkazuje krčitvene razpoke, vendar je bila volumska deformacija od pričetka pojava krčitvenih razpok do vlage pri kateri je bil vzorec razgrajen manjša od 1%. Vzorci obremenjeni s 1600 ali več kPa pa niso izkazovali krčitvenih razpok. Modelna napoved pojava krčitvenih razpok je zelo podobna opazovanemu dogajanju med sušenjem v edometru, kjer smo opazili razpoke na vzorcih obremenjenih med 50 in 400 kPa. Iz slike 14.11 vidimo, da model dobro opisuje dogajanje v zemljini.

Pri modelnih napovedih nismo upoštevali plastifikacije retencijske krivulje kot posledice visokih totalnih napetosti. Pri vertikalni napetosti nad 1300 kPa pričakujemo povečanje točke vstopa zraka in desaturacijsko območje zemljine šele pri večjih sukcijah. Retencijska krivulja zemljine v takšnem stanju se bo premaknila desno na sliki 14.7. Plastifikacija retencijske krivulje ni pomembna za območje totalnih napetosti na plazju Slano blato in smo jo zanemarili.



Slika 14.11: Krčenje vzorca med sušenjem v edometru in modelne napovedi krčenja.
Figure 14.11: Shrinkage of the sample during drying in oedometer and shrinkage prediction by different models.

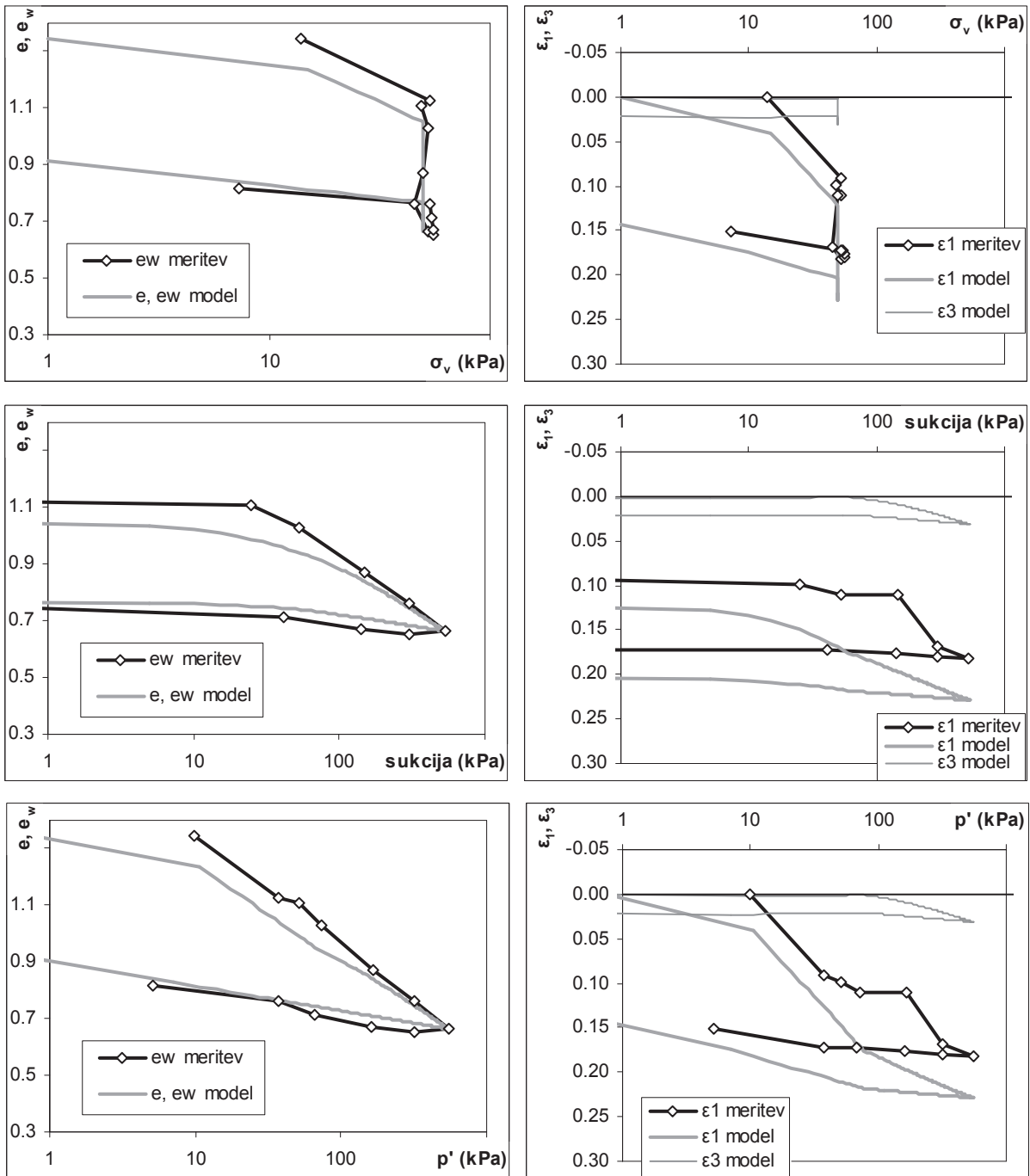
14.2.2.2 Sukcijski edometer (SESA)

V napravi SESA smo izvedli 4 preiskave volumenskega obnašanja zemljine ob spreminjanju sukcije pri konstantni vertikalni obtežbi. Vrednotenje rezultatov podajamo v 3 sklopih:

- količnik por in deformacije v odvisnosti od totalne vertikalne napetosti,
- količnik por in deformacije v odvisnosti od sukcije in
- količnik por in deformacije v odvisnosti od efektivne sferne napetosti.

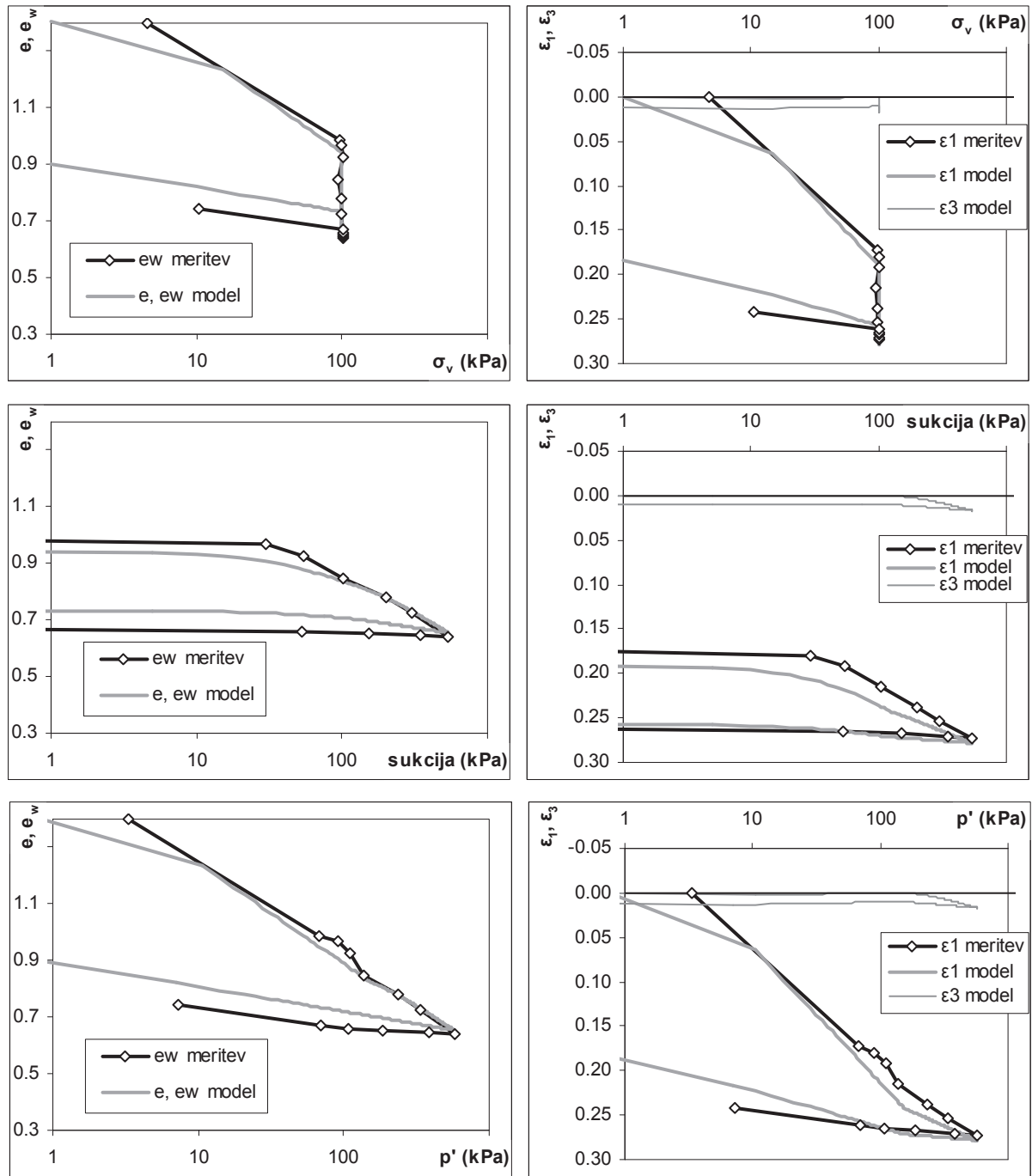
Iz slik 14.12 do 14.15 vidimo vpliv sukcije na zmanjšanje volumna zemljine in pojav krčitvenih razpok pri manjših obremenitvah. Pojav krčitvenih razpok oziroma sprememba napetostnega stanja povzroči lom krivulje $e - p'$. Lom krivulje $e - p'$ je bil opažen tudi pri meritvah. Ujemanje med modelno napovedjo in dejanskimi meritvami je dobro. Predvsem pri količniku por. Napaka pri vertikalnih deformacijah (ε_v) se nabere predvsem pri začetnih obremenitvah, nato pa linija merjenih in modelnih deformacij poteka bolj ali manj vzporedno. Modelna napoved tudi pojasni zakaj ni prišlo do zmanjšanja stopnje zasičenosti, kakor bi lahko sklepali iz meritev le vertikalne deformacije, ampak do bočnega stiskanja vzorcev.

Na sliki 14.16 smo izrisali količnike por pri isti vertikalni obtežbi in različnih sukcijah. Iz slike se jasno vidi različna togost $\lambda(u_a - u_w)$, ki jo napoveduje BEM model (Alonso et al., 1990). Napake so posledica različnih testov vodenih v smeri spreminjanja sukcije in ne enega testa, ki ga vodimo pri konstantni sukciji. Na slikah 14.12 do 14.15 lahko opazimo, da je togost λ_s , ki jo napoveduje BEM model, odvisna od vertikalne napetosti, saj se vzorci različno deformirajo. Prav tako lahko opazimo različno sukcijo, ki povzroči plastične deformacije (slika 13.13). Parameter κ_s ponovnega obremenjevanja pa je povsem različen od tistega, ki ga dobimo pri razbremenitvi, kar smo poudarili že v poglavju 13.7. Zemljino bi lahko ovrednotili tudi z BEM modelom brez večjih odstopanj, vendar mislimo, da uporaba popravka efektivnih napetosti daje boljše rezultate, saj upošteva soodvisnost totalne napetosti in prispevka sukcije na volumenske deformacije.



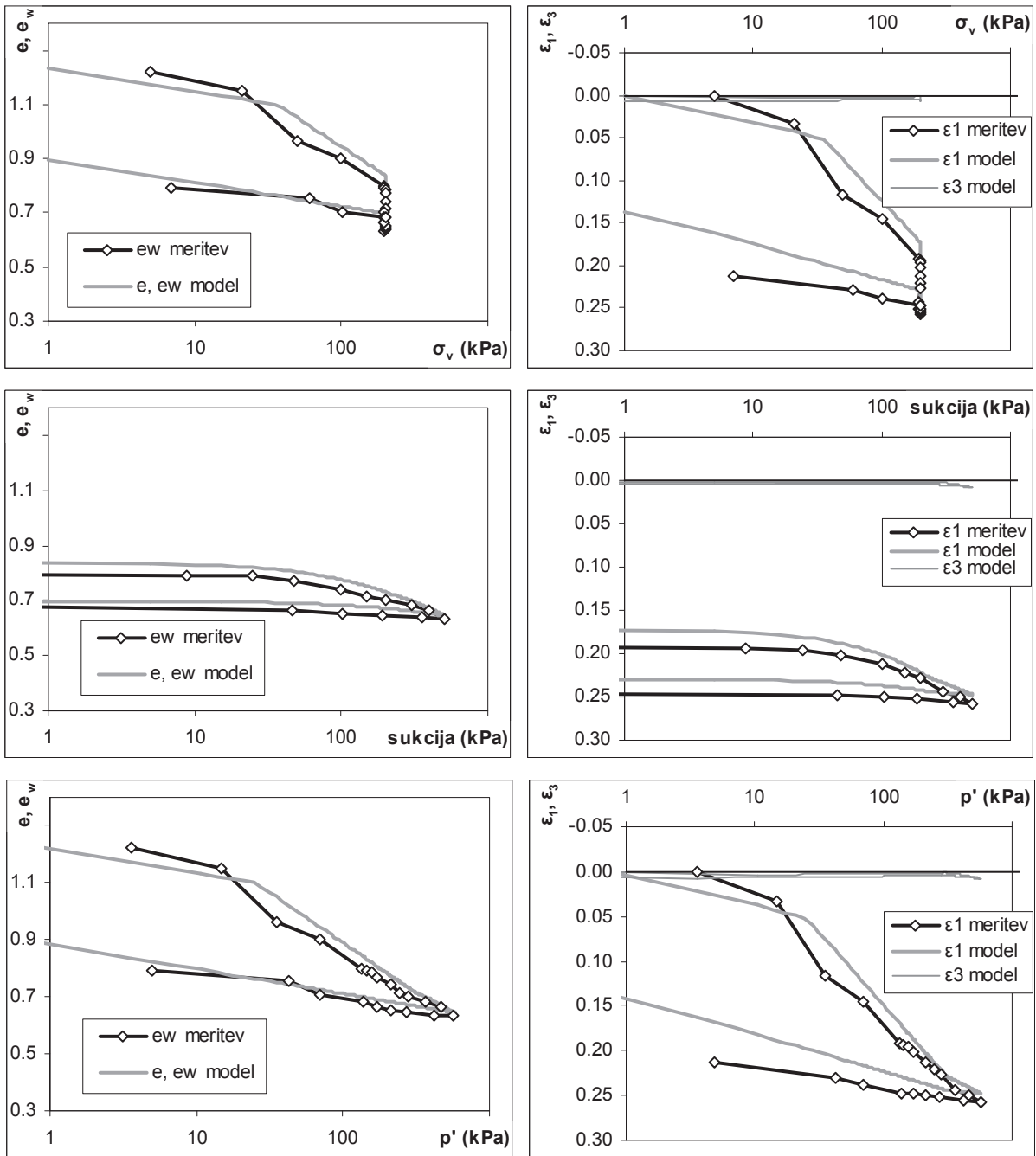
Slika 14.12: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega s 50 kPa vertikalne napetosti.

Figure 14.12: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 50 kPa vertical load.



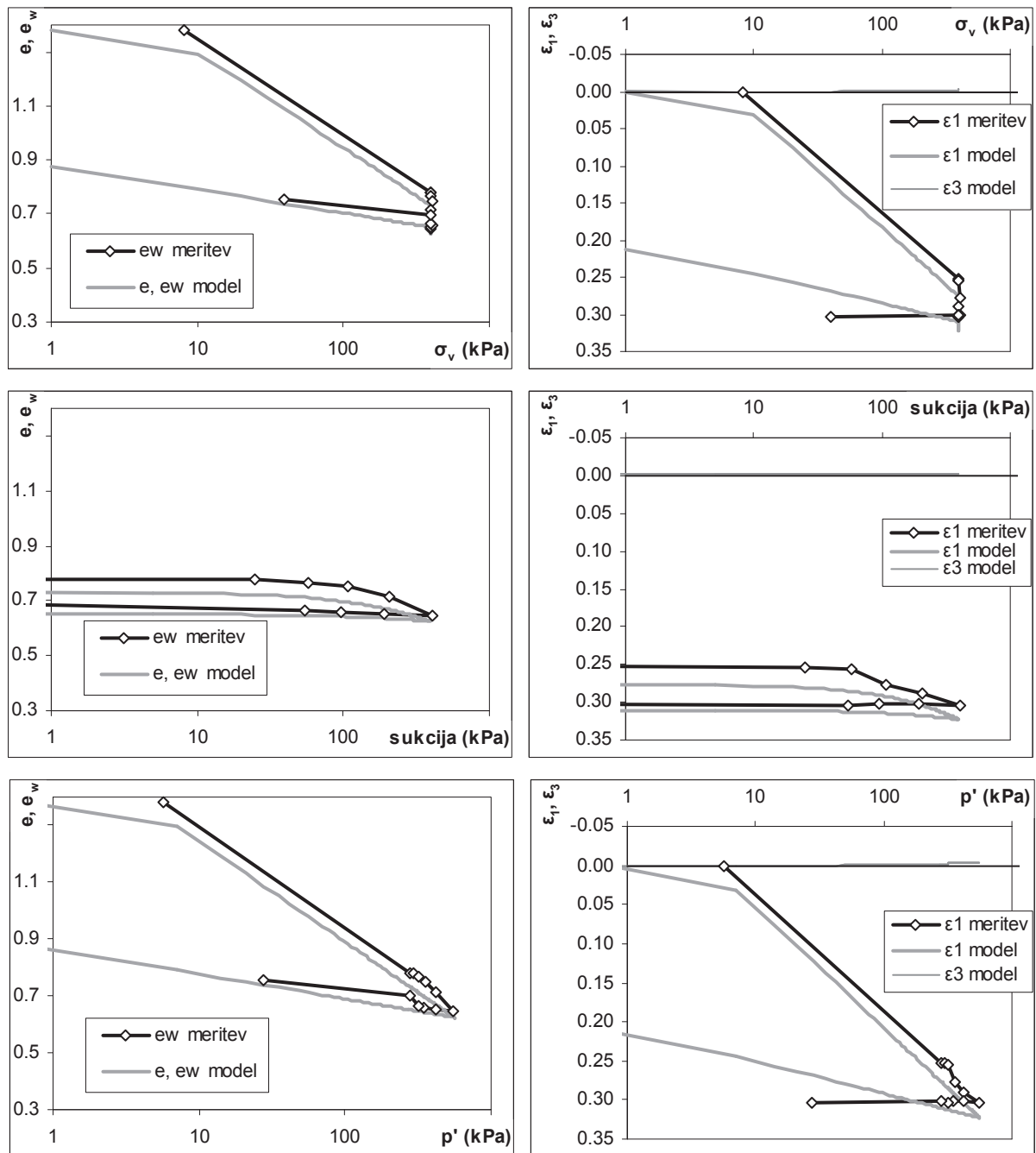
Slika 14.13: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega s 100 kPa vertikalne napetosti.

Figure 14.13: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 100 kPa vertical load.



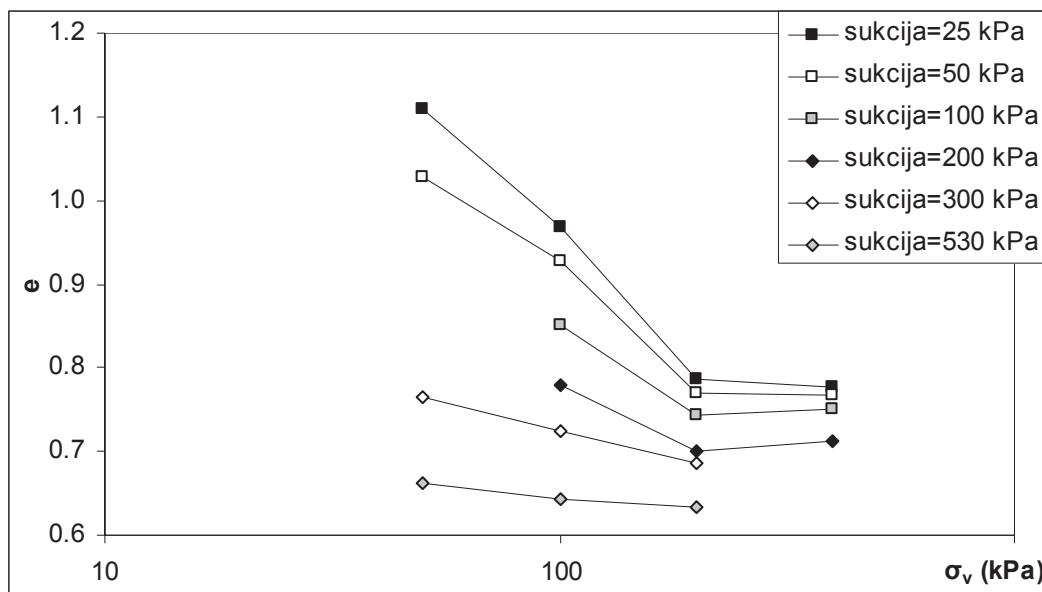
Slika 14.14: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega z 200 kPa vertikalne napetosti.

Figure 14.14: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 200 kPa vertical load.



Slika 14.15: Primerjava med modelno napovedjo in rezultati meritev za primer vzorca v napravi SESA obremenjenega z 400 kPa vertikalne napetosti.

Figure 14.15: Comparison of model prediction and measurements in SESA apparatus at 400 kPa vertical load.



Slika 14.16: Količnik por zemljine pri različni vertikalni obremenitvi in konstantni sukciji.

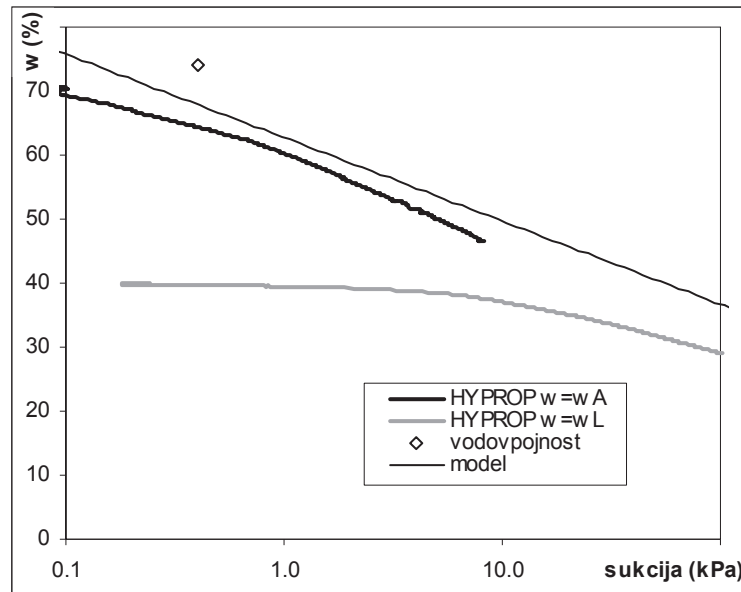
Figure 14.16: Void ratio at different vertical loads and constant suction.

14.2.2.3 Deviška retencijska krivulja

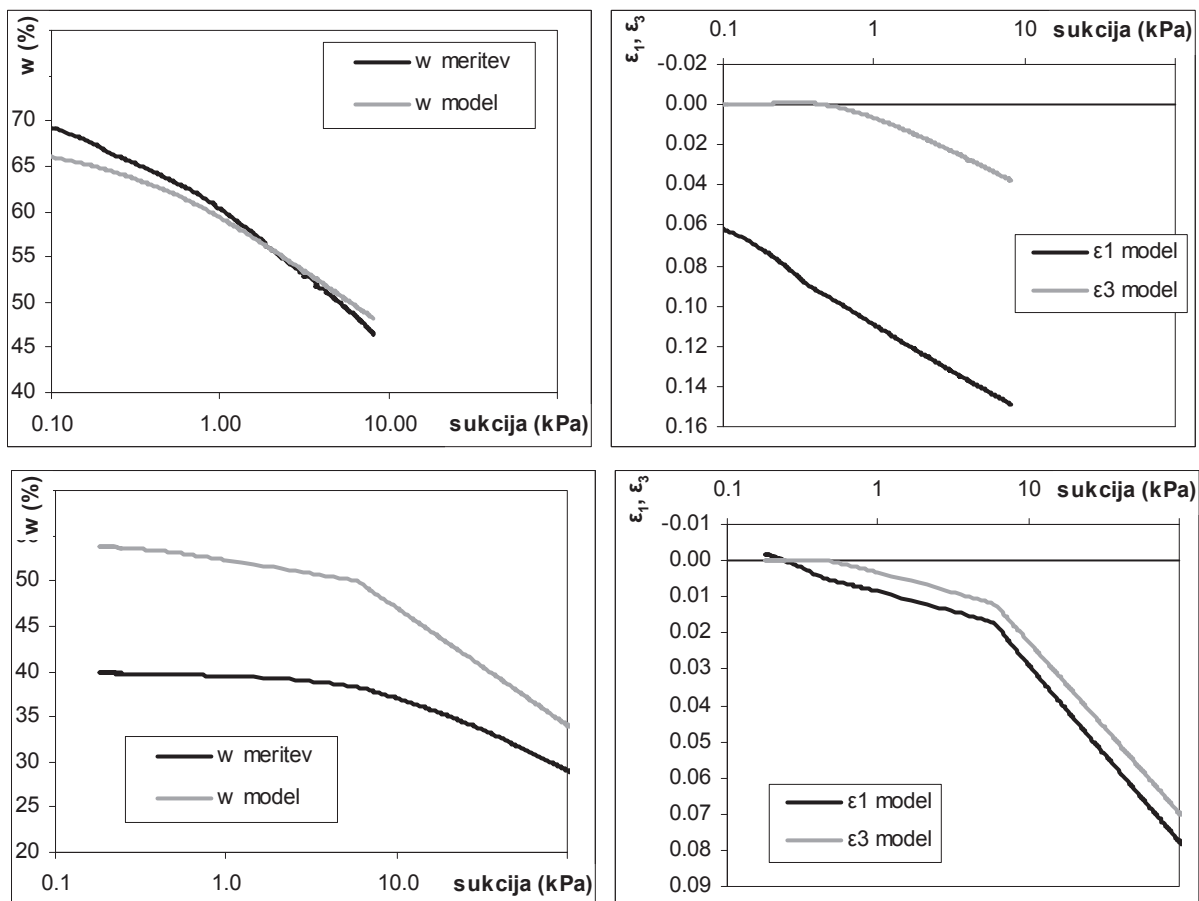
V prejšnjem poglavju smo prikazali modelno obnašanje zemljine med sušenjem pri različnih vertikalnih obremenitvah. Petkovšek (2006) je vpeljala izraz deviška retencijska krivulja, ki je podobno kakor pri stisljivosti zemljine tista retencijska krivulja, ki povezuje točke z najvišjo možno vlago pri določeni sukciji. Deviške retencijske krivulje so bile podane v relaciji gravimetrična vlaga – sukcija. Podobne krivulje bomo poskusili izrisati tudi s predpostavljenim modelom. Modelno napoved lahko primerjamo z meritvami v napravi HYPROP in z vodovpojnostjo po Enslin-Neff postopku. Vodovpojnost po Enslin-Neff postopku je podobna merjenju sukcije z visečim vodnim stolpcem, le da omogoča merjenje sukcije le pri vrednosti sukcije 0,4 kPa. Obema postopkoma pa so skupne zanemarljive totalne napetosti.

Na sliki 14.17 podajamo rezultate meritev v napravi HYPROP in meritev vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku ter modelne napovedi za deviško retencijsko krivuljo in obnašanja v napravi HYPROP. Vidimo lahko dobro ujemanje modelne napovedi z dejanskimi meritvami. Rezultat vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku se precej razlikuje od modelne napovedi. Pri tem se moramo zavedati, da smo model umerili na podlagi edometriških testov. Pri določitvi parametra λ smo upoštevali bremenske stopnje pri primarni obremenitvi (nad 50 kPa), z modelno napovedjo pa smo naredili ekstrapolacijo rezultatov za 2 velikostna razreda iz 50 kPa na 0,4 kPa. Meritev v napravi HYPROP pri meji židkosti v celoti leži pod predpostavljeno linijo vendar ima podobno obliko kakor modelna napoved, če upoštevno prekonsolidacijski tlak 6 kPa. Vlage pa so za 14% višje (slika 14.18). Na sliki 14.18 smo tudi prikazali deformacijsko obnašanje meritev v napravi HYPROP pri vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku. Model predvideva 15% deformacije vzorca vgrajenega pri vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku, kar ustreza znižanju višine na 42,5 mm. Ta test smo ustavili, ko je zgornji tenziometer pogledal iz zemljine. Višina kape zgornjega tenziometra je 42,5.

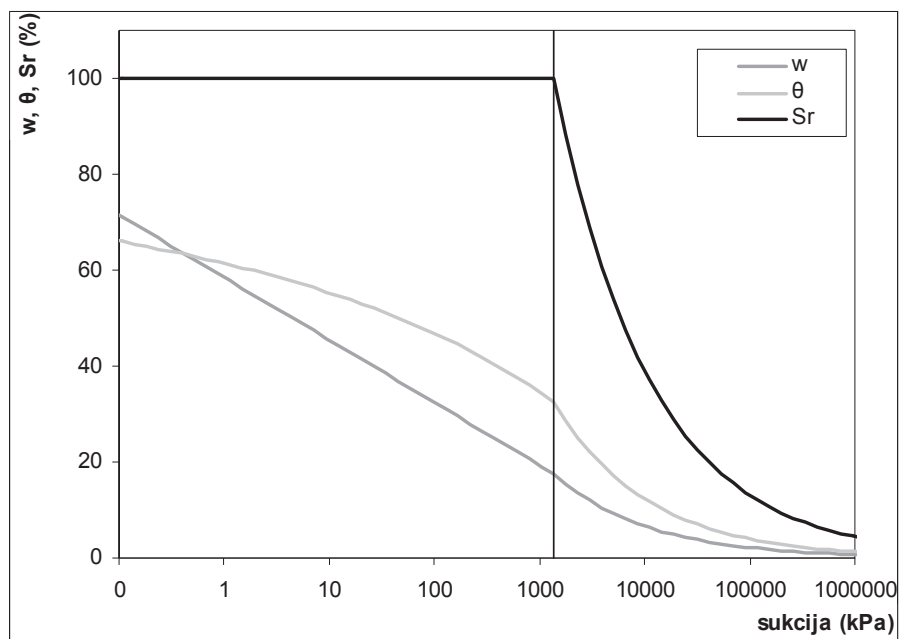
Na sliki 14.19 podajamo modelno retencijsko deviško krivuljo izrisano za celotno območje sukcije za različne načine podajanja vlage v zemljini.



Slika 14.17: Meritve sukcije pri zanemarljivih totalnih napetostih in modelna napoved.
 Figure 14.17: Measurement of suction at negligible total stresses and model prediction.



Slika 14.18: Meritve v napravi HYPROP in modelna napoved. Zgoraj preizkušane vgrajen pri vodovpojnosti po Enslin-Neff postopku, spodaj preizkušane vgrajen pr meji židkosti.
 Figure 14.18: Measurements in HYPROP device and model prediction for test specimen at maximum water content (top) and at liquid limit (bottom).



Slika 14.19: Modelna deviška retencijska krivulja.

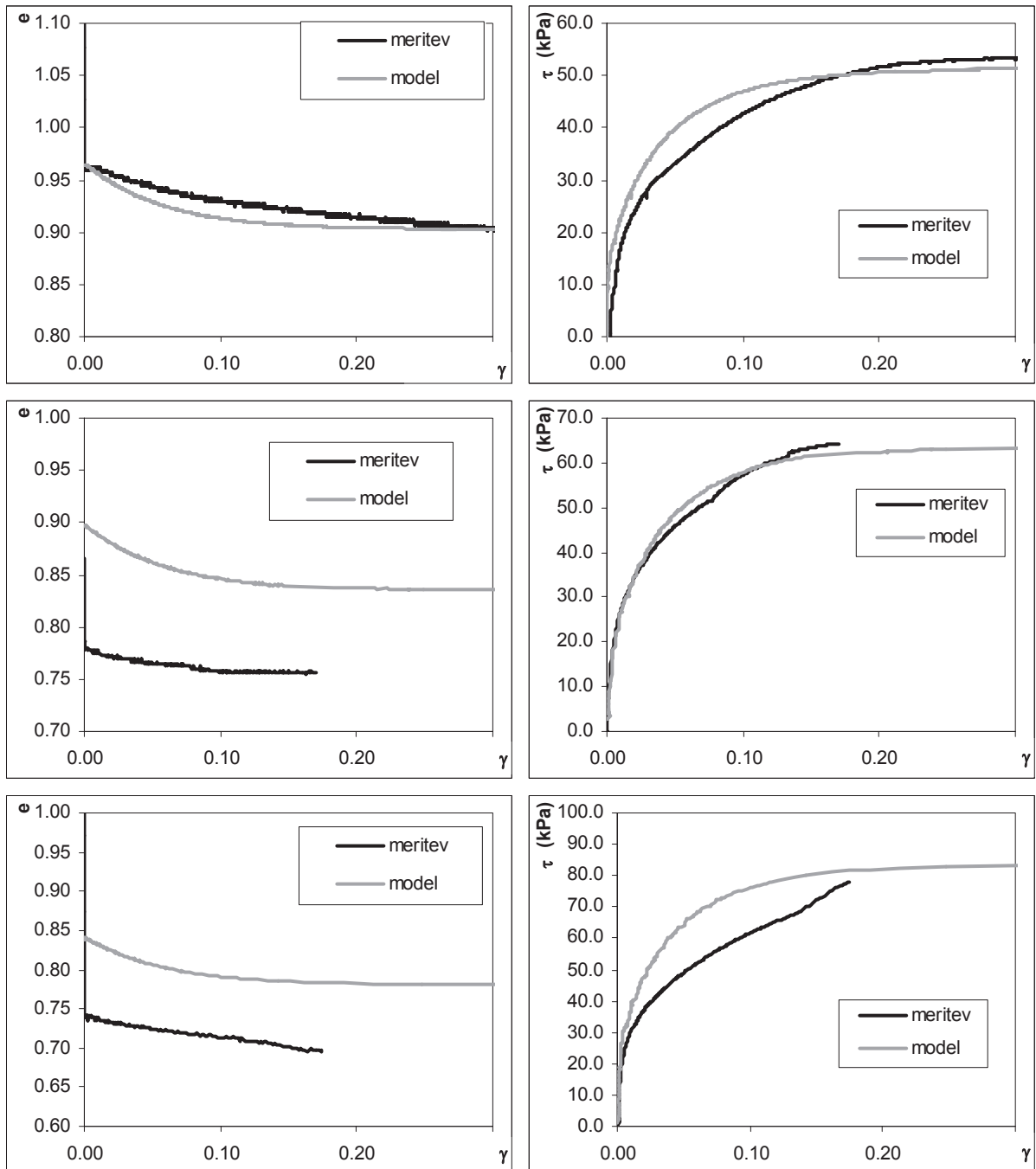
Figure 14.19: Model virgin soil water characteristic curve.

14.2.3 Vpliv sukcije na trdnost zemljine

Vpliv sukcije na strižno trdnost zemljine smo preverili v napravi SESA, predhodno pa smo že imeli izvedene teste nedrenirane strižne trdnosti v odvisnosti od sukcije (Petkovšek et al., 2009). Vse meritve so pokazale na povečanje strižne trdnosti zemljine v odvisnosti od sukcije. V tem poglavju bomo preverili modelno obnašanje z dejanskimi meritvami v napravi SESA in modelno napoved vpliva sukcije na nedrenirano strižno trdnost zemljine.

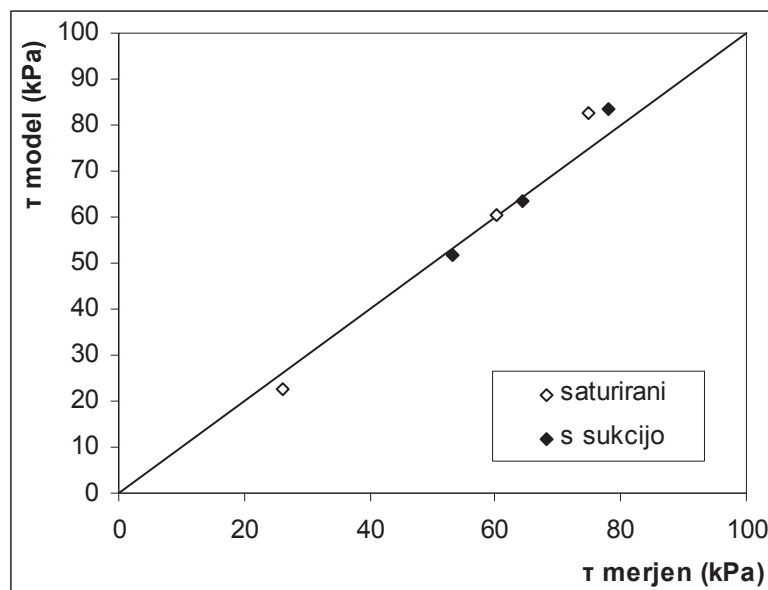
14.2.3.1 Enostavni strig

Podobno kot enostavne strižne preiskave zasičenih preizkušancev smo preverili modelno obnašanje tudi za zemljine preizkušancev s sukcijo. Izvedli smo enostavne strižne preiskave pri vertikalni obremenitvi 100 kPa in sukciji 20, 50 in 100 kPa. Na sliki 14.20 podajamo rezultate meritev in modelno obnašanje zemljine pri enostavnih strižnih preiskvah. Tudi v tem primeru smo si pomagali s pomočjo izračuna vseh napetosti po predpostavkah Gutierrez et al. (2009). Vidimo zadovoljivo ujemanje meritev pri sukciji 20 in 50 kPa na območju strižnih deformacij do ene polovice maksimalne obremenitve, nato pa se napoved modela prične razlikovati od meritve. Preizkušanec pri sukciji 100 kPa pa ima različno obnašanje od modelne napovedi. Tudi v tem primeru je modelna napoved volumenskih deformacij preizkušancev med striženjem večja od dejanskega obnašanja zemljine. Na sliki 14.21 smo prikazali odnos med maksimalnimi strižnimi napetostmi, ki smo jih izmerili, in tistimi, ki jih podaja model. Vidimo, da so relacije približno enake, napake pa so podobne za vzorce brez ali z sukcijo.



Slika 14.20: Meritve v enostavnem strižnem aparatu. Po vrsti od zgoraj navzdol si sledijo vzorci pri vertikalni obremenitvi 100 kPa in sukciji 20, 50 in 100 kPa.

Figure 14.20: Results from simple shear tests. From the top to bottom are test samples with vertical stress 100 kPa and suction 20, 50 and 100 kPa.



Slika 14.21: Primerjava med merjeno maksimalno horizontalno strižno napetostjo in modelno napovedjo.

Figure 14.21: Comparison between the measured maximum horizontal shear stress and the model prediction.

14.2.3.2 Nedrenirana strižna trdnost

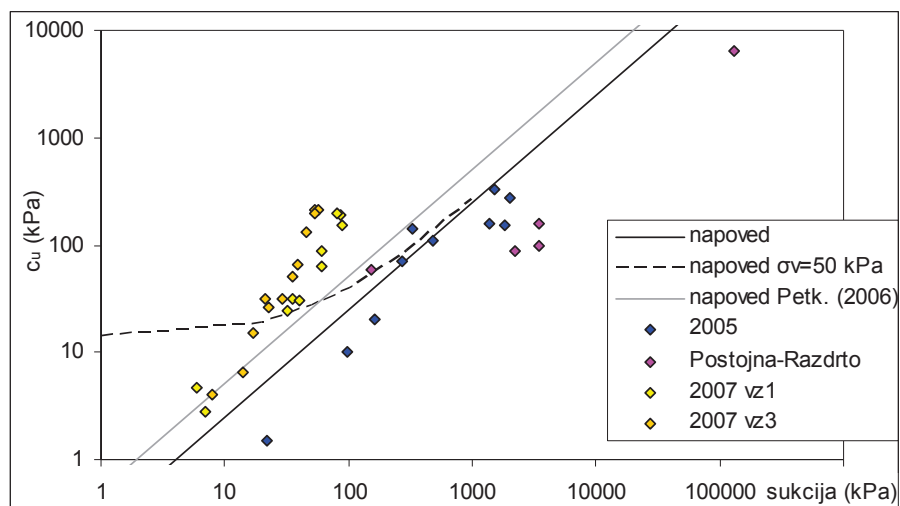
V prejšnjih poglavjih smo omenili zvezo med sukcijo in nedrenirano strižno trdnostjo, ki jo je podala Petkovšek (2006) (enačba (13.2)). Nedrenirano strižno trdnost lahko ocenimo tudi iz modificiranega Cam clay modela. Če upoštevamo Cam clay model in če upoštevamo, da je zemljina popolnoma zasičena (parameter $\chi=1$), normalno konsolidirana, ter da nanjo deluje le izotropni tlak – sukcija, dobimo enostavno enačbo za opis zveze med nedrenirano strižno trdnostjo in sukcijo. Za izpeljavo moramo upoštevati le nične volumenske deformacije in enačbe (8.7), (8.11), (8.12), (8.16):

$$c_u = \frac{q}{2} = \frac{M}{2} e^{\left(\ln(p') - \frac{(\lambda-\kappa)}{\lambda} \left(1 - \frac{\eta}{M} \right) \right)} \quad (14.12)$$

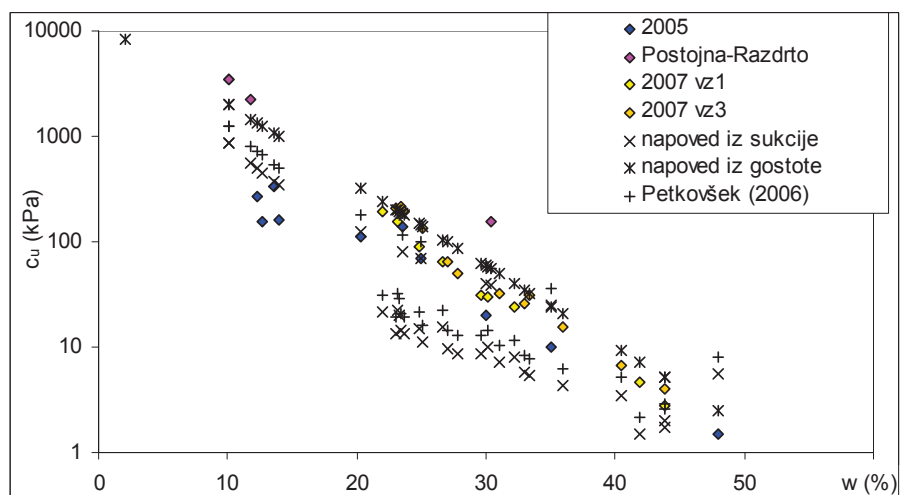
Nedrenirana strižna trdnost zemljine v poljubnem stanju je predvsem odvisna od specifičnega volumna zemljine (Schofield in Wroth, 1968).

$$c_u = \frac{q}{2} = \frac{M}{2} e^{\left(\frac{\Gamma-v}{\lambda} \right)} \quad (14.13)$$

Primerjavo med modelno napovedjo in meritvami prikazuje slika 14.22. Na sliki je prikazana modelna napoved modificiranega Cam clay modela iz sukcije in napoved, ki jo je na podlagi empiričnih rezultatov podala Petkovšek (2006). Na sliki 14.22 je prav tako prikazano povečanje nedrenirane strižne trdnosti, če bi bil vzorec skonsolidiran pri vertikalni napetosti 50 kPa. Na sliki 14.23 podajamo meritve in napoved modificiranega Cam clay modela za primer napovedi iz sukcije (en. 14.12) in za primer napovedi iz gostote zemljine (14.13). Napoved iz gostote zemljine daje najboljše rezultate.



Slika 14.22: Izmerjena nedrenirana strižna trdnost in modelna napoved.
Figure 14.22: Measured undrained shear stress and model prediction.



Slika 14.23: Izmerjena nedrenirana strižna trdnost in modelne napovedi.
Figure 14.23: Measured undrained shear stress and model predictions.

14.2.4 Lezenje zemljine

Vrednotenje preiskav lezenja zemljine bomo razdelili na dva dela. V prvem delu bomo poskušali pojasniti deformacije, ki so se zgodile v začetni fazi preiskave. V drugem delu pa bomo ovrednotili hitrost lezenja v odvisnosti od stopnje obremenitve in časa trajanja obremenitve.

14.2.4.1 Ocena začetnih deformacij

Na podlagi ocene nedrenirane strižne trdnosti smo ocenili ali so bile velike začetne deformacije preizkušancev posledica porušitve vzorca ali ne. V kolikor ni prišlo do porušitve preizkušancev, smo ocenili deformacije vzorca, ki jih podaja predlagan materialni model. Rezultate podajamo v preglednici 14.4. Faktor varnosti FS1 je izračunan po enačbi (14.12), FS2 pa po enačbi (14.13).

Preglednica 14.4: Ocena faktorja varnosti in modelne strižne deformacije.

Table 14.4: Factor of safety and model prediction of shear deformations.

test	σ_v (kPa)	$(u_a - u_w)$ (kPa)	τ (kPa)	τ / τ_{\max}	FS1	FS2	a_M	b_M	γ_{model}
1	25	0	6,3	0,56	1,04	2,35	-0,004	0,0024	0,004
2	50	0	14,0	0,63	0,93	0,76	0,170	0,0044	porušitev
3	50	0	12,5	0,56	1,04	1,62	0,106	0,0031	0,020
3	50	0	15,0	0,67	1,12	1,54	0,112	0,0030	0,034
4	50	50	10,5	0,24	2,48	3,97	-0,006	0,0021	0,001
4	50	50	13,5	0,30	2,08	3,14	-0,003	0,0020	0,003
4	50	50	19,5	0,44	1,48	2,21	-0,007	0,0044	0,006
4	50	50	20,5	0,46	1,44	2,13	0,006	0,0026	0,009
4	50	0	20,5	0,92	1,51	2,13	0,017	0,0025	0,022
5	100	0	22,0	0,49	1,18	3,38	0,003	0,0033	0,010
6	100	0	25,0	0,56	1,04	1,37	0,341	0,0011	0,022
7	100	0	22,0	0,49	1,18	1,55	0,141	0,0038	0,010
8	100	0	36,0	0,81	0,72	0,95	0,506	0,0032	porušitev
9	100	0	22,0	0,49	1,18	1,55	0,060	0,0038	0,010
10	100	0	36,0	0,81	0,72	0,95			porušitev
11	100	50	27,0	0,40	1,45	1,64	0,000	0,0026	0,007
12	100	50	22,0	0,33	1,77	2,58	0,005	0,0028	0,005
12	100	50	28,0	0,42	1,57	2,20	0,010	0,0026	0,007
12	100	50	35,0	0,52	1,29	1,79	0,021	0,0044	0,014
13	100	50	26	0,57	1,50	1,86	0,040	0,0032	0,006
13	100	50	37,0	0,57	1,22	1,30	0,014	0,0027	0,014
13	100	50	46,0	0,70	1,05	1,16	0,042	0,0057	0,022
13	100	0	45,0	1,01	1,12	1,26	0,090	0,0037	/
14	100	100	21,0	0,24	2,48	4,30	0,002	0,0018	0,001
15	200	0	50,0	0,56	1,04	1,31	0,008	0,0031	0,024

14.2.4.2 Ocena lezenja zemljine

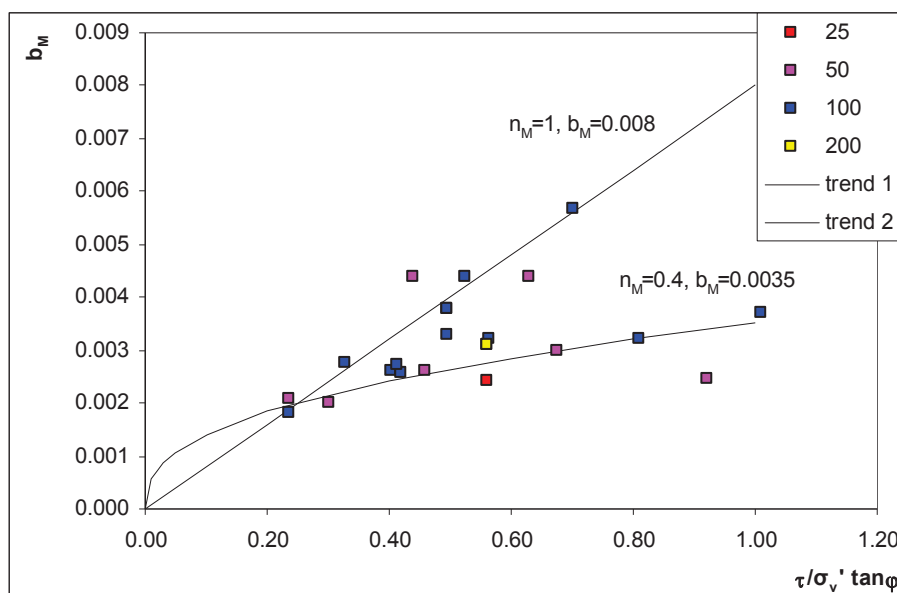
Odvisnost lezenja zemljine bomo ocenili s pomočjo izmerjenih logaritemskih premic strižnega lezenja. Ker je ob hipni obremenitvi prišlo do generacije pornih pritiskov, se moramo zavedati, da je veljavnost zapisanih enačb samo na območju brez presežnih pornih tlakov (pri časih večjih od 1000 do 10000 s za vzorce v napravi SESA). Generacijo pornih pritiskov je izkazoval tudi numerični model.

Za opis lezenja smo predpostavili enačbo (11.17) (Meschyan, 2006):

$$\gamma = (a_M + b_M \log t)(\tau / \tau_{\max})^{n_M}$$

Iz slike 14.24 ne moremo oceniti naklona logaritemske premice v odvisnosti od stopnje strižne obremenitve z upoštevanjem prispevka sukucije (vrednoteno na efektivno napetostno stanje s Bishopovim popravkom efektivne napetosti), lahko pa ocenimo zgornjo in spodnjo mejo razlike

hitrosti lezenja. Ker za oceno pomikov plazu Slano blato niso pomembne celotne deformacije od pričetka obremenitve, ampak le prirast deformacij v nekem časovnem obdobju lahko ovrednotimo samo parametra b_M in n_M . Na sliki 14.24 podajamo zgornjo in spodnjo krivuljo za oceno lezenja zemljine.



Slika 14.24: Naklon logaritemske premice strižnega lezenja za različne stopnje strižne obremenitve z upoštevanjem ugodnega prispevka sukcije z označeno zgornjo in spodnjo mejno črto.

Figure 14.24: Slope of logarithmic line for shear creep for different shear stress ratios with suction contribution for upper and lower boundary curve.

14.3 Numerični model

Na podlagi zgoraj opisanih meritev in že predpostavljenih modelov za opis popravka efektivnih napetosti (Bishop, 1959) ter deformacij zemljine pod različnimi obtežbami (modificiran Cam-clay model, (Roscoe in Burland, 1968), smo razvili model za gibanje vode v zemljini s sukcijo. S takšnim modelom bomo poskusili opisati gibanje vode na plazju Slano blato. Predlagan model bo eno dimenzionalen model za opis vertikalnega gibanja vode v zemljini za primer horizontalnih tal. Pri modelu upoštevamo:

- 1D tok,
- horizontalna ravnina,
- ni toplotnih sprememb,
- nestisljiva tekočina,
- kontinuirane zračne pore,
- zračni pritisk je konstanta,
- ni osmotske sukcije.

V naslednjih poglavjih opisujem glavne značilnosti modela.

14.3.1 Retencijska krivulja

Uporabili bomo Brooksov in Coreyev (1964) model retencijske krivulje (enačba (4.3)). Brooksova in Coreyeva enačba za opis retencijske krivulje predpostavlja polno zasičenost v območju kapilarnega zasičenja, pri sukucijah višjih od točke vstopa zraka pa se zemljina prične sušiti. Zapis retencijske krivulje v obliki stopnja zasičenosti-sukucija je zaželen, saj bomo volumen zemljine opisali z deformacijami v efektivnem napetostnem stanju. Brooksovo in Coreyovo enačbo podajamo še enkrat v spodnji enačbi.

$$Se = Sr_r + (1 - Sr_r) \min \left[1, \left(\frac{a_{BC}}{s} \right)^{\lambda_{BC}} \right] \quad (14.14)$$

Kjer je Sr_r rezidualna stopnja zasičenosti, s matrična sukucija zemljine ($u_a - u_w$).

14.3.2 Popravek efektivnih napetosti

Uporabili smo Bishopov (1959) popravek efektivnih napetosti (enačba (5.2)):

$$[\sigma'] = [\sigma] + \chi [s] \quad (14.15)$$

Pri čemer je χ enak:

$$\chi = Se^{b_{BC}} = \min \left[1, \left(\frac{a_{BC}}{s} \right)^{b_{BC} \lambda_{BC}} \right] \quad (14.16)$$

Kjer je b_{BC} oblikovni parameter parametra popravka efektivne napetosti.

Napetostno stanje modela opisujejo napetosti v kartezijskem koordinatnem sistemu x, y, z , kjer je z os obrnjena navzdol. Efektivno vertikalno napetost tako lahko zapišemo kot:

$$\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_z' = \sigma_z + \chi s \quad (14.17)$$

Pri horizontalni napetosti pa moramo upoštevati možnost nastanka krčitvenih razpok. Upoštevati moramo, pogoj mirnega zemeljskega pritiska ali pa pogoj nične totalne horizontalne napetosti.

$$\sigma_2' = \sigma_3' = \sigma_x' = \sigma_y' = \max \left[\chi s, K_0 (\sigma_z + \chi s) \right] \quad (14.18)$$

Sedaj lahko zapišemo p' in q' :

$$p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3} = \frac{1}{3} \max \left[\sigma_z + 3\chi s, (1 + 2K_0)(\sigma_z + \chi s) \right] \quad (14.19)$$

$$q' = \sigma_1 - \sigma_3 = \min \left[\sigma_z, (1 - K_0)(\sigma_z + \chi s) \right] \quad (14.20)$$

14.3.3 Volumenske deformacije

Volumen zemljine oziroma volumenske deformacije izrazimo z modificiranim Cam clay modelom. Ker uporabljamo Bishopov popravek efektivnih napetosti, uporabimo kar standardni zapis modificiranega Cam clay modela. V model smo vpeljali dve dodatni spremembi: faktor α , ki zmanjšuje strižne deformacije, in vpliv napetosti na strižni modul zemljine.

Spremembe elastičnih deformacij so pogojene z naslednjimi enačbami:

$$d\varepsilon_V^e = \frac{\kappa}{v} \frac{dp}{p} \quad (14.21)$$

$$d\varepsilon_D^e = \frac{1}{3G} dq \quad (14.22)$$

Pri elastičnih deformacijah strižni modul ni konstanta kakor v modificiranim Cam clay modelu, ampak je definiran kot:

$$G = G_0 \frac{p}{p_0} \quad (14.23)$$

Kjer je G_0 strižni modul pri p_0 .

Plastične deformacije so pogojene z utrjevanjem materiala:

$$d\varepsilon_V^p = \frac{\lambda - \kappa}{v} \frac{dp_c}{p_c} \quad (14.24)$$

$$\frac{d\varepsilon_D^p}{d\varepsilon_V^p} = \frac{2\alpha q}{M^2(2p - p_c)} \quad (14.25)$$

Kjer je α oblikovni parameter, ki popravlja obliko deformacij.

14.3.4 Tok tekočine

Voda se giblje po Darcyjevem zakonu (enačba (7.1)), vodni hlapci pa po 1. Fickovem zakonu (enačba (7.21)). Tok vodnih hlapov zapišemo v obliki volumskega toka vode in ne vodnih hlapov. Sprememba vode v volumnu zemljine mora biti enaka seštevku vseh tokov (kompatibilnostni pogoj):

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = -\frac{\delta q_w}{\delta z} - \frac{\delta q_v}{\delta z} \quad (14.26)$$

Kjer je q_w tok tekočine, q_v tok vodne pare.

Če v enačbo (14.26) vstavimo enačbi (7.1) in (7.21), dobimo:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[k_w \frac{\delta H}{\delta z} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[\frac{D_v}{\rho_w} \frac{\delta \rho_v}{\delta z} \right] \quad (14.27)$$

Pri čemer je vodni potencial definiran kot:

$$H = -\left(z + \frac{s}{\rho_w g} \right) \quad (14.28)$$

Kjer je z globina.

Gostoto vodne pare lahko izrazimo z zasičeno gostoto vodne pare v zraku ρ_{v0} :

$$\rho_v = RH \rho_{v0} \quad (14.29)$$

Iz Kelvinove enačbe (9.1) pa dobimo enačbo za izračun RH v odvisnosti od sukije:

$$RH = e^{\left(\frac{\psi M_w}{\rho_w RT}\right)} \quad (14.30)$$

Iz Clausius-Clapeyronove enačbe pa dobimo enačbo za zapis gostote zasičene vodne pare.

$$\rho_{v0} = \frac{M_w}{RT} P_{ref} e^{\left[\frac{\bar{q}_l}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (14.31)$$

Tako lahko enačbo (14.27) zapišemo kot:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = -\frac{\delta}{\delta z} \left[k_w \left(1 + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\delta s}{\delta z} \right) \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[\frac{D_v}{\rho_w} \rho_{v0} \frac{\delta RH}{\delta s} \frac{\delta s}{\delta z} + \frac{D_v}{\rho_w} RH \frac{\delta \rho_{v0}}{\delta T} \frac{\delta T}{\delta z} \right] \quad (14.32)$$

Ker smo predpostavili zanemarljive toplotne spremembe, se enačba spremeni v enačbo:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[k_w + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial s}{\partial z} \left(k_w + \frac{D_v}{\rho_w} \rho_{v0} RH \frac{M_w g}{RT} \right) \right] \quad (14.33)$$

14.3.4.1 Vodoprepustnost

Vodoprepustnost zemljine lahko zapišemo kot vodoprepustnost zasičene zemljine in redukcijo vodoprepustnosti zaradi stopnje zasičenosti zemljine:

$$k_w = K_w(s) k_s(e) \quad (14.34)$$

Pri čemer relativno vodoprepustnost izrazimo z Brooksovim in Coreyevim (1964) nastavkom za Burdinovo predpostavko toka vode v nezasičeni zemljini:

$$K_w = \min \left(1, \left(\frac{a_{BC}}{s} \right)^{2+3\lambda_{BC}} \right) \quad (14.35)$$

Vodoprepustnost zasičene zemljine zapišemo z eksponentno odvisnostjo od količnika por.

$$\log(k_s) = a \cdot e + b \quad (14.36)$$

oziroma

$$k_s = 10^{a \cdot e + b} \quad (14.37)$$

14.3.4.2 Difuzija vodne pare v zraku

Difuzijsko konstanto vodne pare skozi zračne pore D_v lahko zapišemo kot:

$$D_v = \tau(1 - Sr) D_a \quad (14.38)$$

Kjer je τ vijugavost zračnih por, D_a difuzijska konstanta vodne pare v zraku.

14.3.5 Sprememba totalne napetosti

Totalna vertikalna napetost ni konstanta, saj zemljina izgublja vodo. Razlika med začetno in končno totalno vertikalno napetostjo je ravno teža vode, ki se je izcedila oziroma izhlapela iz zemljine. Spremembo mase vode lahko zapišemo kot spremembo mase vode zaradi krčenja zemljine in spremembo mase vode zaradi sušenja zemljine:

$$\Delta\sigma_v = \Delta V \gamma_w + \Delta S r n \gamma_w \quad (14.39)$$

V zgornji enačbi smo zanemarili vpliv bočnih deformacij.

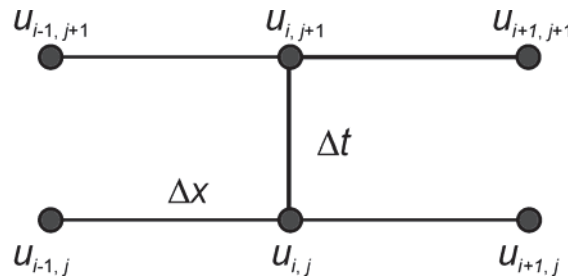
14.3.6 Diferenčna metoda

Enačba (14.33) je parabolična parcialna diferencialna enačba, ki jo v splošnem lahko zapišemo kot:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = F\left(s, z, t, \frac{\partial s}{\partial z}, \frac{\partial^2 s}{\partial z^2}\right) \quad (14.40)$$

Za reševanje enačbe (14.40) potrebujemo začetni pogoj $s(z, t_0)$ in robna pogoja $s(z_{\min}, t)$ in $s(z_{\max}, t)$. Za robne pogoje lahko uporabimo tudi odvod sukucije.

Parabolično parcialno diferencialno enačbo lahko rešujemo s Crank-Nicolsonovo diferenčno metodo. Crank-Nicolsonova diferenčna metoda je povprečje med implicitno in eksplisitno metodo. Crank-Nicolsonova diferenčna metoda je osnovana na centralnih diferencah po prostoru in trapeznem pravilu po času (slika 40). Pri diskretizaciji morajo točke v prostoru biti enakomerno porazdeljene, časovni korak pa se lahko spreminja.



Slika 14.25: Šablona za izračun problemov po metodi Crank-Nicolson za 1 dimenzionalni problem.

Figure 14.25: The Crank–Nicolson stencil for a 1D problem.

Diferencialno enačbo (14.33) pretvorimo v naslednjo obliko:

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[k_w + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial s}{\partial z} \left(k_w + \frac{D_v}{\rho_w} \rho_{v0} RH \frac{M_w g}{RT} \right) \right] \quad (14.41)$$

$$C \frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[k_w + k_w^* \frac{\partial s}{\partial z} \right] \quad (14.42)$$

$$C \frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} q \quad (14.43)$$

Sedaj po metodi Crank-Nicolson zapišemo posamezne količine v enačbi:

$$\begin{aligned}\frac{\partial s}{\partial t} &= \frac{s_i^{j+1} - s_i^j}{\Delta t} \\ \frac{\partial s}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{s_{i+1}^j - s_{i-1}^j}{2\Delta z} + \frac{s_{i+1}^{j+1} - s_{i-1}^{j+1}}{2\Delta z} \right) \\ \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} &= \frac{1}{2} \left(\frac{s_{i-1}^j - 2s_i^j + s_{i+1}^j}{\Delta z^2} + \frac{s_{i-1}^{j+1} - 2s_i^{j+1} + s_{i+1}^{j+1}}{\Delta z^2} \right) \\ X &= \frac{1}{2} (X_i^j + X_i^{j+1})\end{aligned}\tag{14.44}$$

Kjer je i števec diskretnih točk po prostoru, j števec diskretnih točk po času, X poljubna količina ($k_w(\sigma, s)$, $k_w^*(\sigma, s)$, $C(\sigma, s)$).

Enačbo lahko sedaj zapišemo kot:

$$\frac{C_i^j + C_i^{j+1}}{2} \frac{s_i^{j+1} - s_i^j}{\Delta t} = -\frac{1}{2} \left[\frac{q_{i+1/2}^{j+1} - q_{i-1/2}^{j+1}}{\Delta z} + \frac{q_{i+1/2}^j - q_{i-1/2}^j}{\Delta z} \right]\tag{14.45}$$

$$\frac{q_{i+1/2}^j - q_{i-1/2}^j}{\Delta z} = \frac{\left[k_{wi+1/2}^j + k_w^{*j} \frac{s_{i+1}^j - s_i^j}{\Delta z} \right] - \left[k_{wi-1/2}^j + k_w^{*j} \frac{s_i^j - s_{i-1}^j}{\Delta z} \right]}{\Delta z}\tag{14.46}$$

Kjer lahko $k_{wi+1/2}^j$ in k_w^{*j} izrazimo s približkom:

$$k_{i+1/2}^j = \frac{2}{\left(\frac{1}{k_{i+1}^j} + \frac{1}{k_i^j} \right)}\tag{14.47}$$

Sedaj enačbo (14.45) zapišemo po posameznih mestih:

$$A_i^{*j+1} s_{i+1}^{j+1} + B_i^{*j+1} s_i^{j+1} + C_i^{*j+1} s_{i-1}^{j+1} = D_i^{*j+1}\tag{14.48}$$

Kjer so:

$$A_i^{*j+1} = \frac{k_w^{*j+1}}{2\Delta z^2}\tag{14.49}$$

$$B_i^{*j+1} = \frac{C_i^{j+1}}{2\Delta t} - \frac{k_w^{*j+1}}{2\Delta z^2} - \frac{k_w^{*j+1}}{2\Delta z^2}\tag{14.50}$$

$$C_i^{*j+1} = \frac{k_w^{*j+1}}{2\Delta z^2}\tag{14.51}$$

$$D_i^{*j+1} = \frac{C_i^{j+1}}{2\Delta t} s_i^j - \frac{\left(k_{wi+1/2}^j + k_w^{*j+1} - k_{wi-1/2}^j - k_w^{*j+1} \right)}{2\Delta z} - \frac{\left(k_w^{*j} \left(s_{i+1}^j - s_i^j \right) - k_w^{*j} \left(s_i^j - s_{i-1}^j \right) \right)}{2\Delta z^2}\tag{14.52}$$

Pri reševanju s Crank-Nicolsonovo diferenčno metodo dobimo tridiagonalno matriko.

14.3.6.1 Robni pogoji

V začetku prejšnjega poglavja sta bila omenjena robna pogoja $s(z_{\min}, t)$ in $s(z_{\max}, t)$ oziroma $q(z_{\min}, t)$ in $q(z_{\max}, t)$.

Konstantna sukucija

Eden izmed možnih robnih pogojev je konstantna sukucija oziroma tlak vode. Pri tem lahko enačbo (14.42) zapišemo za 2 in $n-1$ člen:

$$A_2^{*j+1} s_2^{j+1} + B_2^{*j+1} s_3^{j+1} = D_2^{*j+1} - C_2^{*j+1} s_1^{j+1} \quad (14.53)$$

oziroma:

$$B_{n-1}^{*j+1} s_{n-1}^{j+1} + C_{n-1}^{*j+1} s_{i-2}^{j+1} = D_{n-1}^{*j+1} - A_{n-1}^{*j+1} s_n^{j+1} \quad (14.54)$$

V primeru uporabe robnega pogaja s konstantno sukucijo uporabimo kondenzirano matriko za 1 oziroma 2 prostorski stopnji.

Konstanten tok

V primeru konstantnega toka pa ga dodamo k enačbi (14.26). Odvod na robu izrazimo le z eno polovico v enačbi (14.44) (tisto, ki je v notranjosti zemljine). S preureditvijo dobimo naslednje člene za vozlišče 1:

$$A_1^{*j+1} = \frac{k_w^{*j+1}}{\Delta z^2} \quad (14.55)$$

$$B_1^{*j+1} = \frac{C_1^{j+1}}{\Delta t} - \frac{k_w^{*j+1}}{\Delta z^2} \quad (14.56)$$

$$D_1^{*j+1} = \frac{C_1^{j+1}}{2\Delta t} s_1^j - \frac{(k_{w1+1/2}^j + k_{w1+1/2}^{j+1})}{\Delta z} - \frac{(k_w^{*j} (s_{1+1}^j - s_1^j))}{\Delta z^2} - \frac{q_1^{j+1/2}}{\Delta z} \quad (14.57)$$

Ter za vozlišče n:

$$B_n^{*j+1} = \frac{C_n^{j+1}}{\Delta t} - \frac{k_w^{*j+1}}{\Delta z^2} \quad (14.58)$$

$$C_n^{*j+1} = \frac{k_w^{*j+1}}{2\Delta z^2} \quad (14.59)$$

$$D_n^{*j+1} = \frac{C_n^{j+1}}{2\Delta t} s_n^j - \frac{(-k_{wn-1/2}^j - k_{wn-1/2}^{j+1})}{\Delta z} - \frac{(-k_w^{*j} (s_n^j - s_{n-1}^j))}{\Delta z^2} + \frac{q_n^{j+1/2}}{\Delta z} \quad (14.60)$$

Ocena evaporacije

Po enačbi (10.40) ocenimo dejansko evaporacijo:

$$E = K_c E_0 \left(\frac{RH(s) - RH_a}{1 - RH_a} \right) \quad (14.61)$$

14.3.6.2 Pogoji natančnosti izračuna

Po vsakem izračunu preverimo napako izračuna oziroma izgubljeno količino vode. To naredimo tako, da seštejemo spremembo količine vode v zemljini in tok vode na spodnjem in zgornjem robu:

$$ERR = \Delta\theta_1 \frac{\Delta z}{2} + \Delta\theta_n \frac{\Delta z}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} \Delta\theta_i \Delta z + q_1 \Delta t + q_n \Delta t \quad (14.62)$$

V kolikor je napaka dovolj majhna smo končali z izračunom.

Sedaj preverimo velikost časovnega koraka. V kolikor prekoračimo katerega od pogojev, časovni korak zmanjšamo.

$$\frac{\theta_i^{j+1} - \theta_i^j}{\theta_i^j} < \theta_{rel} \quad (14.63)$$

$$\frac{s_i^{j+1} - s_i^j}{s_i^j} < s_{rel} \quad (14.64)$$

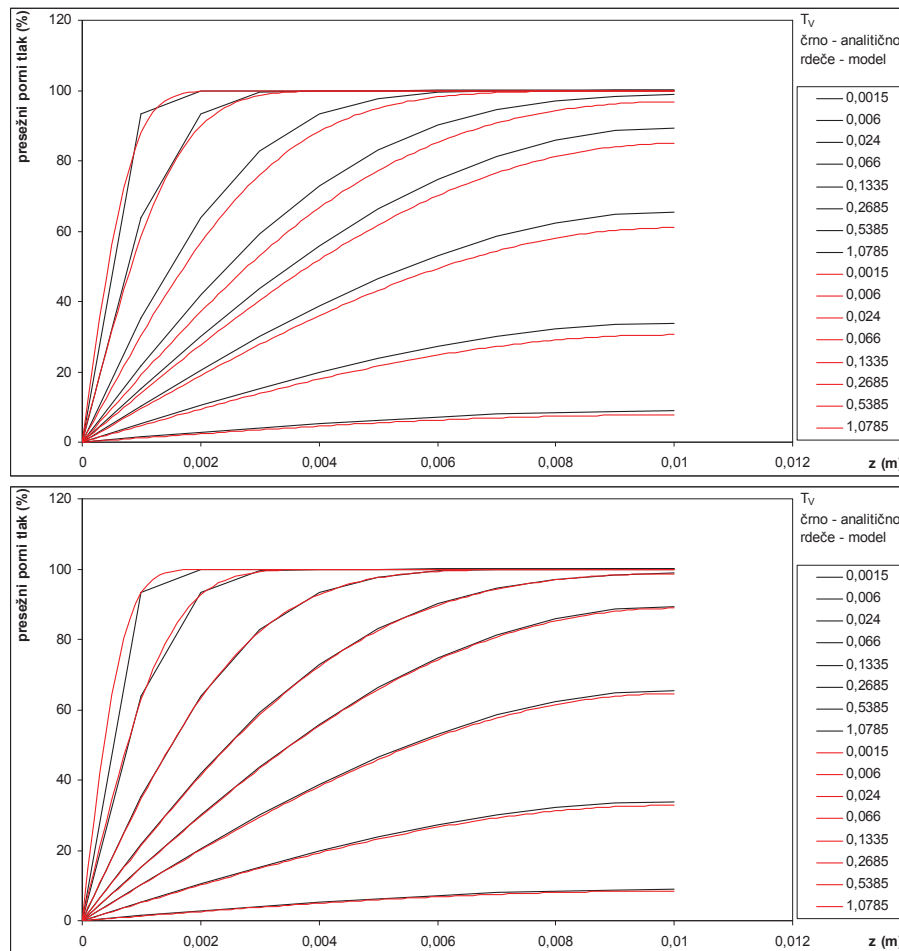
Kjer sta θ_{rel} in s_{rel} maksimalna dovoljena relativna sprememba vlage in sukucije

14.4 Analize toka vode z numeričnim modelom

14.4.1 Primerjave z laboratorijskimi testi

Delovanje numeričnega modela smo primerjali z analitičnim računom toka vode ob konstanti razliki tlakov na robovih, primerjavo med analitično in numerično rešitvijo enačbe za vertikalno konsolidacijo, s spreminjanjem volumna vzorca v edometru, spreminjanjem volumna in osnih deformacij v sukucijskem edometru ter spreminjanje količine vode v napravi Hyprop. Primerjava modelnega ujemanja z laboratorijskimi podatki je pomembna, saj smo na podlagi laboratorijskih testov določili materialni model, pri samih laboratorijskih testih pa so dobro znani tudi robni pogoji.

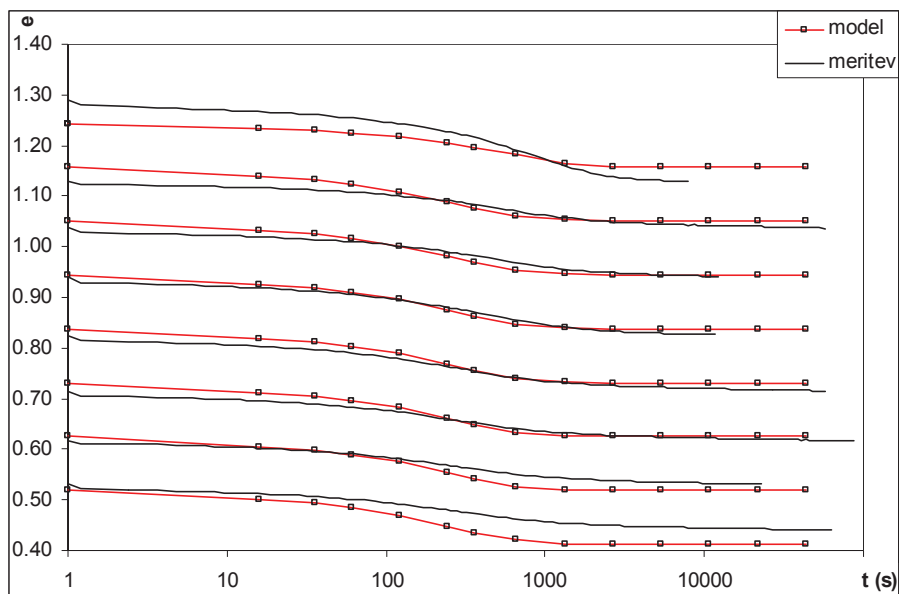
Na sliki 14.26 vidimo primerjavo med numeričnim in analitičnim izračunom vertikalne konsolidacije. V primeru numeričnega izračuna je bil korak 0,0001 do 0,006 T_v (časovni faktor konsolidacije), računali smo s 101 elementom. V začetnem delu je ujemanje dobro, po $T_v=0,24$ pa začne numerični model prehitevati analitične izračune (prešel je na večji korak). Z manjšanjem koraka bi praktično izničili napako, a bi podaljšali čas računa za skoraj 10x.



Slika 14.26: Presežni porni tlaki med bremensko stopnjjo za primer izračuna s korakom od 1 do 60 s (zgoraj) ter za korak 1 s (spodaj).

Figure 14.26: Excess pore pressures calculated during load stage for the case with steps of 1 to 60 s (top) and step 1 s with (bottom).

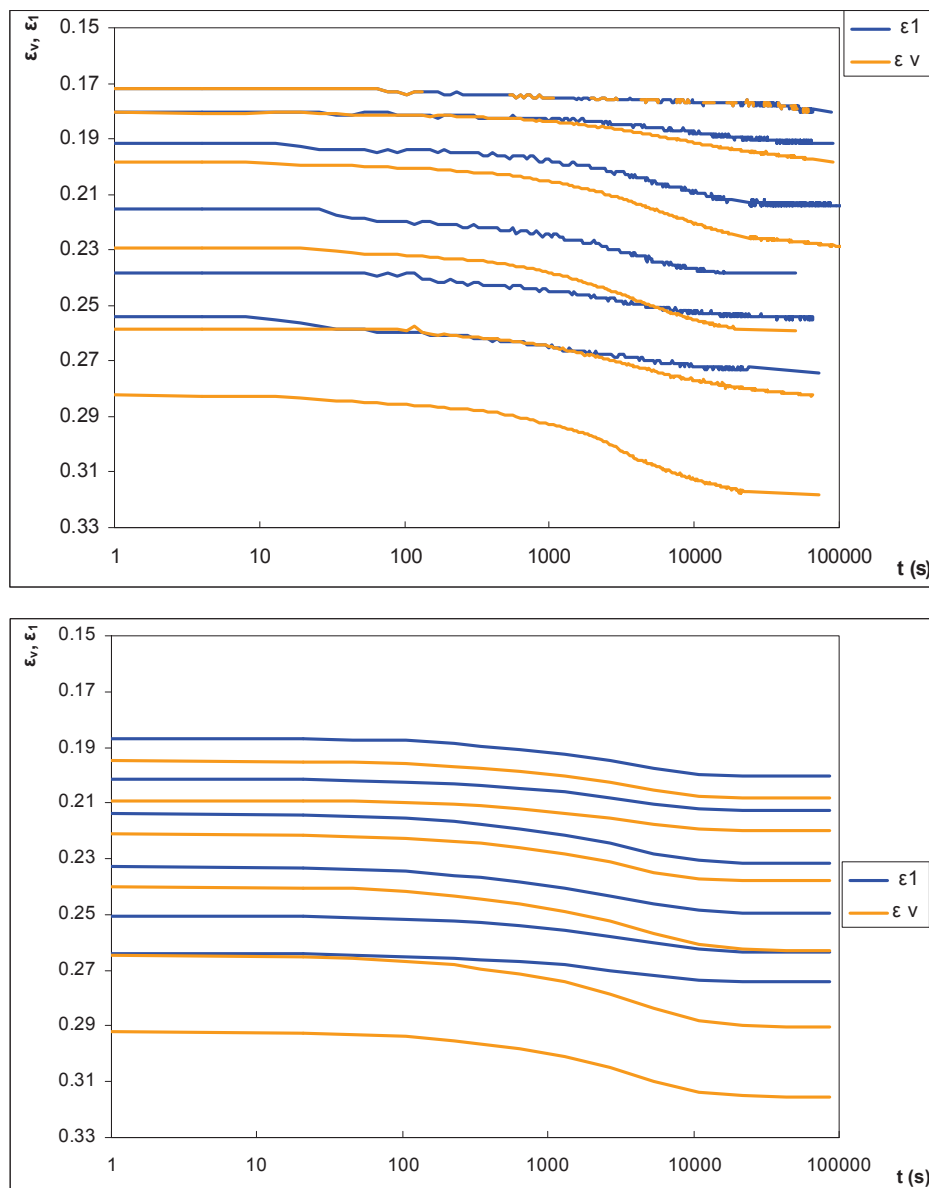
Na sliki 14.27 je prikazan časovni razvoj količnika por med posameznimi bremenskimi stopnjami. Vidimo dokaj dobro ujemanje med modelnim obnašanjem in dejanskimi meritvami. Razlike v vertikalni smeri so posledica idealizacije modela in so že bile prikazane na sliki 14.2. Vidimo tudi, da imamo predvsem za drugi dve stopnji previsoko ocenjeno vodoprepustnost zemljine. Čas 90% konsolidacije se je zmanjšal za približno 2 krat. Tudi to je posledica idealizacije odvisnosti vodoprepustnosti od količnika por z eksponentno funkcijo. Iz slike tudi vidimo vpliv lezenja zemljine, ki smo ga v modelu zanemarili.



Slika 14.27: Razvoj količnika por s časom za bremenske stopnje v edometru za preizkušaneec 2010 70 mm vz1.

Figure 14.27: The development of void ratio with time for loading stages in oedometer for test sample 2010 70 mm vz1.

V sukucijskem edometru se je pri nizkih vertikalnih obremenitvah in pri visokih sukucijah pričel vzorec bočno krčiti. Posledično je volumenska deformacija večja od osne deformacije. V napravi smo prvo zmožni meriti kot razliko pretečene vode, drugo pa kot razliko višine vzorca, obe deformaciji pa lahko tudi izračunamo. Obnašanje vzorca, obremenjenega z vertikalno obtežbo 100 kPa med obremenjevanjem s sukucijo in napovedjo modela ob koncu posamezne stopnje, smo pokazali na sliki 14.13, na sliki 14.28 pa prikazujemo časovni razvoj deformacij za stopnje, pri katerih smo povečevali sukucijo. Vidimo dokaj dobro ujemanje med rezultati meritev in napovedjo modela glede razvoja deformacij, vendar dokaj slabo ujemanje glede velikosti deformacij. Slaba napoved deformacij je predvsem opazna na začetnem delu meritev in je že bila prikazana na sliki 14.13. Iz slike 14.28 vidimo tudi pojav manjših bočnih elastičnih deformacij pri začetnih stopnjah, ki so nastale zaradi slabo predpostavljene zveze za elastični strižni modul. Elastični strižni modul samo v splošnem dobro opiše obnašanje materiala, na tem preizkušancu pa je prišlo do manjših napak.

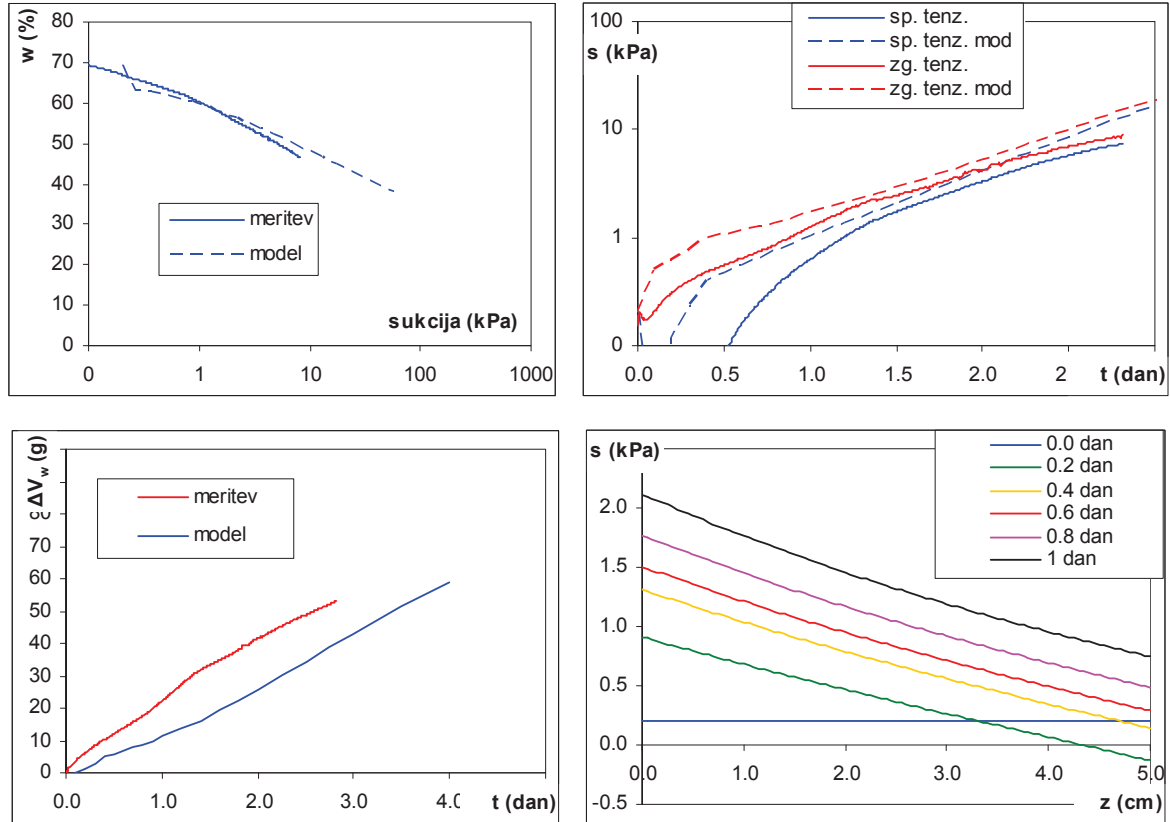


Slika 14.28: Razvoj volumenskih in osnih deformacij s časom za bremenske stopnje sukcije v napravi SESA za vzorec pri vertikalni obremenitvi 100 kPa. Zgoraj so prikazane meritve, spodaj pa rezultat modela.

Figure 14.28: The development of volume and axial deformations with time for suction loading stages in SESA apparatus for sample at 100 kPa vertical load. The chart on top presents measured data and the chart below the numerical prediction.

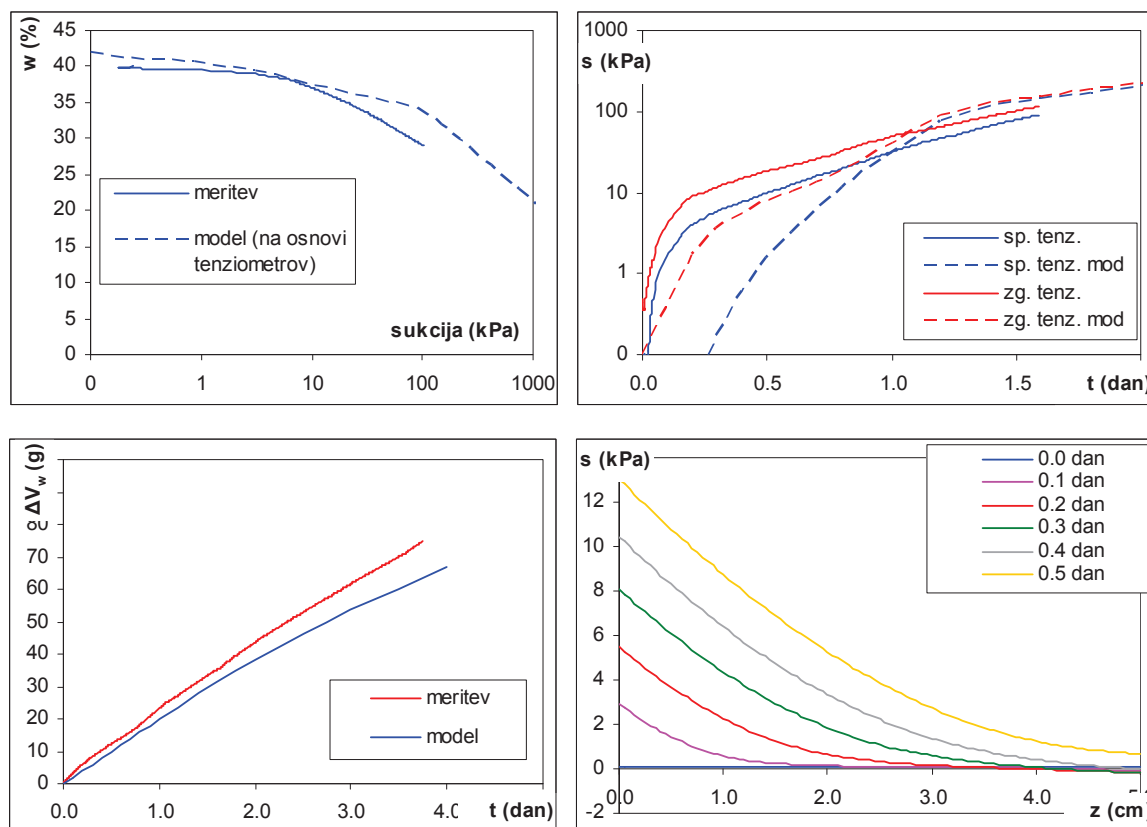
Prav tako smo preverili delovanje modela na podatkih iz naprave Hyprop. Pri vseh dosedanjih preveritvah modela do sedaj smo imeli za robne pogoje konstanten tlak ali nični tok. V napravi Hyprop pa imamo pogoj konstantnega toka. Podobno stanje imamo v naravi med evaporacijo vode iz zemljine. S testom v napravi Hyprop lahko tako preverimo kako kvalitetno znamo opisati gibanje vode med evaporacijo vode v zemljini. Numerične izračune smo opravili na obeh vzorcih, vgrajenih v napravo Hyprop in jih podajamo na sliki 14.29 in 14.30. Iz obeh slik lahko vidimo dobro ujemanje med modelno napovedjo in dejanskimi meritvami. V začetnem delu se meritve sicer razlikujejo, kar je posledica ne znanih začetnih pogojev. Po približno 0,5 oziroma 1 dnevu pa se meritvi približata oziroma potekata s časovno zamudo. Iz numeričnega izračuna vidimo, da je hiter prirast sukcije

posledica razvoja sukcije v modelu in ne dejanskega obnašanja zemljine. Desno spodaj prilagamo razporeditev sukcije po višini, ki potrjuje skoraj linearno zvezo med sukcijo in višino v prvem primeru in ne tako linearno zvezo v drugem primeru.



Slika 14.29: Primerjava med meritvijo in rezultati numeričnega modela za primer vzorca HYPROP1.

Figure 14.29: Comparison between measurements and numerical model results for the case of sample HYPROP1.



Slika 14.30: Primerjava med meritvijo in rezultati numeričnega modela za primer vzorca HYPROP2.
 Figure 14.30: Comparison between measurements and numerical model results for the case of sample HYPROP2.

14.4.2 Primerjave s terenskimi meritvami

V prejšnjem poglavju smo pokazali, da lahko s predpostavljenim modelom zadovoljivo opišemo dogajanje v zemljini, zato smo enak model in numerični program uporabili za račun toka vode na plazu Slano blato. Robni pogoji računa v tem primeru predstavljajo padavine in potencialna evaporacija, popravljena za vpliv sukcije zemljine. Na spodnjem robu pa smo imeli konstanten tlak vode. Numerični model je bil sestavljen iz 501 vozlišča in je zajemal zgornjih 5 m zemljine. Dodatnih 3 m zemljine nismo upoštevali, saj ne bi prinesli k izboljšanju rezultatov modela, ampak bi samo povečevali numerične napake in trajanje izračuna. Minimalni korak izračuna smo povečali na 15 s, maksimalni korak pa je bil 10 min. V izračunu smo upoštevali, da je maksimalni možni tlak (minimalna sukcija) enak hidrostatskemu tlaku, če bi bila voda na površini terena.

Pred izračunom je potrebno popraviti modelne parametre, saj zemljino na plazu predstavlja 40% debelih frakcij (predvsem gramoza) in 60% gline. Za mešano zemljino smo predpostavili, da jo lahko opišemo kot zemljino sestavljeno iz 70% stisljive in prepustne zemljine in 30% nestisljive in neprepustne zemljine. Primerjavo med materialnimi podatki finih delcev in mešane zemljine podajamo v preglednici 14.5. Predpostavili smo da fini delci popolnoma oblijejo večja zrna. S takšno predpostavko smo ohranili retencijsko krivuljo, stisljivost in vodoprepustnost pa smo zmanjšali za delež nestisljive komponente (popravek količnika por).

Preglednica 14.5: Parametri modificiranega Cam clay modela, Brooksove in Coreyeve retencijske krivulje, ter funkcije za opis vodoprepustnosti zasičene zemljine za preiskovane vzorce finih delcev in za celotno zemljino.

Table 14.5: Parameters of modified Cam Clay model, Brooks and Corey soil water characteristic curve and function for saturated permeability for tested samples on fines and for the whole soil.

	količina	enota	fini delci	celotna zemljina
Strižni parametri	ϕ'	°	27,0	27,0
	c'	kPa	0,0	0,0
Stisljivost	Γ		2,59	2,00
	λ		0,154	0,092
	κ		0,038	0,023
	G_0	kPa	17	23
	p_0	kPa	1	1
Retencijska krivulja	α_{BC}	kPa	1360	1360
	λ_{BC}		0,473	0,473
	S_{r_s}		1,00	1,00
	S_{r_f}		0,00	0,00
	κ_χ		2	2
Vodoprepustnost	a		-13,95	-11,93
	b		2,33	3,88

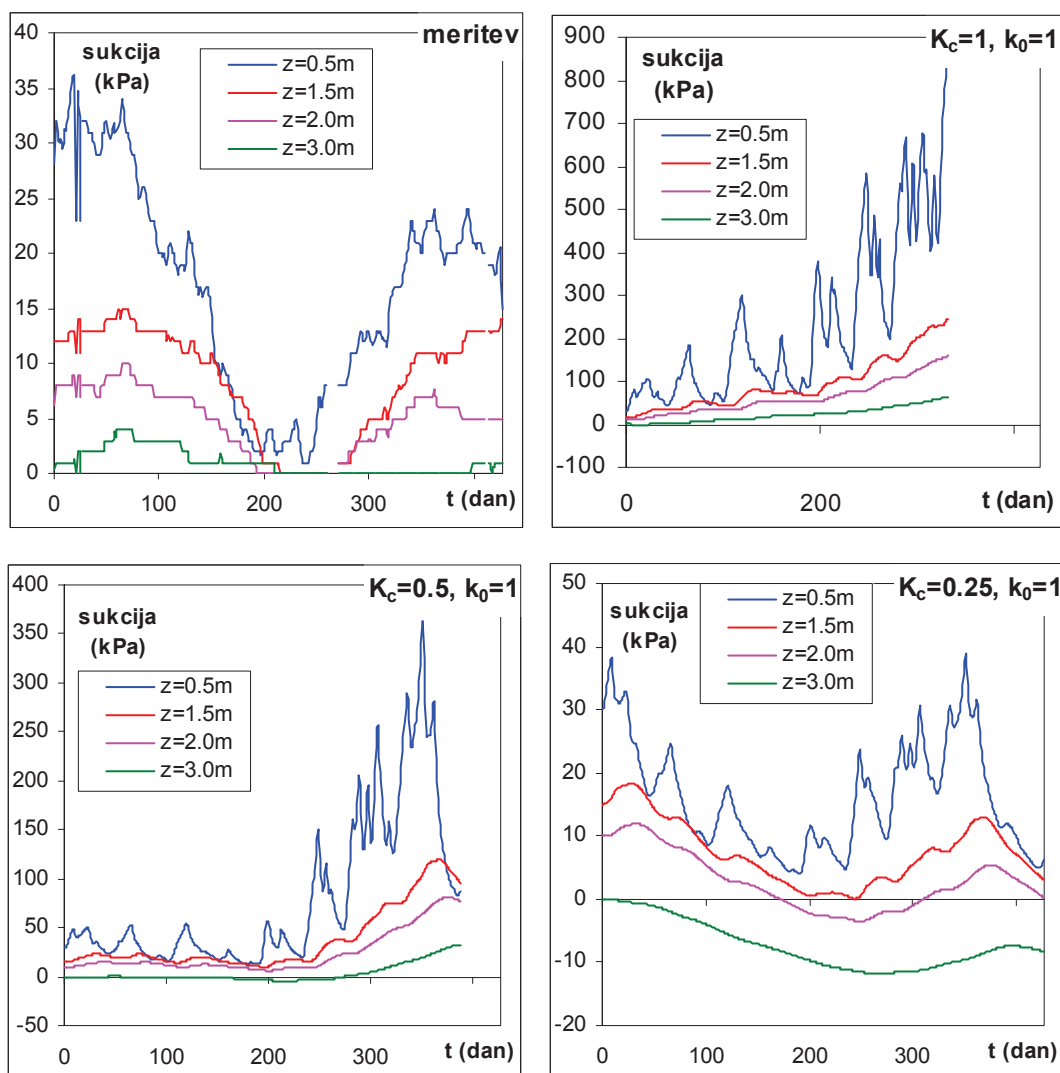
Kljub popravkom ne dobimo primernega odziva zemljine. Po izračunih se zemljina veliko bolj izsuši, kar pa ni skladno s terenskimi opazovanji. Da bi se približali dejanskemu stanju, smo variirali vodoprepustnost zemljine, količino evaporacije in robne pogoje na spodnjem robu modela. Vse parametrične študije smo opravili v prvih 427 dneh opazovanja (1.11.2007-31.12.2008).

14.4.2.1 Vpliv stopnje evaporacije

V numeričnem modelu smo na spodnjem robu upoštevali konstanten tlak vode 30 kPa. Na zgornjem robu pa smo variirali potencialno evaporacijo s koeficientom stanja tal in rastlinja (K_c). Materialnih podatkov nismo spreminjali. Na sliki 14.31 vidimo rezultate numeričnega modela za različne koeficiente stanja tal in rastlinja ter primerjavo s terenskimi meritvami na MS1. V primeru visoke stopnje evaporacije ($K_c = 1$), se v zemljini razvijejo visoke sukucije, ki so znatno višje od sukucije izmerjene v naravi. Šele z redukcijo K_c na 0,25 dobimo podobne rezultate. Razlika med dejansko evaporacijo in potencialno evaporacijo je velika (4x), vendar jo lahko pojasnimo s prisotnostjo debelejših zrn na površini plazine. Debelejša zrna namreč zmanjšujejo površino zemljine s katere lahko voda izhlapeva. Za potrditev redukcije dejanske evaporacije pa bi potrebovali terenske meritve evaporacije v lizimetru.

Gibanje sukucije v MS2 nismo analizirali, saj so po geoloških podatkih na tej točki prisotni arteški tlaki. Za analizo bi potrebovali tudi dobre meritve tlaka podzemne vode. MS2 tudi ni zanimiva za vrednotenje stabilnosti na plazju Slano Blato.

V vseh izračunih se moramo zavedati omejitvev 1D računa, ki ne upošteva razgibanosti terena, vpliva drenaž ali neprepustnih grebenov.

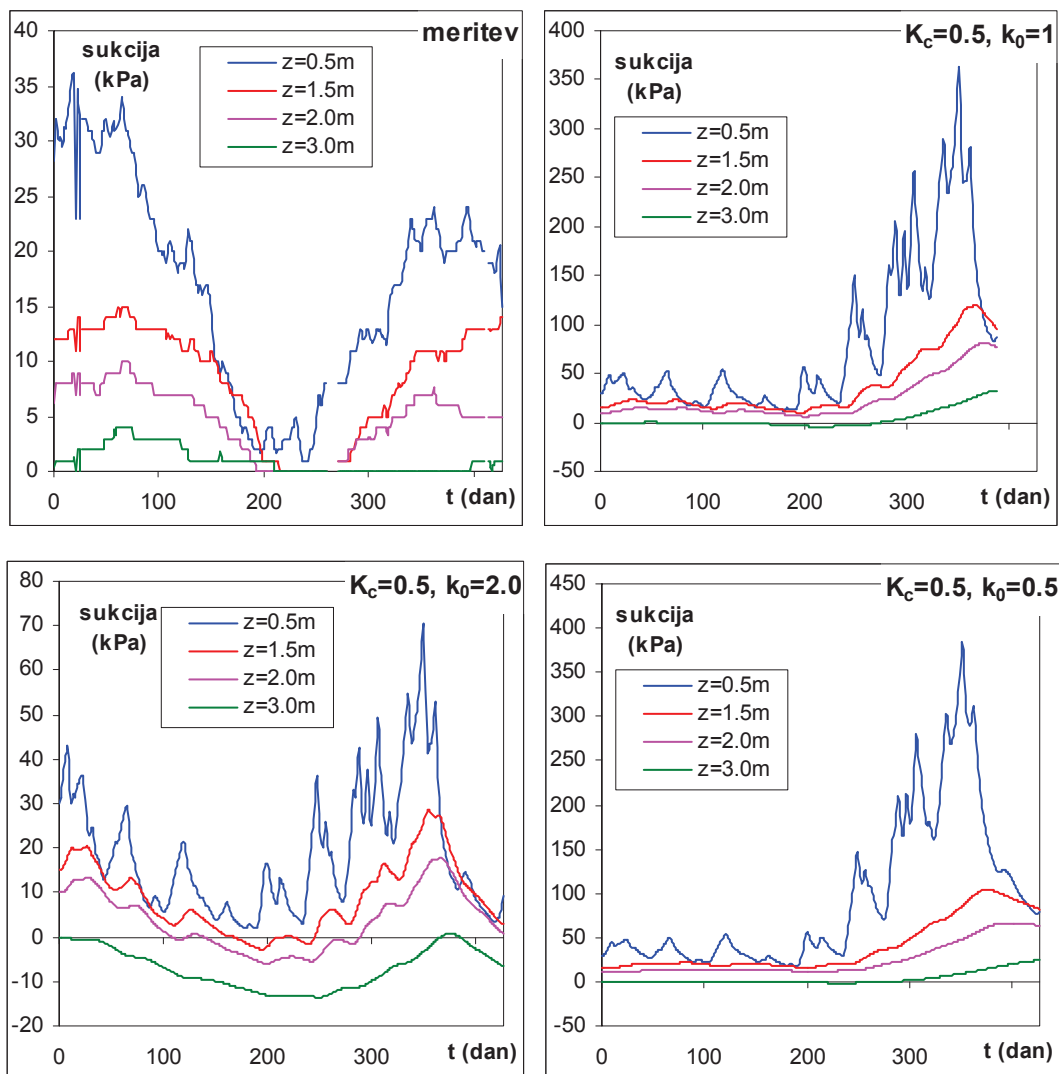


Slika 14.31: Vpliv evaporacije v numeričnem modelu na sukcijo v plazini.

Figure 14.31: Influence of evaporation in numerical model on suction in landslide body.

14.4.2.2 Vpliv vodoprepustnosti

V numeričnem modelu smo na spodnjem robu upoštevali konstanten tlak vode 30 kPa. Na zgornjem robu smo upoštevali redukcijo potencialne evaporacije $K_c=0.5$. Od materialnih podatkov pa smo spreminjali vodoprepustnost zemljine. Na sliki 14.32 vidimo rezultate numeričnega modela za različne vodoprepustnosti ter primerjavo s terenskimi meritvami. Povečanje vodoprepustnosti za 2x ($k_0=2$) znižuje sukcijo, zmanjšanje vodoprepustnosti za 2x ($k_0=0,5$) pa nima bistvenega vpliva na obnašanje zemljine.

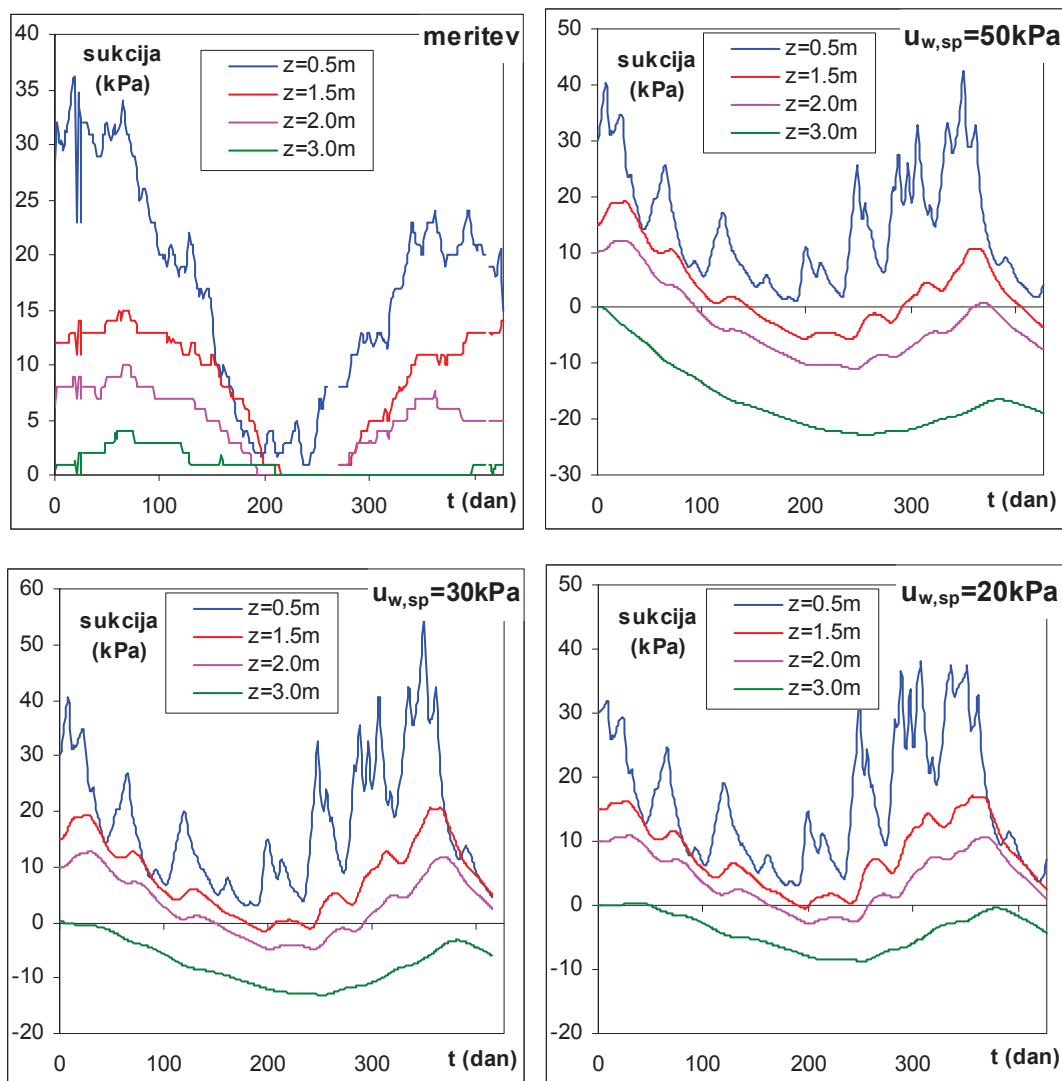


Slika 14.32: Vpliv vodoprepustnosti v numeričnem modelu na sukucijo v plazini.

Figure 14.32: Influence of water permeability in numerical model on suction in landslide body.

14.4.2.3 Vpliv tlaka na spodnjem robu

Ena izmed predpostavk v numeričnem modelu je tlak vode na spodnjem robu plazju. Tlak vode bi se sicer dalo izmeriti s piezometrom, ki pa ga na plazju Slano blato ni v bližini merske točke MS1. Piezometer tik nad vodnjaki pa izkazuje bistveno drugačen nivo talne vode. V numeričnem modelu smo na zgornjem robu upoštevali redukcijo potencialne evaporacije $K_c=0.325$. Od materialnih podatkov smo povečali vodoprepustnost zemljine za 50% ($k_0=1,5$). Na spodnjem robu pa smo varirali tlak vode. Tlak vode 20 kPa predpostavlja hidrostatični tlak glede na stanje 1.11.2007, tlak 50 kPa pa je ekvivalenten tlaku, ki bi bil v plazini, če bi bil nivo talne vode na površini. V primeru tlaka 50 ali 30 kPa (uporabljen v prejšnjih izračunih) je tlak vode na globini 3 m pozitiven (sukucija je negativna) in ne ustreza terenskim meritvam (slika 14.33). V primeru tlaka 20 kPa pa dobimo dokaj dobro stanje na spodnjem robu, vendar bi ga bilo zaželeno še znižati (na primer 15 kPa).



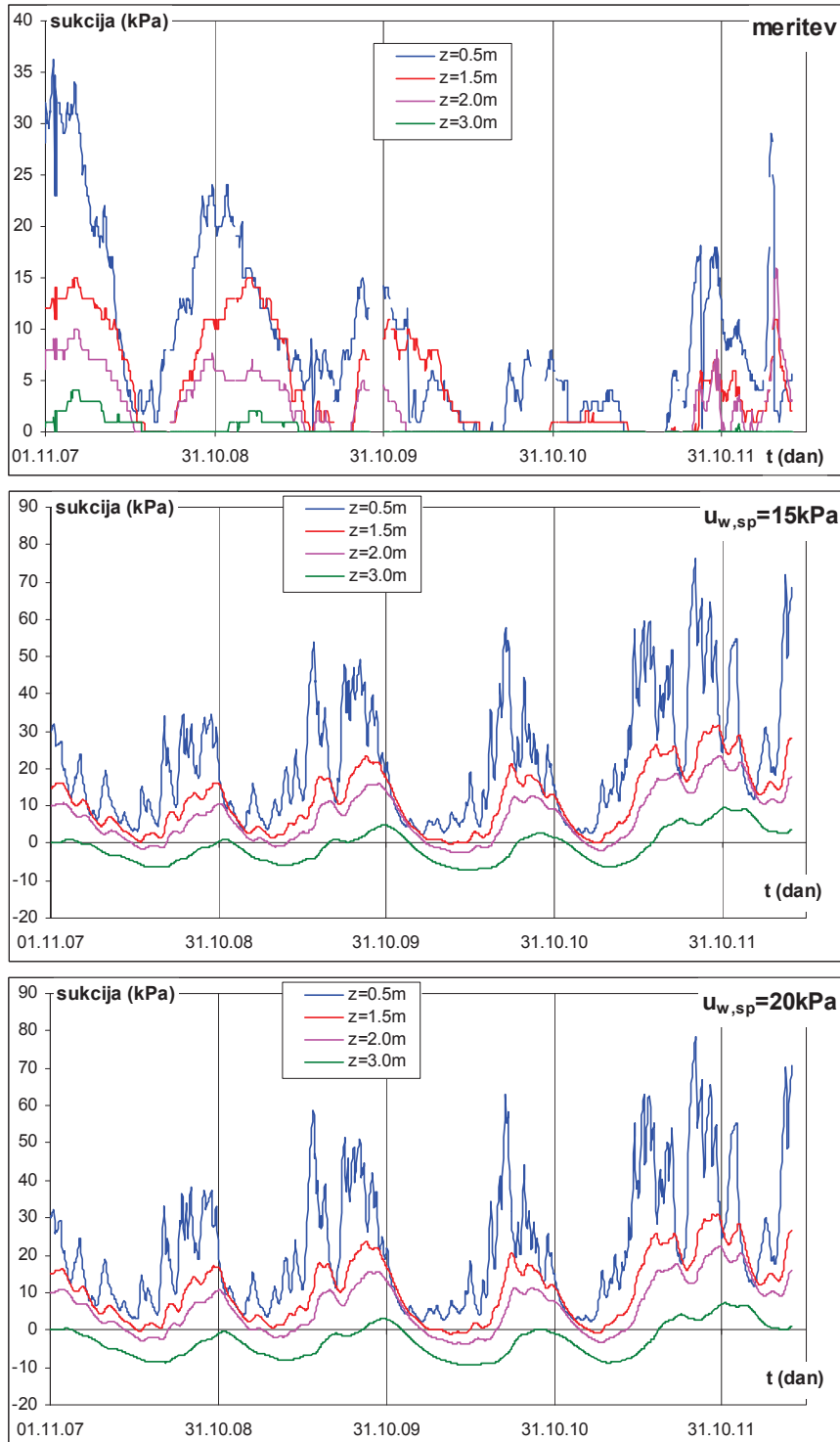
Slika 14.33: Vpliv vodoprepustnosti v numeričnem modelu na sukcije v plazini.

Figure 14.33: Influence of water permeability in numerical model on suction in landslide body.

14.4.2.4 Primerjava s terenskimi meritvami v obdobju 1.11.2007-1.5.2012

V prejšnjih poglavjih smo opravili manjše popravke evaporacije, tlaka na spodnjem robu modela in vodoprepustnosti. Kalibrirane materialne podatke iz prejšnjih izračunov ($K_c=0.325$, $k_0=1,5$) smo uporabili za izračun razvoja sukcije v obdobju 1.11.2007-1.5.2012. Opravili smo dva izračuna. Za primer tlaka na spodnjem robu 15 kPa in za primer tlaka na spodnjem robu 20 kPa. Izračunana sukcija v zemljini se podobno spreminja kakor izmerjena sukcija. Velikostni red sukcije pa je večji od merjenega. Iz izračunov vidimo večje nihanje sukcije v primeru globine 0.5 m ter manjše nihanje sukcije v primeru globljih merilcev. Merjena nihanja sukcije so manjša od izmerjenih, prav tako opazimo tudi manjšo časovno zakasnitev med numeričnim modelom (1-2 dni) in terenskimi meritvami (7 dni) za globino 0.5 m. Slednje je lahko povezano ali z natančnostjo numeričnega modela zaradi premalo podrobne mreže vozlišč in prevelikega koraka časa. Vpliv koraka časa je že bil zaznan v primeru edometriške preiskave. Podoben izračun smo opravili tudi pred začetkom računanja gibanja vode na 5 m debelem sloju z enakimi podatki kakor v modelu za izračun gibanja vode, a pri stopenjski obremenitvi ni bilo opazne napake zaradi numeričnega izračuna.

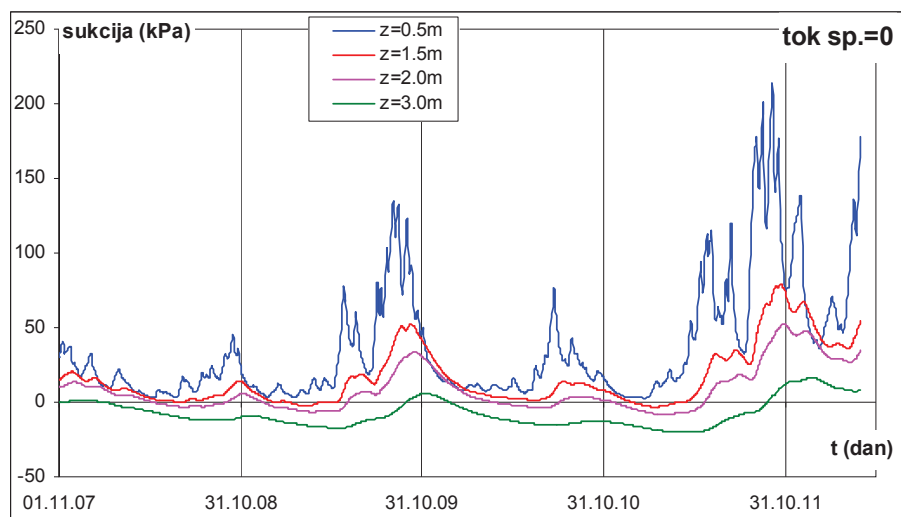
Razlike med numeričnim modelom in obnašanjem zemljine v letu 2010-2011 lahko pripišemo povečanemu vodnemu pritisku na spodnji rob plazine in/ali poškodovani drenaži. Poškodovana drenaža nezadostno odvaja vodo, na mestu poškodbe pa lahko celo povzroči povečanje pornih pritiskov.



Slika 14.34: Gibanje sukcije v plazini za obdobje 1.11.2007 – 1.5.2012 (meritve na vrhu in modelni napovedi spodaj).

Figure 14.34: Soil suction variation in landslide body between 1.11.2007 – 1.5.2012 (measured data on the top and model prediction below).

Dodatno smo opravili izračun za neprepustno podlago (slika 14.35). V tem primeru imamo previsoko oceno evaporacije in večje sušenje zemljine, predvsem v letu 2011. Rezultati pa tudi kažejo na rahlo lezjenje spodnjega roba (na 8 m globine) na tlak približno -90 kPa, kar je več od možnega tlaka (-80 kPa). Boljši rezultat bi dobili ob zmanjšanju evaporacije ali povečanih vodnih pritiskih na spodnji rob plazine. Manjšo numerično napako bi dobili z manjšanjem koraka in bolj natančnim izračunom.



Slika 14.35: Gibanje sukcije v plazini za obdobje 1.11.2007 – 1.5. 2012 ob neprepustni podlagi.
Figure 14.35: Soil suction variation in landslide body between 1.11.2007 – 1.5.2012 with impermeable lower boundary.

14.5 Ocena pomikov plazu Slano blato

Iz izmerjenih pomikov in opazovane sukcije ne moremo sklepati na velikost pomikov, saj je bil plaz Slano blato opazovan prekratko časovno obdobje, v premalo spreminjajočih se pogojih sukcije. Dodatno nezenasljivost predstavlja tudi merska nenatančnost meritev pomikov.

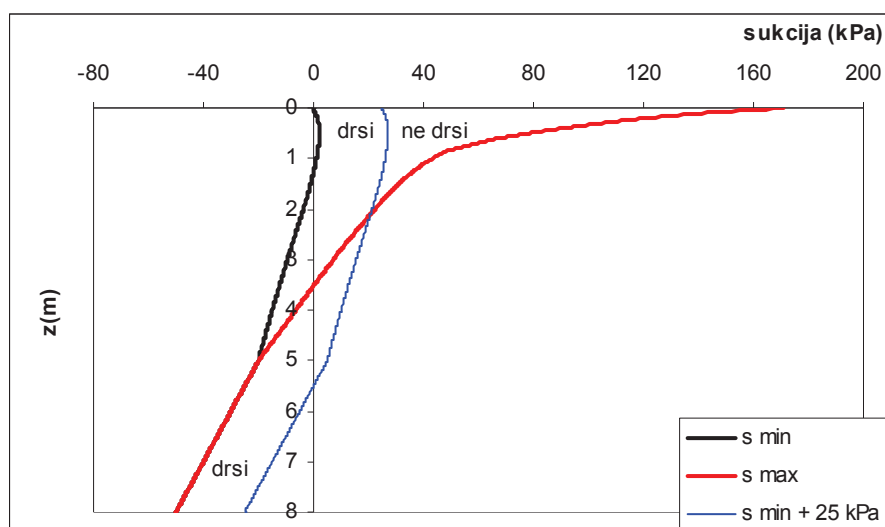
Pri oceni pomikov plazu Slano blato si bomo pomagali z izračunano razporeditvijo vodnih pritiskov v zemljini (slika 14.34) in s pomočjo modela za opis lezenja (14.24). Izvedli bomo več ocen lezenja zemljine, ki jih delimo na to ali upoštevajo zgornjo ali spodnjo mejo hitrosti lezenja (slika 14.24) in ali upoštevajo ugoden vpliv sukcije ali ne.

14.5.1 Postopek vrednotenja

Plaz Slano blato bomo upoštevali kot brezkraino pobočje debeline 8 m z naklonom 15°. Razporeditev tlakov bomo povzeli po numeričnem izračunu, opisanem v prejšnji točki. Od globine 4 m do globine 8 m bomo upoštevali hidrostatsko napetostno stanje. Debelino plazu bomo razdelili na 0.5 m debele lamele, za katere bomo izračunali faktor varnosti (enačba (11.2)). Stopnja strižne napetosti je namreč inverz faktorja varnosti. S pomočjo stopnje strižne napetosti bomo ocenili naklon logaritemske premice lezenja. Za začetni čas lezenja smo si izbrali leto 2004, ko smo imeli zadnji blatni tok v osrednjem kanalu. V letu 2007, ko so se ocenili pomiki plazu s pomočjo laserskega skeniranja, so bili še zmeraj možni dodatni pomiki zaradi konsolidacije zemljine.

Če upoštevamo ugodne vplive sukcije, imamo problem, saj ne znamo ugotoviti vpliva spremembe sukcije na hitrost lezenja. Za primer uporabe Burgarjevega modela bi ugotovili, da Maxwelllovo reološko telo povzroči hipno zmanjšanje deformacij in zmanjšanje hitrosti lezenja, Kelvinovo in Voightovo telo pa bi počasi povzročilo relaksacijo. Po daljšem času (odvisno od parametrov modela) Kelvinovo in Voightovo telo ne bi več doprineslo k deformacijam, Maxwelllovo telo pa bi še zmeraj povzročalo prirast deformacij. Takšen model se nam ni zdel primeren, saj ne povzema rezultatov preiskav. Zato smo se raje odločili za fenomenološki model. Pri modelu smo upoštevali, da prirast sukcije za 25 kPa ustavi lezenje zemljine. Podobno stanje smo opazovali pri preiskavah lezenja v napravi SESA, saj v naših laboratorijskih testih upad sukcije za 50 kPa že pomeni rahlo relaksacijo materiala (negativno hitrost prirasta deformacij). Prav tako smo upoštevali, da moramo seštevati čas obremenitve ali ponovne obremenitve. Posledica takšnega modela je, da moramo iz računa lezenja odšteti vse dneve s sukcijo za 25 kPa večjo od minimalne izračunane sukcije (slika 14.36). Minimalna sukcija namreč povzroči največjo strižno obremenitev. Za dneve s sukcijo med 0 in 25 kPa višjo od minimalne pa upoštevamo stanje zemljine pri minimalni sukciji. Prav tako pa je potrebno popraviti čas lezenja do leta 2007. Omeniti velja, da je predstavljen model zelo grob, a boljšega ne znamo postaviti.

Ocene deformacij ne povzemajo začetnih plastičnih strižnih deformacij, ampak samo deformacije, ki so se zgodile od leta 2007 naprej. Meritve deformacij na plazu prav tako ne zajemajo teh začetnih deformacij.

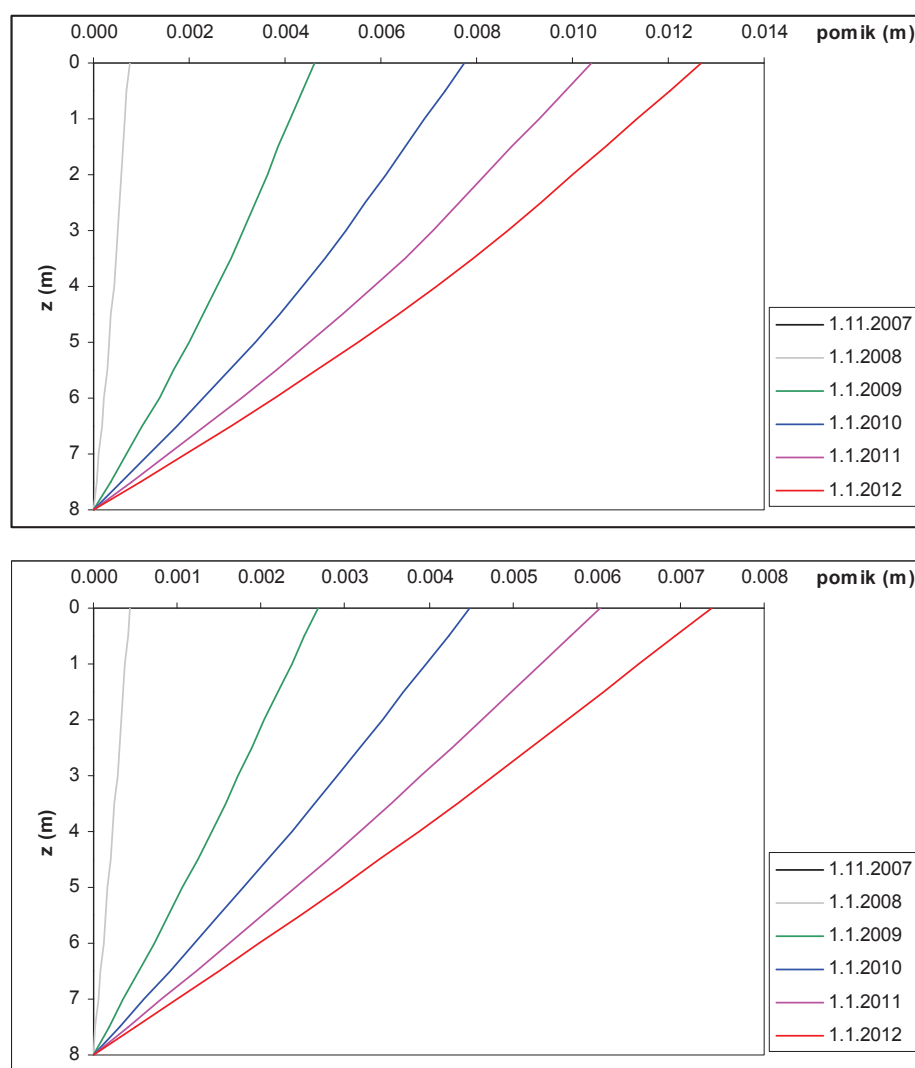


Slika 14.36: Ovojnica sukcije v plazini in pogoj lezenja.

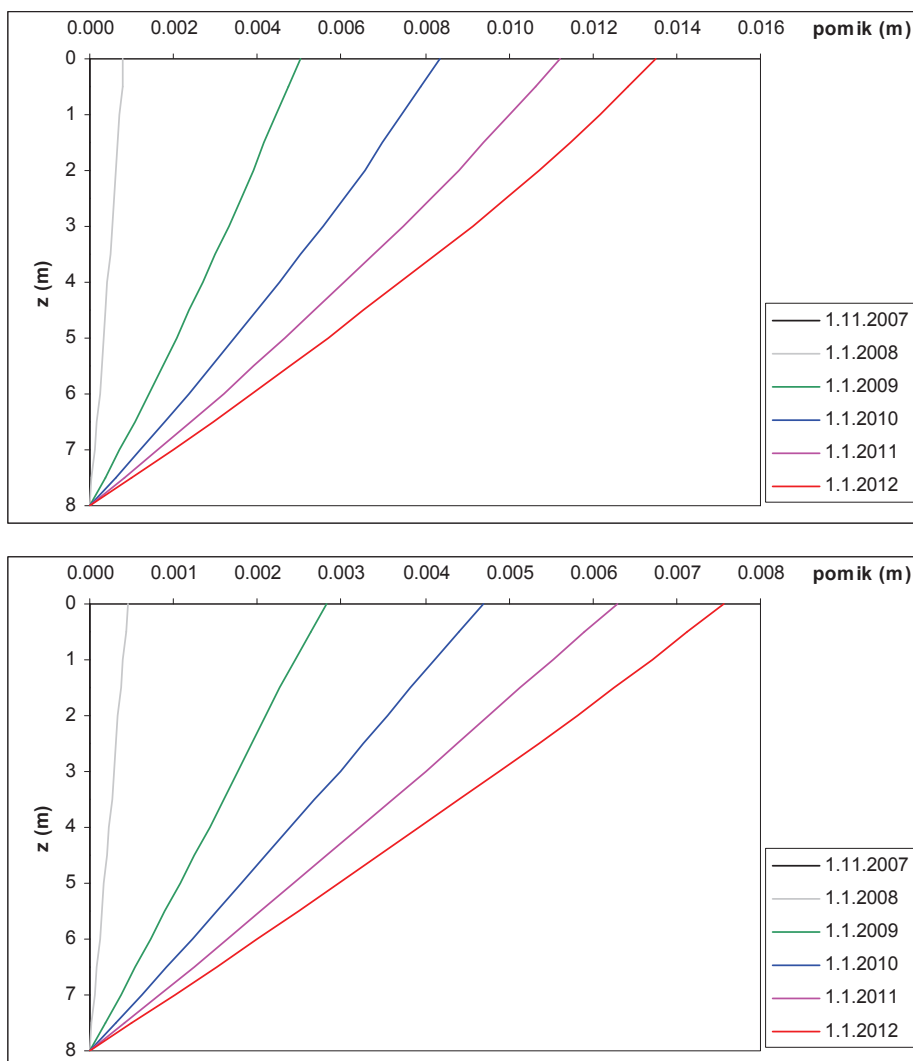
Figure 14.36: Suction envelope in landslide body and requirement for creep conditions.

Iz slik 14.37 do 14.38 vidimo razvoj pomikov s časom za obdobje 2007-2012. Modelna napoved pomikov je med 8 in 13 mm. Iz grafov pa opazimo zvezen prirast deformacij z globino. Takšno obnašanje je značilno za viskozno lezenje. Zakrivljenost krivulje posledica različne stopnje strižnega obremenjevanja. Iz slik lahko ocenimo pomik zgornjega sloja zemljine med letoma 2011 in 2012 na 1.4 do 2.3 mm, kar se ujema s terenskimi meritvami točk 1, 3 in 4. Prav tako lahko ocenimo, da sukcija ni vplivala na spremembo pomikov na plazu Slano blato. Eden izmed razlogov je popravek časa obremenitve. Sukcija zmanjšuje skupni čas obremenitve, kar povečuje hitrost strižnega lezenja v času, ko zemljina leze.

Ker geodetska opazovanja na točkah 2, 5 in 6 izkazujejo večje pomike (20-100 mm) smo opravili enake analize s povečanim tlakom na kontaktu s podlago. Upoštevali smo hidrostatsko stanje z nivojem gladine podzemne vode 0,5 m pod površino terena (faktor varnosti 1.03 na spodnjem robu plazine). S tem popravkom povečamo pomike na površini na 1.5-3.0 mm. Obe merjeni meji pa sta vsaj 10 krat manjši od izmerjenih pomikov. Zato smo naredili še analizo za primer, ko je voda na površini plazine (faktor varnosti 0.97 po celotni globini zemljine). Pri tem smo upoštevali Bingmanov model lezenja zemljine z viskoznostjo $1 \cdot 10^{10}$ kPa/s (Majes et al., 2002) oziroma $5 \cdot 10^8$ kPa/s (Logar et al., 2005). V prvem primeru dobimo na letni ravni 2 cm pomikov, v drugem primeru pa 30 cm. Vidimo, da lahko občasni samo za 5 kPa povišani porni pritiski povzročijo premike med 2 in 30 cm. Za dejansko analizo pomikov plazu Slano blato pa bi potrebovali piezometer za oceno pornih pritiskov na spodnji ploskvi plazine. Porni pritiski se namreč spreminjajo s časom in tudi niso v stacionarnem stanju.



Slika 14.37: Razvoj pomikov v plazini s časom za obdobje 1.11.2007-1.1.2012 za primer brez upoštevanja ugodnih vplivov sukucije. Zgoraj zgornja meja lezenja, spodaj spodnja meja lezenja.
Figure 14.37: Displacements in landslide body during 1.11.2007-1.1.2012 without contribution of suction. Upper diagram – upper creep limit, lower diagram – lower creep limit.



Slika 14.38: Razvoj pomikov v plazini s časom za obdobje 1.11.2007-1.1.2012 za primer z upoštevanjem ugodnih vplivov sukucije. Zgoraj zgornja meja lezenja, spodaj spodnja meja lezenja.

Figure 14.38: Displacements in landslide body during 1.11.2007-1.1.2012 with contribution of suction. Upper diagram – upper creep limit, lower diagram – lower creep limit.

14.5.1.1 Zaključek

Pokazali smo, da lahko lezenju zemljine pripišemo samo pomike do velikosti 1-2 mm/leto ter da lezenje povzroči zvezne deformacije z globino. Večje pomike pa povzroči porušitev zemljine. S tem se v doktorski disertaciji nisem ukvarjal, a sem viskoznost zemljine grobo ocenil na podlagi literaturnih podatkov. Z uporabo Binghamovega reološkega modela lahko ocenimo deformacije na 2-30 cm/leto. Pri tem smo upoštevali stacionarno stanje in konstanten tlak vode na spodnji ploskvi plazine.

Na osnovi opravljenih terenskih in laboratorijskih raziskav in opazovanj tu izdelanega računskega modela ocenjujemo, da lahko lezenje zemljine na plazju povzroči le premike velikostnega reda 1-2 mm/leto. Večji premiki so zelo verjetno posledica porušitve zemljine zaradi povečanega pornege pritiska na drsni ploskvi ob hkratnem zmanjšanju sukucije.

15 ZAKLJUČEK

Pobočni premiki plazu Slano blato, ki so bili prvič opisani že leta 1789, so posledica različnih procesov:

- plazjenja brežine na zalednih pobočjih, kjer je naklon odlomnega robu večji od stabilnega naklona za podane strižne karakteristike in gladine podzemne vode,
- hitrega preperevanja flišne kamnine in kopičenja drobirja na »prestrmih« pobočjih,
- plazjenja osrednjega dela plazu, kjer je nakopičena zemljina mešanica pobočnega grušča, preperelega fliša in rezidualne zemljine, nastale na mestu mehčanja fliša v podlagi,
- tečenja razmočene plazine, ki je posledica zaostajanja vode na površini in povečanih vtokov v deževnih obdobjih tako iz površine kot arteško, iz flišne podlage.

Hitrost premikov je odvisna od številnih vplivnih dejavnikov in je na različnih delih plazu različna.

V tej nalogi smo raziskovali, kakšen vpliv ima sukucija na pomike plazu. Eksperimentalni del naloge smo izvedli na terenu in v laboratoriju. Na osnovi opravljenih raziskav in terenskih meritev smo izdelali numerični model, s katerim smo poskušali opisati dogajanja med laboratorijskimi raziskavami ter gibanje vode in pomike na plazu.

Pri terenskih meritvah smo izkoristili že obstoječ sistem opazovanja plazu, ki smo ga dodatno nadgradili s šestimi geodetskimi točkami za meritve z GPS merilniki. Nove točke smo vgradili leta 2011. V letih 2011-2012, ki sta bili izjemo sušni, smo izvedli 3 serije GPS meritev pomikov. Pred letom 2011 so bila tri leta z nadpovprečno količino padavin, zaradi katerih je bila plazina popolnoma razmočena, sukucija na opazovanih merskih točkah pa je bila zelo nizka oz. nična. Kljub dolgotrajni suši v letu 2011, se zemljina na plazu počasi suši in vrednosti sukucije še niso dosegle tistih iz leta 2007. Ker v času izvajanja GPS opazovanj pomikov ni prišlo do sprememb sukucije v plazini, teh pomikov ni bilo možno povezati s spremembami sukucije. Opazovanja bo potrebno nadaljevati več let, da bomo lahko prišli do primernih ugotovitev.

V okviru laboratorijskih preiskav smo opravili klasične geotehnične preiskave in specifične preiskave, potrebne za razvoj modela obnašanja zemljine. Razvili ali na novo smo vpeljali naslednjo novo laboratorijsko merilno opremo ali merilne postopke:

- Predelali smo ciklični enostavni strižni aparat DTA-136 (proizvajalca Seiken) tako, da omogoča meritve volumenskega obnašanja zemljine in strižne trdnosti ob različnih kombinacijah totalne vertikalne napetosti in sukucije. Ker je višina preizkušanca samo 3 cm, je čas preiskave vzorca 2 do 4 krat krajši od preiskave v sukucijski triosni celici. S tako predelano napravo lahko preiskujemo tudi obnašanje nezasičenih zemljin v cikličnih pogojih. Tako predelano napravo smo poimenovali sukucijski enostavni strižni aparat – SESA.
- Na novo smo vpeljali meritve z napravo Hyprop, v kateri smo opazovali volumensko krčenje židke zemljine izpostavljene sušenju pri nizkih sukucijah.
- Raziskovali smo meje krčenja. Z določitvijo meje krčenja smo zemljini določili točko vstopa zraka in tako razdelili retencijsko krivuljo na dva dela. Pri sukucijah do točke vstopa zraka je zemljina 100% zasičena, vsa sprememba vlage pa se izraža kot sprememba volumna zemljine. Do točke vstopa zraka se kaže močan vpliv predhodne obremenitve zemljine s totalnimi napetostmi ali s sukucijo na retencijsko krivuljo. Pri sukucijah višjih od točke vstopa zraka se

zemljina le malo krči, večino izgube vode pa predstavlja zmanjšanje stopnje zasičenosti zemljine.

- V edometrih smo preiskali vzorce tako, da smo jih sušili pri konstantni vertikalni obremenitvi. S tem smo preverili vpliv vertikalne obremenitve na vrednost sukcije pri točki vstopa zraka. Ugotovili smo, da vertikalna obremenitev do 800 kPa ne vpliva na vrednost sukcije pri točki vstopa zraka, večje vertikalne obremenitve pa povzročijo povečanje sukcije pri točki vstopa zraka.

Iz preiskav volumenskega obnašanja zemljine v napravi SESA, smo ugotovili vpliv začetne totalne napetosti na gostotno stanje zemljine in obnašanje zemljine med obremenjevanjem s sukcijo. Med obremenjevanjem zemljine s sukcijo, se je zemljina plastično deformirala, podobno kakor v primeru obremenjevanja s totalnimi napetostmi. V primeru visokih sukcij smo zaznali tudi bočno stiskanje vzorcev oziroma pojav krčitvenih razpok.

Na podlagi meritve meje krčenja, sušenja zemljine v edometru in preiskav volumenskega obnašanja zemljine v napravi SESA smo ugotovili, da ima zemljina samo eno retencijsko krivuljo v povezavi stopnja zasičenosti -sukcija. Odvisnost gravimetrične ali volumetrične vlage od sukcije pa je odvisna od totalne napetosti v zemljini oziroma od napetostne poti.

S strižnimi preiskavami v napravi SESA smo potrdili ugoden vpliv sukcije na strižno trdnost zemljine. Vpliva stopnje zasičenosti na popravek efektivne napetosti nismo mogli preveriti, saj smo vse preiskave izvedli v območju kapilarne zasičenosti. Vpliv stopnje zasičenosti na popravek efektivne napetosti smo tako ocenili na podlagi meritev volumna pri določitvi meje krčenja.

Pri preiskavah strižnega lezenja zemljine v napravi SESA smo ugotovili velik vpliv krčenje zemljine med strižnim obremenjevanjem na pojav presežnih pornih pritiskov v zemljini in na začetne strižne deformacije. Zaradi dreniranih pogojev preiskav nismo mogli izmeriti presežnih pornih pritiskov. Prav tako ne moremo potrditi vpliva stopnje strižne napetosti na hitrost lezenja zemljine, saj smo imeli preveliko napako pri merjenju hitrosti lezenja. Na podobne težave pri oceni hitrosti lezenja smo pokazali tudi v primeru sekundarne konsolidacije, merjene v edometru.

Na podlagi rezultatov laboratorijskih preiskav smo ob upoštevanju Bishopovega popravka efektivne napetosti razvili model zemljine, ki temelji na modificiranem Cam clay modelu. Model zemljine je v osnovi podoben modelu, ki so ga razvili Tamagnini (2004) in Casini et al. (2007, 2008). Od omenjenega modela se razlikuje po tem, da upošteva vpliv bočnih deformacij pri visokih sukcijah, popravlja pogoj tečenja zemljine tako, da v primeru edometriških preiskav ne izkazuje bočnih deformacij ter ne upošteva začasne prekonsolidacije kot posledice sukcije. Razlika med modeloma je tudi ta, da naš model uporablja za opis retencijske krivulje Brooksov in Coreyev (1964) model, model opisan v literaturi pa van Genuchtenovega (1980).

Z razvitim modelom smo uspešno simulirali obnašanje zemljine med edometriškimi, triosnimi in strižnimi preiskavami. Prav tako je razviti model omogočil tudi simulacijo sušenja zemljine in volumenskega obnašanja zemljine med preiskavo sukcije v napravi SESA. Uspešno smo lahko napovedali tudi presežne porne tlake in začetne deformacije med preiskavo lezenja.

Model, ki smo ga razvili, smo vgradili v program, ki omogoča izračun eno dimenzionalnega gibanja vode v zemljini in temelji na metodi končnih diferenc. S tako izdelanim računalniškim programom smo uspešno opisali gibanje vode med laboratorijskimi preiskavami. Pri izračunu gibanja vode na plazu pa smo najboljše ujemanje dobili s popravkom evaporacije na 0.325 vrednosti potencialne evaporacije ter z zvišanjem vodoprepustnosti plazine za 50%. Prvi popravek je verjetno potreben zato, ker se na površini plazine nahajajo debelejša zrna fliša, ki preprečujejo izhlapevanje. Vpodoprepustnost plazine smo merili izključno na finih frakcijah nato pa enako upoštevali tudi za celotno plazino. Verjetno pa je vodoprepustnost celotne plazine za 50% višja. Dodatno neznanko pri računu gibanja vode predstavlja tudi nepoznavanje tlaka vode na spodnjem robu plazine, saj v plazu ni vgrajenega nobenega piezometra.

Modelne napovedi lezenja zemljine so vsaj 10x manjše od izmerjenih vrednosti pomikov na plazu Slano blato. Merjene pomike plazu Slano blato lahko pojasnimo z izgubo stabilnosti plazine, ki jo lahko pripišemo povišanim pornim pritiskom na spodnji ploskvi plazine. Zato smo ocenjene vrednosti povišanih pornih pritiskov uporabili v Binghamovem reološkem modelu. Viskoznost, ki je osnovni parameter Binghamovega reološkega modela, smo privzeli iz predhodnih preiskav. Vrednosti povišanih pornih pritiskov uporabljene v Binghamovem reološkem modelu so za 5 kPa večje od izračunanih s pomočjo razvitega računalniškega programa. Na podlagi analiz ocenjujemo, da se plaz Slano blato ne giblje zaradi lezenja zemljine, temveč kot viskozni tok zaradi izgube stabilnosti, povzročene zaradi povišanih pornih tlakov.

Rezultati modela kažejo, da so premiki plazu posledica kombinacije vplivov: zvišanja pornih tlakov na drsni ploskvi ob hkratnem znižanju sukucije. Samo znižanje sukucije ne bo povzročilo premikov plazu. Ključna vloga sukucije v plazini je, da vpliva na njeno stopnjo zasičenosti oziroma na volumen vode v plazini, posredno vpliva na hitrost infiltracije vode in s tem posredno na hitrost dvigovanja gladine podzemne vode (tlakov) v plazini. Zaradi nizke vodoprepustnosti plazine se znižanje sukucije v plazu Slano blato odraža z zakasnitvijo, povzročijo pa jo daljša deževna obdobja in ne posamezni padavinski dogodki.

Če primerjamo nihanja vode v vodnjakih in v piezometru za vodnjaki, lahko pridemo do podobnih ugotovitev. Medtem, ko gladine vode v vodnjakih hipno reagirajo na padavine, so piezometrična nihanja komaj zaznavna.

Zaključim lahko, da smo z opravljenimi raziskavami in meritvami uresničili vse cilje, zapisane v predlogu teme te doktorske naloge. Razviti numerični model odlično opiše dogajanja med preiskavami v laboratoriju, znatno slabše pa opisuje dogajanja (rezultate meritev) na plazu. Po naši oceni je to razumljivo, saj je kompleksnost razmer na plazu prevelika, čas opazovanj, ki smo ga imeli na razpolago, pa je bil prekratek, da bi lahko v opazovanja vključili tudi za pobočna premikanja kritična obdobja.

15.1 Predlogi za nadaljnje delo

Naloga je odprla nekaj novih vprašanj in pokazala na pomankanjw nekaterih podatkov. Menimo, da bi morali na plazu nadaljevati z meritvami sukucije in pomikov. V naslednjih letih bomo lahko opazovali, kako v letu 2011 posajena drevesa vplivajo na razvoj in hitrost spreminjanja sukucije.

Ob merskih točkah MS1 in MS2 bi morali v plazino vgraditi piezometre, da bi lahko spremljali, kakšna je soodvisnost sukcije in gladine podzemne vode.

Pokazali smo, da so pomiki plazju Slano blato predvsem posledica izgube stabilnosti in samo v manjši meri posledica lezenja zemljine. Uporabljeni podatki o viskoznosti zemljine so bili izmerjeni v reometru, ki je imel razmik med senzorjema 1.2 mm. V takšnem reometru je možno meriti samo viskoznost finih delcev ob zelo visoki vsebnosti vode. V plazini plazju Slano blato pa je tudi po preperovanju prisoten znaten delež debelih zrn. Zato bi bilo smiselno izmeriti tudi viskoznost naravne plazine, obremenjene z različnimi vertikalnimi obremenitvami. S takšnimi meritvami bi dobili boljše ocene dejanske viskoznosti plazine in natančnejše ocene pomikov plazju.

Za potrebe izračuna gibanja vode v plazini je potrebno ugotoviti vpliv debelejših zrn fliša na površini plazine na dejansko evaporacijo.

V nalogi smo pokazali vpliv sukcije na volumenske spremembe plazine na plazju Slano blato. V nadaljevanju bi bilo smiselno preveriti ali predstavljen model obnašanja zemljine opiše tudi obnašanje drugih tipov zemljin. Z razvitim modelom bi lahko na primer preverili volumensko obnašanje pliocenskih sedimentov na plazovih vzhodne Slovenije ali oligocenske sivice. Za te zemljine bi lahko preverili tudi vplive razbremenitve na generacijo sukcije. S tem pa bi lahko pojasnili ali je sukcija v laporjih samo posledica vzorčenja (razbremenitve), ali jo imajo laporji že v naravnih tleh.

V nadaljnjem razvoju modela bi bilo smiselno preveriti plastifikacijo retencijske krivulje, na katero smo lahko sklepali iz opravljenih meritev, nismo pa je preverili, saj je za obravnavani problem nepomembna. V študiji plastifikacije retencijske krivulje bi bilo potrebno razviti sukcijski edometer, ki bi deloval na principu osmoze in/ali zagotavljanja sukcije z relativno vlago zraka. Takšen edometer bi moral zagotavljati meritve totalne napetosti na območju do 6000 kPa in merjenje sukcije na območju od 100 kPa do 100000 kPa.

Za še boljše razumevanje razvoja deformacij v zemljini bi bilo smiselno opraviti preiskave podobne opravljenim v napravi SESA, a pri različnih razmerjih glavnih napetosti. Te preiskave bi lahko opravili tudi v sukcijski triosni celici. V nalogi smo vse vzorce najprej obremenili s totalnimi napetostmi ob nični sukciji in jim šele nato vsilili sukcijo. Smiselno bi bilo preveriti obnašanje zemljine ob obremenjevanju s sukcijo, ki bi mu sledilo obremenjevanje s totalnimi napetostmi.

Z razvitim programom bi lahko izračunali debelino vadozne cone na površini barjanskih tal. Iz opazovanj namreč vemo, da ima zgornji približno meter debel sloj zemljine visoke nedrenirane strižne trdnosti, temu sloju pa sledi sloj skorajda židke zemljine.

16 POVZETEK

Plaz Slano blato je eden največjih in najstarejših aktivnih zemeljskih plazov v Sloveniji, ki se je nazadnje sprožil novembra 2000 ob neobičajno veliki količini padavin. Pred sanacijo plazu, ki se je pričela v letu 2004, so se pomiki plazu Slano blato delili na splazitve strmih odlomnih robov, plazenje osrednjega dela ter blatne in drobirske tokove v deževnih obdobjih. V suhih obdobjih plaz Slano blato navidezno miruje, površino plazu prekrije suha skorja, ki nakazuje na razvoj sukcije v plazini. Opazovano mirovanje plazu v tem času pa nakazuje na ugodne stabilizacijske lastnosti sukcije. Vseeno pa je hitrost premikov odvisna od številnih vplivnih dejavnikov in je na različnih delih plazu različna.

V nalogi smo raziskovali vpliv sukcije na pomike plazu. Vpliv sukcije na lezenje smo preiskovali na terenu in v laboratoriju. Na osnovi opravljenih laboratorijskih raziskav smo izdelali numerični model gibanja vode na plazu Slano blato in empirični model za napoved hitrosti plazenja. Z numeričnim modelom smo poskušali povezati terenska opazovanja z laboratorijskimi napovedmi.

Leta 2006 so enostavne laboratorijske raziskave pokazale, da sukcija ugodno vpliva na trdnostne karakteristike plazine, v letih 2007 in 2008 pa so bili na plazu vzpostavljeni trije merski profili opremljeni s štirimi Watermark merilniki sukcije. Ta že obstoječ sistem opazovanja plazu smo v letu 2011 nadgradili s šestimi geodetskimi točkami za meritve z GPS merilniki. V obdobju 2011-2012 smo izvedli 4 serije GPS meritev pomikov. Ker sta bili leti 2011 in 2012 izjemo sušni, v času izvajanja GPS opazovanj ni prišlo do večjih pomikov v zgornjem kanalu, zato ni bilo možno povezati pomikov s spremembami sukcije. Opazovanja bo potrebno nadaljevati več let, da bomo lahko prišli do primernih zaključkov.

V laboratoriju smo opravili klasične geotehnične in specifične preiskave, ki smo jih prilagodili ali razvili za potrebe razvoja materialnega modela obnašanja zemljine. V ta namen smo predelali ciklični enostavni strižni aparat (naprava SESA), vpeljali smo meritve z napravo Hyprop za židke gline, pri določitvi meje krčenja pa smo vzorcem določili tudi sukcijo.

Predelani ciklični enostavni strižni aparat omogoča meritve volumenskega obnašanja zemljine in strižne trdnosti ob različnih kombinacijah totalne vertikalne napetosti in sukcije. Iz preiskav volumenskega obnašanja zemljine v napravi SESA pa smo ugotovili vpliv začetne totalne napetosti na obnašanje zemljine med obremenjevanjem s sukcijo. V primeru visokih sukcij smo zaznali bočno stiskanje vzorca. S preiskavami strižne trdnosti smo potrdili ugoden vpliv sukcije na strižno trdnost zemljine. Pri preiskavah strižnega lezenja zemljine v napravi SESA smo ugotovili velik vpliv pojava presežnih pornih tlakov med hipnim obremenjevanjem. Presežni porni tlaki so močno spremenili efektivno napetostno stanje v zemljini in s tem spremenili začetne strižne deformacije. Zaradi dreniranih pogojev preiskav, ki so bili pogojeni s samo izvedbo naprave, nismo mogli izmeriti teh presežnih pornih tlakov. Zaradi velikega raztrosa meritev strižnega lezenja zemljine ne moremo potrditi vpliva stopnje strižne napetosti na hitrost lezenja zemljine. Na podobne težave pri oceni hitrosti lezenja smo pokazali tudi v primeru sekundarne konsolidacije, merjene v edometru.

Na podlagi meritve meje krčenja in preiskav volumenskega obnašanja zemljine v napravi SESA smo ugotovili, da ima zemljina samo eno retencijsko krivuljo v povezavi stopnja zasičenosti - sukcija. Pri

sukcijah manjših od točke vstopa zraka pa volumenske spremembe zemljine zaradi spremembe sukcije ali totalnih napetosti povzročijo odvisnost gravimetrične ali volumetrične vlage od napetostne poti.

S preiskavami meje krčenja smo določili tudi Bishopov parameter popravka efektivne napetosti za vpliv sukcije v nezasičeni zemljini.

Na podlagi rezultatov laboratorijskih preiskav smo ob upoštevanju Bishopovega popravka efektivne napetosti razvili model zemljine, ki temelji na modificiranem Cam clay modelu in upošteva vpliv bočnih deformacij pri visokih sukcijah. Z razvitim modelom smo uspešno simulirali obnašanje zemljine med laboratorijskimi preiskavami.

Materialni model smo vgradili v program, ki omogoča izračun eno dimenzionalnega gibanja vode v zemljini in temelji na metodi končnih diferenc. Z računalniškim programom smo nato uspešno opisali gibanje vode med laboratorijskimi preiskavami. Pri izračunu gibanja vode na plazu pa smo najboljše ujemanje dobili s popravkom evaporacije na 0,325 vrednosti potencialne evaporacije ter z zvišanjem vodoprepustnosti plazine za 50%. Prvi popravek je verjetno potreben zato, ker se na površini plazine nahajajo debelejša zrna fliša, ki preprečujejo izhlapevanje. Za potrditev te trditve pa bodo potrebne nadaljnje preiskave. Dodatno neznanko pri računu gibanja vode predstavlja tudi nepoznavanje tlaka vode na spodnjem robu plazine, saj v plazu ni vgrajenega nobenega piezometra.

Napovedi lezenja zemljine, ki smo jih izmerili v laboratoriju, so vsaj 10x manjše od izmerjenih vrednosti pomikov na plazu Slano blato. Merjene pomike plazu Slano blato lahko pojasnimo z izgubo stabilnosti plazine, ki jo lahko pripišemo povišanim pornim pritiskom na spodnji ploskvi plazine. Zato smo ocenjene vrednosti povišanih pornih pritiskov uporabili v Binghamovem reološkem modelu. Viskoznost, ki je osnovni parameter Binghamovega reološkega modela, smo privzeli iz predhodnih preiskav. Na podlagi opravljenih analiz ocenjujemo, da se plaz Slano blato ne giblje zaradi lezenja zemljine, temveč kot viskozni tok zaradi izgube stabilnosti.

Ključna vloga sukcije v plazini ni njen vpliv na strižno trdnost zemljine ampak njen vpliv na stopnjo zasičenosti oziroma na volumen vode v plazini. Posredno tako sukcija vpliva na hitrost infiltracije vode in s tem na hitrost dvigovanja gladine podzemne vode v plazini. Zaradi nizke vodoprepustnosti plazine se upad sukcije v plazu Slano blato odraža z več dnevno zakasnitvijo, povzročijo pa ga daljša deževna obdobja in ne posamezni večji padavinski dogodki.

17 SUMMARY

Slano blato landslide is one of the oldest and largest active landslides in Slovenia and was retriggered in November 2000 during unusually heavy rain period. Before the rehabilitation of landslide, which began in 2004, the displacements of Slano blato landslide were rotational slips at main scarp, translatory sliding and mudflows in rainy periods. In dry periods, Slano blato landslide seemingly stopped moving and on the surface dry crust appeared, indicating the development of suction. No movements in dry periods proved stabilizing effect of soil suction. However, the rate of movement depends on a number of factors and different parts of the landslide moves with different rate.

In this dissertation effect of suction on the landslide creep was investigated. The positive effect of suction on landslide creep was investigated by field observations and with laboratory investigation. From results of laboratory tests numerical model of water movement on the Slano blato landslide and empirical model to predict the rate of creep were developed. Calculations with the numerical model were compared with field observations.

In 2006, a simple laboratory studies have shown that suction increase shear strength of sliding material and in the years 2007 and 2008 three measurement profiles with four Watermark suction sensors were installed in landslide body. This existing landslide monitoring system has been upgraded with six geodetic points for GPS measurements. Geodetic points were installed in 2011 and in 2011-2012 4 series of GPS measurements were performed. At the time the GPS observations there were no major movements in the upper channel, since the years 2011 and 2012 were dry, and it was not possible to connect the movements with changes of matric suction. Observations should be continued for several years to get suitable conclusions.

In the laboratory classical and special geotechnical investigations were performed. Special geotechnical investigations have been adapted or developed to get real soil behaviour. To do this cyclic simple shear apparatus was modified (SESA apparatus), soft soils were tested with Hyprop device and shrinkage limit procedure was upgraded with suction measurements.

Suction cyclic simple shear apparatus (SESA) allows measurement of volume changes and shear strength of the soil at various combinations of total vertical stress and matric suction. From the investigation of the volume changes in SESA apparatus the influence of total stresses and suction on soil behaviour was observed. In the case of high suction lateral compression of the sample was observed. With the shear strength tests positive effect of matric suction on the shear strength was confirmed. During investigations of shear creep in SESA apparatus the significant influence of excess pore pressures generation during instantaneous loading was detected. Excess pore pressures significantly change the effective stresses in the soil and thus change the initial shear deformation. It is impossible to measure excess pore pressures, due to drained conditions during shearing. And due to the large scatter of soil creep measurements, it is impossible to confirm the influence of the shear stress on the creep rate of the soil.

Based on the shrinkage limit and soil volume behavior in SESA apparatus it can be concluded that there is only one soil water retention curve in relation saturation - suction. When suction is smaller

than air entry point volumetric due to suction or total stresses cause a dependence of gravimetric or volumetric water content on the stress path.

With shrinkage limit investigation a Bishop correction parameter of the effective stress due to suction in unsaturated soil was determined.

From the laboratory investigations and with Bishop correction of the effective stresses a new material model was developed based on modified Cam-Clay model. The material model incorporates the lateral compression at high suctions. With the developed model, we have successfully simulated the soil behaviour during laboratory tests.

Material model has been integrated into the computer program, which allows calculation of one dimensional water flow and is based on the finite difference method. The computer program was then used to describe the water flow during the laboratory tests. In the calculation of water flow in the field conditions it was found that the evaporation should be decreased to 0,325 of potential evaporation and water permeability should be increasing 50%. The first adjustment is probably needed due to large flysch particles lying on the landslide surface. These particles decrease exposed soil surface and thus decrease evaporation. For confirmation of this effect further investigation will be required. In uncertainty are due to unknown pore pressure at the landslide base, because there are piezometers.

Predictions of soil creep, which were measured in the laboratory, are at least 10 times smaller than the measured movements of Slano blato landslide. Measured displacements can be explained by the loss of stability, which can be result of increased pore pressure at the sliding surface. Therefore, we estimated the value of elevated pore pressures used in the Bingham rheological model. Viscosity, which is the basic parameter of Bingham rheological model, we assumed from previous investigations.

The key role of suction is not the increased shear strength but its influence on the soil saturation or volume of water in landslide body. Matric suction indirectly effect the rate of water infiltration and thus the increase of ground water table. Due to the low water permeability of sliding material, the reduction of suction in Slano blato landslide reflects by multiple day delay and the reduction of suction is not caused by a single major precipitation event, but by prolonged rainy period.

VIRI

- Agus, S. S., Schanz, T. 2007. Errors in Total Suction Measurements. v: Schanz, T. (ur.). *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Heidelberg, Springer: 59-70.
- Aitchison, G. D. 1965. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*. Sydney, Butterworths: 278
- Allen, R., Pereira, R., Raes, D., M., S. 1998. Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rim.
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents> (3.10.2012).
- Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique* 40, 3: 405-430.
- Arya, L. M., Paris, J. F. 1981. A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal* 45, 6: 1023-1030.
- Assouline, S. 2001. A model for soil relative hydraulic conductivity based on the water retention characteristic curve. *Water Resources Research* 37, 2: 265-271.
- Bardner, L. 1965. Consolidation of compacted and unsaturated clays. *Geotechnique* 15, 3: 267-286.
- Barnes, H., Hutton, J., Walters, K., 1989. *An introduction to rheology*. Amsterdam, Elsevier: 202.
- Benko, I. 2011. Zgodovinski pregled intervencij na plazu Slano blato. v: Petkovšek, A. (ur.), Klopčič, J. (ur), *Zbornik referatov 12. Šukljetovi dni, Ajdovščina, 30. september 2011*. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 53-63.
- Biavati, G., Godt, J. W., McKenna, J. 2006. Drainage effects on transient, near surface hydrologic response of a steep hillslope to rainfall: implications for slope stability, Edmonds, Washington, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 3:343-355.
- Bicalho, K., Znidarcic, D. 2002. Soil-water characteristic curve of quasi-saturated compacted soil. v: Juca, J.F.T. (ur.), de Campos, T. M. P. (ur.), Marinho, F. A. M. (ur.). *Unsaturated Soils (Volume 3): Proceedings of the 3rd International on Unsaturated soils*. Rotterdam, Balkema: 227-281.
- Birle, E., Heyer, D., Vogt, N. 2008. Influence of the initial water content and dry density on the soil-water retention curve and the shrinkage behavior of a compacted clay. *Acta Geotechnica* 3, 3:191-200.
- Bishop, A. W. 1959. The principle of effective stress. *Teknisk ukeblad* 106, 39: 859-863.
- Bishop, A. W. 1960. Discussion. v: *Conference on pore pressure and suction in soils*. London, Butterworths:63-66.
- Bjerrum, L. 1967. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Geotechnique* 17, 2: 83-118.

- Blatz, J. A., Cui, Y.-J., Oldecop, L. 2008. Vapour Equilibrium and Osmotic Technique for Suction Control. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 6: 661-673.
- Blight, E. G. 1971. Flow of air through soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93, 4: 607-624.
- Brooks, R. H., Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers* 3, Fort Collins, Colorado State University: 27.
- Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture, *Bulletin* 38. USDA, Bureau of Soils, Washington DC.
- Bulut, R., Leong, E. C. 2008. Indirect Measurement of Suction. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 6: 633-644.
- Burdine, N. T. 1953. Relative permeability calculation from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology* 5, 3: 71-78.
- Campbell, G. S. 1985. *Soil physics with BASIC*. New York, Elsevier: 150.
- Campbell, G. S., Smith, D. M., Teare, B. T. 2007. Application of a Dew Point Method to Obtain the Soil Water Characteristic. v: Schanz, T. (ur.). *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Heidelberg, Springer: 71-77.
- Carman, P. C. 1938. The determination of the specific surface of powders. *J. Soc. Chem. Ind. Trans.* (57): 225.
- Carman, P. C. 1956. *Flow of gases through porous media*. London: Butterworths: 182.
- Casini, F., Vassallo, R., Mancuso, C., Desideri, A. 2007. Interpretation of the Behaviour of Compacted Soils Using Cam-Clay Extended to Unsaturated Conditions. V: Schanz, T. (ur.). *Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics*. Heidelberg, Springer: 29-36.
- Casini, F., Vassallo, R., Mancuso, C., Desideri, A., 2008. Application to a compacted soil of a Cam Clay model extended to unsaturated conditions. V: Toll, D. G. (ur.), Augarde, C.E. (ur.), Gallipoli, D. (ur.), Wheeler, S.J. (ur.). *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*. London, Taylor & Francis: 609-615.
- Cedergren, H. 1989. *Seepage, Drainage and Flownets*; 2nd edition. New York, Wiley: 496.
- Chen, H. L. C. 2002. Runout Analysis of Slurry Flows with Bingham Model. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 128, 12: 1032-1042.
- Chen, H., Lee, C. F., Law, K. 2004. Causative Mechanisms of Rainfall-Induced Fill Slope Failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, 6: 593-602.
- Childs, E. C. 1969. *An introduction to the Physical Basis of soil water phenomena*. London, Wiley-Interscience: 493.

- Cho, G. C., Santamarina, J. C. 2001. Unsaturated particulate materials - particle-level studies. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127, 1: 84-96.
- Coleman, J. D. 1962. Stress/strain relations for partly saturated soils. *Geotechnique* 12, 4: 348-350.
- Collins, B. D., Znidarcic, D. 2004. Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering* 130, 4: 362-372.
- Corey, A. T. 1954. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. *Producer's monthly* 19, 1: 38-41.
- Corey, A. T. 1977. *Mechanics of heterogeneous fluids in porous media*. Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications: 259.
- Croney, D., Coleman, J. D., Black, W. P. M. 1958. Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. v: *Water and its conduction in soils (highway res. board, special report)*:226-252.
- Crosta, G., Frattini, P. 2003. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 1: 81-93.
- de Campos, T. M. P., Andrade, M. H. N., Vargas, E. A. 1991. Unsaturated colluvium over rock slide in forested site in Rio de Janeiro, Brazil. v: *Proceedings 6th International Symposium on Landslides Rotterdam, Balkema*: 1357-1364.
- Delage, P., Romeo, E., Tarantino, A., 2008. Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils. *Durham, CRC Press*: 33-52.
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0810/0810.3221.pdf> (15.3.2012).
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* 30, 2:211-223.
- Fifer Bizjak, K., Zupančič, A. 2009. Site and laboratory investigation of the Slano blato landslide. *Engineering Geology* 105, 3-4: 171-185.
- Fredlund, D. G. 1995. The stability of slopes with negative pore water pressures. *Clayton, Monash university*: 99-116.
<http://www.soilvision.com/subdomains/unsaturatedsoil.com/Docs/Research%20Papers/1995/Conference%20Papers/The%20stability%20of%20slopes%20with%20negative%20pore-water%20pressures.pdf> (4.5.2011).
- Fredlund, D. G., Fredlund, M. G., Wilson, G. W. 1997. Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve from Grain-Size Distribution Curve: 13-23.
<http://www.soilvision.com/subdomains/unsaturatedsoil.com/Docs/Research%20Papers/1997/Conference%20Papers/Prediction%20of%20the%20soil-water%20characteristic%20curve%20from%20grain-size%20distribution%20and%20volume-mass%20properties.pdf> (4.5.2011).
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. 1976. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal* 13, 3: 291-276.

- Fredlund, D. G., Morgenstern N. R. 1977. Stress state variables in for unsaturated soils. *Journal Geotechnical Engineering Division* 103: 447-466.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, Wiley: 544
- Fredlund, D. G., Sheng, D., Zhao, J. 2011. Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 48, 2: 186–198.
- Fredlund, D. G., Xing, A., 1994. Equations for the Soil–Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31, 3: 521–532.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D., Barbour, S. L. 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal* 32, 1: 40-48.
- Fredund, D. G. 1979. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal* 16, 1: 121-139.
- Gallage, C. P. K., Uchimura, T. 2010. Effects of dry density and grai size distribution on soil water characteristic curves of sandy soils. *Soils and foundaions* 50, 1: 161-172.
- Ganjian, N., Pisheh, Y. P., Hosseini, S. M. M. M., 2007. Prediction of Soil–Water Characteristic Curve Based on Soil Index Properties. v: Schanz, T. (ur.). *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Heidelberg, Springer: 355-367.
- Gardner, W. R. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil sience* 85: 228-232.
- Garrat, J. R. 1994. *The atmospheric boundary layer*. Cambridge, Cambridge university press: 336.
- Godt, J., Baum, R. L., Lu, N. 2009. Landsliding in partially saturated materials. *Geophysical research letters* 36: 1-5.
- Goulding, R. B. 2006. Tensile strength, shear strenth and effective for unsaturated soils, PhD thesis. s.l., University of Missouri – Columbia: 213
<https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/4364/research.pdf?sequence=3>
(23.2.2012).
- Gutierrez, M., Wang, J., Yoshimine, M. 2009. Modeling of the simple shear deformation of sand: effects of principal stress rotation. *Acta Geotechnica* 4, 3: 193-201.
- Haines, W. B. 1930. Studies in the physical properties of soil. V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith. *Journal of Agricultural Science* 20: 97–116.
- Havel, F. 2004. Creep in soft soils, PhD. dissertation. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, The Faculty of Engineering Science and Technology: 192.

Hilf, J. W. 1956. An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph. D. Thesis. s.l., United State Department of the Interior Bureau of Reclamation: 218.

Hillel, D. 1980. Applications of soil physics. New York, Academic Press: 385.

Holmes, R. 1961. Estimation of soil moisture content using evaporation data. v: Proceedings of Hydrology Symposium, No. 2 Evaporation: 184-196.

Houston, S. L., Perez-Gracia, N., Houston, W. N. 2008. Shear Strength and Shear-Induced Volume Change Behavior of Unsaturated Soils from a Triaxial Test Program. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 134, 11: 1619-1632.

Hoyos, L. R., Laloui, L., Vassallo, R. 2009. Mechanical testing in unsaturated soils. v: Tarantino, A. (ur.), Romero, E. (ur.), Cui, Y.-J. (ur.). Laboratory and field testing of unsaturated soils. Heidelberg, Springer: 63-78.

Huvaj-Sarihan, N. 2009. Creep movements of reactivated landslides. v: Baligh, F. (ur.). Proceedings of the fourth International Young Geotechnical Engineers Conference : Alexandria 3rd - 6th October 2009. s. l.: The Egyptian Geotechnical Society: 179-182.

Jennings, J. E., Burland, J. B. 1962. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. Geotechnique 12, 2: 125-144.

Johnson, K. A., Sitar, N. 1990. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. Canadian Geotechnical Journal 27, 6: 789-801.

Kawai, K., Karube, D., Kato, S. 2000. The Model of Water Retention Curve Considering Effects of Void Ratio. V: Raharjo, H. (ur.), Toll, D. G. (ur.), Leong, E. C. (ur.). Unsaturated Soils for Asia: Proceedings of the Asian Conference, UNSAT-ASIA 2000, Singapore, 18-19 May 2000. Rotterdam, Balkema: 329-334.

Kim, T. H., 2001. Moisture-induced tensile strength and cohesion in sand, PhD. dissertation. Boulder, Univ. of Colorado at Boulder: 150.

Kladnik, R., 1989. Osnove fizike 1. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 197-208

Kočevar, M., Ribičič, M. 2002. Geološke, hidrogeološke in geomehanske raziskave plazu Slano blato. Geologija 45, 2: 427-432.

Kočevar, M., Ribičič, M. 2002. Plaz Slano blato nad Lokavcem pri Ajdovščini. Ujma 15: 122-129.

Kogoj, D. Kosmatin Fras, M. Grigillo, D. Ribičič, M. Ambrožič, T. Marjetič, A. Gvozdanovič, T. Smole, D. Ranfl, U. Krivec, M. Vezočnik, R. Balon, M. 2007. Raziskovalno razvojni projekt CRP »Znanje za varnost in mir 2006-2010« Mobilna enota za hitri zajem prostorskih podatkov v primeru zemeljskih plazov; Priloga 2; Geopodatki; 4. delno poročilo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 85.

Kozeny, J., 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber Akad. Wiss. 136, 2a: 271.

- Krauskopf, K. B., Bird, D. K. 1995. Introduction to geochemistry. New York: McGraw-Hill: 640.
- Lahomme, J.-P., 1997. Towards a rational definition of potential evaporation. *Hydrology and Earth Sytem Sciences* 1, 2: 257-264.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. 1979. Soil Mechanics. New York, Wiley: 553.
- Lapanje, A., Prestor, J., Budkovič, T., Herič, J., Hoetzi, M. 2001. Končno poročilo o opravljenih hidrogeoloških raziskavah na območju plazu Slano blato nad Lokavcem; K-II-30d/c-1/1107, Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- Lazarini, F., Brenčič, J. 1989. Splošna in anorganska kemija. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 557.
- Leij, F. J., Russell, W. B., Lesch, S. M. 1997. Closed form expressions for water retention and conductivity data. *Ground water* 35, 5: 848-858.
- Liakopoulos, A. C. 1965. Theoretical solutions of the unsteady unsaturated flow problems in soils. *Bulletin - International Association of Scientific Hydrology* 10, 1: 5-39.
- Lins, Y., Schanz, T., Fredlund, D. G. 2009. Modified Pressure Plate Apparatus and Column Testing Device for Measuring SWCC of Sand. *Geotechnical Testing Journal* 32, 5: 1-15.
- Lloret, A., Alonso, E. E. 1980. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Geotechnique* 40, 3: 449-477.
- Lloret, A., Alonso, E. E. 1985. Statue surfaces for partially saturated soils. v: Proceedings of the 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering - San Francisco, 12-16 August 1985 (volume 2). London, Taylor & Francis: 557-562.
- Logar, J. Fifer Bizjak, K. Kočevar, M., Mikoš, M., Ribičič, M., Majes, B. 2005. History and present state of the Slano Blato landslide. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 3: 447-457.
- Lucker, L., van Genuchten, M. T., Neilsen, D. R. 1989. A consistent set of parametric models for flow of water and air immiscible fluids in the sub surface. *Water Resources Research* 25, 10: 2187-2189.
- Lu, N., Godt, J. 2008. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions, W11404. *Water resources resaearch* 44, 11: 1-13.
- Lu, N., Likos, W. J. 2006. Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 132, 2: 131-142.
- Lu, N., Wu, B., Tan, C. P. 2007. Tensile Strength Characteristics of Unsaturated Sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 133, 2: 144-154.
- Maček, M. 2006. Sukcija zemljin, Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Maček): 68.

Majes, B., Petkovšek, A., Logar, J. 2002. Primerjava materialnih lastnosti drobirskih tokov iz plazov Stože, Slano blato in Strug. *Geologija* 45, 2: 457–463.

Majes, B. 2005. Izvajanje postopne sanacije velikih plazov v Sloveniji, v: Macuh, B. (ur.), *Zbornik referatov*, 6. Šukletovi dnevi, Rogaška Slatina, 21. oktober 2005: 17-38

Marinho, F. A. M., Chandler, R. J. 1994. On the relationship between suction and degree of saturation of soils. 37-44.

<http://usp-br.academia.edu/FernandoMarinho/Papers/120087/>

On_the_relationship_between_suction_and_degree_of_saturation_of_soils (12.5.2010)

Marinho, F. A. M., Take, A., Tarantino, A. 2008. Measurement of Matric Suction Using Tensiometric and Axis Translation Techniques. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 6: 615–631.

Marshall, T., Holmes, J. W. 1988. *Soil physics*. Cambridge, Cambridge University Press: 374.

Maslov, N., 1968. Long-term stability and displacements of retaining structures. *Energiya*, Moskva: 160.

Matyas, E. L., Radhakrishna, H. S. 1968. Volume change characteristics of partly saturated soils. *Geotechnique* 18, 4: 432-448.

Meisina, C. 2006. Characterisation of weathered clayey soils responsible for shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 5: 825-838.

Melinda, F., Rahardjo, H., Leong, E. C. 2004. Shear strength of compacted soil under infiltration conditions. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 121, 11: 807-817.

Meschyán, S. 1995. *Experimental rheology of clayey soils (Geotechnika)* Rotterdam, Balkema: 448.

Meschyán, S. 2005. Shear creep of clayey soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 42, 5: 195-200.

Meschyán, S. 2006. Law governing shear - induced creep of clayey soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 43, 5: 168-175.

Michaels, A. S., Lin, C. S. 1954. The permeability of kaolinite. *Industrial and engineering chemistry* 46, 6: 1239-1246.

Mikoš, M. 2000. Izrazje na podočju erozijskih pojavov. *Gradbeni vestnik* 49: 101-128.

Mitchell, J. K. 1993. *Fundamentals of Soil behaviour*, 2. edition. New York, Wiley: 437

Monteith, J. L., 1965. Evaporation and the environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19 : 205-224.

Montrasio, L., Valentino, R. 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8, 5: 1149-1159.

- Montrasio, L., Valentino, R., Losi, G. L. 2009. Rainfall-induced shallow landslides: a model for the triggering mechanism of some case studies in Northern Italy. *Landslide* 6, 3: 241-251.
- Morgenstern, N. R. 1979. Properties of compacted soils. Proceedings of the 6th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Contribution to the Panel Discussion Session IV, Lima, Peru, Vol. 3: 349-354.
- Morton, F. I. 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology* 66, 1-4: 1-76
- Mualem, Y. 1976. A new model of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research* 12, 3: 513-522.
- Muntohar, A. S., Liao, H.-J. 2010. Rainfall infiltration: infinite slope model for landslides triggering by rainstorm. *Nat Hazards* 54, 3: 967-984.
- Nash, J. E. 1989. Potential evapotranspiration and 'the complementary relationship'. *Journal of Hydrology* 111, 1-4: 1-7.
- Ng, C. W. W., Springman, S. M., Alonso, E. E. 2008. Monitoring the Performance of Unsaturated Soil Slopes. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 6: 799-816.
- Ng, C. W. W., Zhan, L. T., Bao, C. G., Fredlund, D. G., Geong, B. W. 2003. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration. *Geotechnique* 53, 2: 143-157.
- Nuth, M., Laloui, L. 2008. Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils. *Computers and Geotechnics* 35, 6: 835-844.
- Or, D., Tuller, M. 1999. Liquid retention and interfacial area in variably saturated porous media: Upscaling from single-pore to sample-scale model. *Water resources research* 35, 12: 3591-3605.
- Penmann, H. 1956. Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 1: 9-29.
- Penmann, H. L., 1963. *Vegetation and Hydrology*. Harpenden, Commonwealth bureau of soils: 124
- Peters, A., Durner, W. 2008. Simplified Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties. *Journal of Hydrology* 356, 1-2: 147-162.
- Peterson, R. W. 1988. Interpretation of triaxial compression test results on partially saturated soils. *Advanced triaxial testing of soil and rock*. ASTM special technical publication 977: 512-538.
- Petkovšek, A., 2006. Vpliv matrične sukcije na trdnostno deformacijske lastnosti zemljin, Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Petkovšek): 213.

Petkovšek, A., Maček, M., Kočevar, M., Benko, I., Majes, B. 2009. Soil matric suction as an indicator of the mud flow occurrence v: Hamza, M. (ur.). Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Amsterdam, IOS Press: 1855-1860

Pierson, C. T., Costa, E. J. 1987. A rheologic classification of subareal sediment-water flows. Reviews in Engineering Geology 7: 1-12.

Placer, L., Jež, J., Atanackov, J. 2008. Strukturni pogled na plaz Slano blato. Geologija 51, 2: 229-234.

Rahardjo, H., Fredlund, D. G., 1995. Procedures for slope stability analyses involving unsaturated soils.

<http://www.soilvision.com/subdomains/unsaturatedsoil.com/Docs/Research%20Papers/1995/Conference%20Papers/Procedures%20for%20slope%20stability%20analyses%20involving%20unsaturated%20soils.pdf> (1.10.2012).

Rahardjo, H., Li, X., Toll, D., Leong, G. 2001. The effect of antecedent rainfall on slope stability. Geotechnical and Geological Engineering 19, 3-4: 371-399.

Rahardjo, H., Ong, T., Rezaur, R. B., Leong, E. C. 2007. Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133, 12: 1532-1543.

Rahimi, A., Rahardjo, H., Leong, E.-C., 2011. Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall-Induced Slope Failure. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 137, 5:483-491.

Rajšp, V., Ficko, M. 1997. Slovenija na vojaškem zemljevidu 1763-1787, 3. zvezek. Ljubljana, Založba ZRC: 436.

Reddi, L. N. 2003. Seepage in soils, principles and applications. New York, Wiley: 416.

Ribičič, M. 2002. Inženirska geologija I : skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta.

Ribičič, M. 2002. Izračun volumnov in sanacija plaz Slano blato nad Loakvcem pri Ajdovščini. Ujma 16: 335-345.

Richards, L. A., 1928. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. Journal of Agricultural Research 37, 12: 719-742.

Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. Journal of Applied Physics 1, 5: 318-333.

Richards, L., Ogata, G. 1958. A thermocouple for vapor pressure measurement in biological and soil systems at high humidity. Science 128: 1089-1090.

Ridley, A. M., 1993. The measurement of soil moisture suction, PhD thesis. London, University of London.

- Romeo, E., Simms, P. H. 2008. Microstructure Investigation in Unsaturated Soils A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 6: 705-727.
- Romero, E., Della Vecchia, G., Jommi, C. 2011. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Geotechnique* 61, 4: 313–328.
- Roscoe, K., Burland, J. 1968. On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. v: Heyman, J. (ur.), Leckie, F. A. (ur.). *Engineering plasticity*. Cambridge, Cambridge University Press: 535-609.
- Rosenberg, N., Blad, B. L., Verma, S. B. 1983. *Microclimate: The biological environment*. New York: John Wiley: 528.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., Wang, Y. H., Prencke, E. 2002. Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal* 39, 2: 233-241.
- Schelle, H., Iden, S., Peters, A., Durner, W., 2010. Analysis of the agreement of soil hydraulic properties obtained from multistep-outflow and evaporation methods. *Vadose Zone Journal* 9, 4: 1080-1091.
- Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., Müller, L., Wieland, R. 2010. The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 4: 563–572.
- Schindler, U., Müller, L. 2006. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 5: 623-629.
- Schofield, A. N., Wroth, C. P. 1968. *Critical state soil mechanics*. New York, McGraw-Hill: 310.
- Schubert, H. 1975. Tensile strength of agglomerates. *Powder Technology* 11, 2:107–119.
- Schulz, W. H., McKenna, J. P., Kibler, J. D., Biavati, G. 2009. Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide—evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion?. *Landslides* 6, 3: 181–190.
- Segalini, A., Giani, G. P., Ferrero, A. M. 2009. Geomechanical studies on slow slope movements in Parma Apennine. *Engineering Geology* 109, 1: 31–44.
- Maidment, D. 1993. *Handbook of hydrology*. New York, McGraw-Hill: 1424
- Sillers, W. S., Fredlund, D. G., Zakerzadeh, N. 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and geological engineering* 19, 3-4: 243-283.
- Skaberne, D. 2001. Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj-pobočnega transporta. *Geologija* 44, 1: 89-100.
- Spanner, D. C. 1951. The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *Journal of Experimental Botany* 2, 2: 145–168.

Springman, S., Kienzler, P., Casini, F., Askarinejad, A. 2009. Landslide triggering experiment in a steep forested slope in Switzerland. v: Hamza, M. (ur.). Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Amsterdam, IOS Press: 1698-1701.

Springman, S., 2011. Simple slope stability analyses while considering unsaturated behaviour/response. v: Petkovšek, A. (ur.), Klopčič, J. (ur), Zbornik referatov 12. Šukljetovi dni, Ajdovščina, 30. september 2011. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 5-35.

Šuklje, L. 1969. Soil Mechanics. London, Wiley: 571.

Taek Oh, W., Garga, V. K., Vanapalli, S. K. 2008. Shear strength characteristics of statically compacted unsaturated kaolin. Canadian geotechnical journal 45, 7: 910-922.

Talebi, A., Uijlenhoet, R., Troch, P. 2007. Soil moisture storage and hillslope stability. Natural Hazards and Earth System Sciences 7, 5: 523-534.

Tamagnini, R. 2004. An extended Cam-clay model for unsaturated soils with hydraulic hysteresis. Geotechnique 54, 3: 223-228.

Tarantino, A., Ridley, A. M., Toll D. G. 2008. Field Measurement of Suction, Water Content, and Water Permeability. Geotechnical and Geological Engineering 26, 6: 751-782.

Taylor, D. W. 1948. Fundamentals of soil mechanics. New York, Wiley: 700.

Thakur, S. V. K., Sreedeeep, S., Singh, D. N. 2006. Evaluation of Various Pedo-Transfer Functions for Developing Soil-Water Characteristic Curve of a Silty Soil. Geotechnical Testing Journal 30, 1: 1-6.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38, 1: 55-94.

Tofani, V., Dapporto, S., Vannocci, P., Casagli, N. 2006. Infiltration, seepage and slope instability mechanisms during the 20–21 November 2000 rainstorm in Tuscany, central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences 6, 6: 1025–1033.

Tohari, A., Nishigaki, M., Komatsu, M. 2007. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement. Journal Geotechnical and Geoenvironmental engineering 133, 5: 575-587.

Toll, D. G. 2000. The influence of fabric on the shear behaviour of unsaturated compacted soils. Geotechnical special publications 99: 222-234.

van Asch, T. W. J., Malet, J.-P. 2009. Flow-type failures in fine-grained soils: an important aspect in landslide hazard analysis. Natural Hazards and Earth System Sciences 9, 6:1703-1711.

van Asch, T. W. J., Malet, J.-P., Bogaard, T. A. 2009. The effect of groundwater fluctuations on the velocity pattern of slow-moving landslide. Natural Hazards and Earth System Sciences 9, 3:739-749.

van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44, 5: 892-898.

- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G. 2000. Comparison of different procedure to predict unsaturated soil shear strength. *Geotechnical Special Publication 99*: 195–209.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. 1999. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique 49*, 2: 143-159.
- Vanapalli, S. K., Nicotera, M. V., Sharma, R. S., 2008. Axis Translation and Negative Water Column Techniques for Suction Control. V: *Laboratory and field testing of unsaturated soils*. Heidelberg, Springer: 33-48.
- Vanapalli, S. K., Sillers, W. S., Fredlund, D. G. 1998. The Meaning and Relevance of Residual state to Unsaturated Soils. v: *Proceedings of 51st Canadian Geotechnical Conference*: 1-8.
http://by.genie.uottawa.ca/~vanapall/papers/conference/1998/cgs98_residual.pdf (8.3.2011).
- Visser, W. C. 1969. An empirical expression for the desorption curve. v: Rijtema, P. E. (ur.), Wassink, H. (ur.). *Water in the unsaturated zone: proceedings of the Wageningen Symposium*: 329–335.
- Walker, S. C., Gallipoli, D., Toll, D. G. 2005. The effect of structure on the water retention of soil tested using different methods of suction measurement. v: Tarantino, A. (ur.), Romero, E. (ur.), Cui, Y.J. (ur.). *Conference on Advances Experimental Unsaturated Soil Mechanics, 27 - 29 June 2005, Trento, Italy*. London, Taylor & Francis Group: 33-43.
- Waltham, T. 2002. *Foundations of Engineering Geology*. London, Spon press: 92.
- Wang, S., Yin, Q., 2009. Unsaturated Creep Test and Modeling of Soils from the Sliding Zone of the Qianjiangping Landslide in the Three Gorges Area, China. v: Wang, F. (ur.), Li, T. (ur.) *Landslide Disaster Mitigation in Three Gorges Reservoir, China*. Heidelberg, Springer: 243-256.
- Wilson, G. W., Fredlund, D. G., Barbour, S. L. 1997. The effect of soil suction on evaporite fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal 34*, 1: 145-155.
- Zapata, C. E., Houston, W. N., Houston, S. L., Walsh, K. D. 2000. Soil-water characteristic curve variability. *Geotechnical Special Publication 99*: 84–124.
- Zhou, J., Yu, J.-I. 2005. Influences affecting the soil-water characteristic curve. *Journal of Zhejiang University SCIENCE 6A*, 8: 797-804.
- Znidarčič, D., 2007. Soil and water: the essence of soil mechanics. *Zbornik 8. Šukljetovih dni*, Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 3-21.