

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Matej Maček

Sukcija zemljin

Diplomska naloga št.: 2914

Mentor:

prof. dr. Bojan Majes

Somentor:

viš. pred. dr. Ana Petkovšek

Ljubljana, 23. 10. 2006

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATEJ MAČEK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»**SUKCIJA ZEMLJIN**«.

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

Ljubljana, 4. oktober 2006

podpis

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.131.5(043.2)

Avtor: Matej Maček
Mentor: izr. prof. dr. Bojan Majes
Somentor: viš. pred. mag. Ana Petkovšek
Naslov: Sukcija zemljin
Obseg in oprema: 68 str., 9 pregl., 50 sl., 42 en.
Ključne besede: mehanika zemljin, nezasičene zemljine, laboratorijske preiskave

POVZETEK

Sukcija je tlak vode v porah nezasičene zemljine in ima velik vpliv na ostale lastnosti nezasičenih zemljin. V diplomski nalogi so predstavljene meritve sukcije na štirih materialih: kameni moki, bentonitu, sivici iz predora Ljubno in flišu iz plazu Slano blato. Meritve so bile opravljene na rahlem in zbitem material pri različnih vlagah in sicer s štirimi različnimi metodami merjenja sukcije. Sukcijo smo merili s tlačnim loncem, tenziometrom, filter papirjem in potenciometrom ter rahlemu materialu določili vodovpojnost. Na podlagi dobljenih rezultatov smo za našete materiale izrisali retenzijske krivulje z uporabo štirih različnih modelov.

Praktična uporaba sukcije v geotehniko je bila prikazana na edometriškem testu v fazi zalitja sivice. Na danem primeru smo tako opazovali časovni razvoj nabrekanja in ga primerjali z izračunanim.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.131.5(043.2)

Author: Matej Maček
Assoc. Supervisor: Prof. dr. Bojan Majes
Co. Supervisor: Sen. Lect. mag. Ana Petkovšek
Title: Soil suction
Notes: 68 p., 9 tab., 50 fig., 42 eq.
Key words: soil-mechanics, unsaturated soil, laboratory test

SUMMARY

Suction is pore water pressure in unsaturated soils and influences other soil characteristics. Suction measurements for 4 different soils (bentonite, stone flour, gray clay “sivica” and brown clay “flysch”) are presented. Measurements were performed on compacted and loose material at different water contents using 4 different methods: WP4 dewpoint potentiometer, filter paper, tenziometer and pressure plate apparatus. Additionally the water adsorption was determined for loose materials. Results were interpreted using 4 models describing SWCC.

To describe the practical use of soil suction in geotechnical engineering the oedometer test of “sivica” clay with wetting of the sample. For the given case the time relation of heaving was compared to the calculated heave.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Bojanu Majesu in somentorici viš. pred. mag. Ani Petkovšek. Zahvaljujem se tudi Vanji Selan in Miranu Mercu za pomoč in nasvete pri laboratorijski preiskavi, Biotehniški fakulteti za meritve s tlačim loncem ter vsem ostalim, ki so kakor koli prispevali k nastanku te diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi svojim staršem, ki sta me skozi življenje usmerjala, pomagala ter podpirala na moji začrtani poti.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETSKO OZADJE	2
2.1	Osnovni pojmi	2
2.2	Osnove sukcije	3
2.3	Pojavi, ki povzročijo sukcijo	6
2.3.1	Adsorpcija vode in raztopine v vodi	6
2.3.2	Kapilarni učinek	8
2.4	Vrste potencialov	12
2.4.1	Celotni potencial Φ	12
2.4.2	Tlačni potencial P	12
2.4.3	Matrični potencial Ψ	12
2.4.4	Osmotski potencial Π	13
2.4.5	Gravitacijski potencial Z	13
2.4.6	Kombinacije potencialov	13
2.5	Enote in njihova pretvorba	13
2.6	Principi merjenja sukcije	14
2.6.1	Direktno s pomočjo tlakov	14
2.6.1.1	Princip tenziometera	14
2.6.1.2	S podtlakom	15
2.6.1.3	S tlakom	15
2.6.2	Primerjalno merjenje sukcije	16
2.6.2.1	S pomočjo poroznih materialov	16
2.6.2.2	Na princip vlage v zraku	16
2.7	Retenzijska krivulja - »SWCC«	19
2.8	Povezava sukcije z drugimi karakteristikami zemljin	21
2.8.1	Vpliv na trdnost zemljin	22

2.8.2	Obtežba in sukcija gline	23
2.8.3	Prepustnost zemljin	23
2.8.4	V agronomiji	25
3	METODE MERJENJA SUKCIJE	26
3.1	Uvod	26
3.2	Opisi naprav in preiskav	27
3.2.1	Palični tenziometer	27
3.2.1.1	Opis naprave in princip meritve	27
3.2.1.2	Opis meritev s tenziometrom	28
3.2.1.2.1	Priprava tenziometra	28
3.2.1.2.2	Meritev s tenziometrom	29
3.2.2	Metoda s filter papirjem	29
3.2.2.1	Opis naprave in princip meritve	29
3.2.2.2	Opis meritev	30
3.2.2.2.1	Kalibracija filter papirja	30
3.2.2.2.2	Postopek priprave vzorca	31
3.2.2.2.3	Meritev vlage filter papirja	32
3.2.3	Tlačni lonec	33
3.2.3.1	Opis naprave in princip meritve	33
3.2.3.2	Opis meritev	34
3.2.3.2.1	Priprava vzorca	34
3.2.3.2.2	Meritev	34
3.2.4	Meritev vodovpojnosti – Enslin/Neff postopek	35
3.2.4.1	Opis naprave in princip meritve	35
3.2.4.2	Opis meritev	36
3.2.4.2.1	Priprava vzorca	36
3.2.4.2.2	Priprava aparata	36
3.2.4.2.3	Meritev	37
3.2.5	Potenciometer	37
3.2.5.1	Opis naprave in princip meritve	37

3.2.5.2	Opis meritev	38
3.2.5.2.1	Priprava vzorca	38
3.2.5.2.2	Priprava naprave	38
3.2.5.2.3	Meritev	39
3.3	Praktično delo	39
3.3.1	Prilagajanje meritve	39
4	REZULTATI MERITEV	42
4.1	Merske napake	42
4.2	Opravljene meritve	43
4.2.1	Kamena moka	44
4.2.2	Bentonit	45
4.2.3	Fliš	46
4.2.4	Sivica	47
5	ANALIZE MERITEV	49
5.1	Primerjava s podatki iz zunanjih virov	49
5.2	Medsebojna primerjava meritev na različnih materialih	51
5.3	Primerjava rezultatov merjenih s filter papirjem in s potenciometrom	52
5.4	Primerjava funkcij retenzijskih krivulj	53
5.5	Primerjava metod	56
6	PRAKTIČNI PRIMER UPORABE	57
6.1	Uvod	57
6.2	Izračun	57
6.3	Predstavitev rezultatov	59
6.4	Vpliv manjše spremembe parametrov	61
6.5	Izračun za sivico iz vrtine LP-8	62

6.6	Dogajanje v vzorcu	62
7	ZAKLJUČEK	65
VIRI	66	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Podatki o specifični površini in katjonski izmenjevalni kapaciteti za glinene materiale (Chen, 1975)	7
Preglednica 2: Površinska napetost v odvisnosti od temperature (Marshall in Holmes, 1988)	10
Preglednica 3: Sukcije v značilnih točkah s pretvorbo med enotami (Marshall in Holmes, 1988)	14
Preglednica 4: Pregled uporabljenih merskih metod z osnovnimi podatki (v oklepaju lastna opazovanja).	26
Preglednica 5: Vrednosti osmotskih potencialov raztopin (ASTM standard D 5298-94)	31
Preglednica 6: Osnovne lastnosti materialov	51
Preglednica 7: Primerjava naprav za merjenje sukcije	56
Preglednica 8: Vstopni podatki v program	59
Preglednica 9: Vstopni podatki v program s spremenjenimi oblikovnimi parametri	61

KAZALO SLIK

Slika 1: Piezometer pod in tenziometer nad gladino talne vode v zemljini s prikazom meritve tlakov (tenziometer meri negativni tlak) (Marshall in Holmes, 1988).	4
Slika 2: Retenzijska krivulja za pesek in melj (Marshall in Holmes, 1988).	5
Slika 3: a) videz vodne molekule (razdalje in kot med atomi, ter videz molekule glede na znane radije atomov), b) vodikova vez, c) oblak vodnih molekul, ki oblepljajo kation (a in b: Lazarini in Brenčič, 1989 in c: Marshall in Holmes, 1988)	6
Slika 4: Retenzijske krivulje za različne glinene minerale (Marshall in Holmes, 1988).	8
Slika 5: a) Prikaz kapilarnega učinka. Premer kapilare glede na višino vodnega stolpca je močno popačen (Marshall in Holmes, 1988). b) Prikaz dveh radijev ukrivljenosti, ki jih dobimo, če kapilara ni okrogla.	9
Slika 6: Omočitveni kot in njegovo merjenje (Kladnik, 1979)	10
Slika 7: Učinek močenja in sušenja por (Marshall in Holmes, 1988).	11
Slika 8: Učinek močenja in sušenja na retenzijsko krivuljo	11
Slika 9: Tenziometer z živosrebrnim manometrom (Marshall in Holmes, 1988)	14
Slika 10: Vakuumska plošča – naprava, ki meri sukucijo s pomočjo podtlaka (Marshall in Holmes, 1988).	15
Slika 11: Tlačni lonec – naprava, ki meri sukucijo s pomočjo tlaka (Marshall in Holmes, 1988)	16
Slika 12: Prikaz ravnotežja med vodnim in parnim tlakom v zaprti posodi (Marshall in Holmes, 1988).	17
Slika 13: Retenzijska krivulja – SWCC (Zhou in Yu, 2004)	19
Slika 14: Vpliv poraščenosti z a) drevesi in b) travo na sukucijo (Scott, 2006).	21
Slika 15: Prirast efektivnih napetosti z večanjem sukucije (Marshall in Holmes, 1988)	22
Slika 16: Sila, ki jo povzroči vodni menisk (Geotechnical Observations)	23
Slika 17: Vpliv sukucije na prepustnost.	24
Slika 18: Zapolnjenost por v odvisnosti od sukucije (Bouma, Brown in Rao, 2003)	24
Slika 19: Prirastek rastlin na dan glede na sukucijo v zemljini (Marshall in Holmes, 1988).	25
Slika 20: Tenziometer (levo: Smajstrla in Pitts, 2005).	27
Slika 21: a) Kozarec z vzorcem, b) sušenje filter papirjev v peči	30

Slika 22: Kalibracijska krivulja za uporabljeni filter papir (Schleicher & Schell No.589/2) (ASTM D 5298-94)	31
Slika 23: Prikaz sestave vzorca za meritev sukcije s filter papirjem.	32
Slika 24: Tlačni lonec (Biotehniška fakulteta, UL)	34
Slika 25: Enslinov aparat (interna navodila LMT, FGG 2003)	36
Slika 26: a) potenciometer z računalnikom in tehtnico, b) potenciometer	38
Slika 27: Graf merjenja sukcije KCl.	40
Slika 28: Meritve sukcije na bentonitu	41
Slika 29: Graf meritve sukcije v različnih enotah – prikaz umiritve	41
Slika 30: Merska natančnost pri merjenju s potenciometrom WP4-T	42
Slika 31: Merska natančnost pri merjenju sukcije s pomočjo filter papirja	43
Slika 32: Meritve na kamni moki.	44
Slika 33: Meritve na bentonitu.	45
Slika 34: Meritve na flišu.	47
Slika 35: Meritve na sivici	48
Slika 36: Meritve sukcije bentonita in primerjava s podatki iz literature (bentonit iz literature: Thakur in Singh, 2005 in Ca- montmorilonit: Marshall in Holmes, 1988)	50
Slika 37: Meritve sukcije kamene moke in primerjava s podatki iz literature za kremenčev pesek (Marshall in Holmes, 1988)	50
Slika 38: Meritve sukcije fliša in sivice in primerjava s podatki iz literature (linija iz literature Zapata, Andrei in Witczak, 2005)	51
Slika 39: Primerjava materialov med seboj	52
Slika 40: Primerjava različnih načinov meritev sukcije za kameno moko (a), bentonit (b), fliš (c), sivico (d)	53
Slika 41: Primerjava retenzijskih krivulj a) kamena moka, b) bentonit, c) fliš, d) sivica; F&X - Fredlundov in Xingov model, VG – Van Genuchtenov model, B&C – Brooksov in Coreyev model, V- Visserjev model; Tlačni lonec – meritve s tlačnim loncem in Enslinovim aparatom	55
Slika 42: Enačbi 2.36 in 2.40 z označenim parametrom a_{VG} .	58
Slika 43: Meritve sukcije in van Genuchtenovi krivulji vlage in prepustnosti v odvisnosti od sukcije.	58
Slika 44: Prikaz stanja sivice v edometru pred zalitjem in računski model (desno)	59

- Slika 45: Prikaz normaliziranega povečanja vlage v odvisnosti od časa (merjeni podatki so LP-7 in LP-8): a) normalno merilo, b) koren časa in c) logaritem časa. 60
- Slika 46: Prikaz normaliziranega povečanja vlage v odvisnosti od časa za različen opis van Genuchtenove retenzijske krivulje. 61
- Slika 47: Prikaz normaliziranega povečanja vlage v odvisnosti od časa. Ocena prepustnosti za vzorec sivice iz vrtine LP-8 62
- Slika 48: Prikaz zmanjšanja sukcije skozi vzorec z daljšanjem časa zalitja. 63
- Slika 49: Prikaz gostote toka skozi vzorec z daljšanjem časa zalitja. 63
- Slika 50: Prikaz gradienta potenciala porne vode skozi vzorec z daljšanjem časa zalitja. 64

Slovarček

- capillary potential – *kapilarni potencial*
vodni potencial, ki ga ima voda zaradi kapilarnega dviga
- cation exchange – *kationska izmenjava*
pojav v glinah, ko se kationi vezani v kristalno mrežo zamenjajo s kationi iz raztopine
- dew-point – *rosišče*
temperatura, pri kateri se začne izločati rosa (relativna zračna vlaga postane 100%)
- dew-point potentiometer (hygrometer) – *potenciometer*
naprava, ki meri sukucijo na principu rosišča
- driving force – *gradient potenciala porne vode*
razlika tlakov (v m vodnega stolpca) z razdaljo
- exchangeable cations – *izmenljivi kationi*
to so kationi (Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , Mg^{2+}), ki se zamenjajo s kationi iz raztopine ali H^{+} ionom
- field capacity – *največja možna vlaga*
največja možna vlaga zemljine
- free energy of soil water – *glej potential energy of soil water*
- matric suction – *matrična sukucija*
matrična sukucija ustreza sukuciji, ki jo povzroči zemljina kot taka in ne tudi voda kot raztopina
- moisture characteristic curve – *glej soil water characteristic curve*
- permanent wilting point – *točka venenja*
tista vrednost sukucije pri kateri rastlina odmre, kljub ponovni navlažitvi tal
- potential energy of soil water – *vodni potencial*
razlika v potencialih (višinska razlika, slanost,...) med točkami v zemljini, ki povzročijo kroženje vode iz mest z višjim potencialom v mesta z nižjim potencialom
- pressure membrane and plate apparatus – *tlačni lonec*
naprava za merjenje matrične sukucije, ki s pomočjo zračnega tlaka iztiska vodo iz zemljine
- retention curve – *glej soil water characteristic curve*
- soil water characteristic curve – *retenzijska krivulja*
graf vlage (masne ali volumetrične) ali stopnje zasičenja v odvisnosti od sukucije (celotne ali matrične) (sukucija je risana v logaritmični skali)
- suction – *sukucija*
podtlak vode v zemljini
- suction plate – *vakuumska plošča*
naprava za merjenje matrične sukucije, ki s pomočjo podtlaka v vodi iztiska vodo iz zemljine

- tensiometer – *tenziometer*
naprava za merjenje matrične sukcije.
- tension of soil water – *glej suction*
- vapour pressure – *parni tlak*
- water adsorption – *adsorpcija vode*
vezanje vode na površino zrn zemljine

Seznam simbolov

$(\sigma_n - u_a)$...normalni tlak

$(u_a - u_w)$...sukcija

a_C ...oblikovni parameter za funkcijo Brooks in Corey

a_f ...oblikovni parameter za funkcijo Fredlund in Xing

a_{VG} ...oblikovni parameter za funkcijo van Genuchten

c' ...kohezija

e ...količnik por

g ...težnostni pospešek

k ... prepustnost zemljine

k_S ...prepustnost zasičene zemljine

m ... masa

m_s ... masa zrn zemljine

m_v ...masa vode v zemljini

m_C ...oblikovni parameter za funkcijo Brooks in Corey

m_f ...oblikovni parameter za funkcijo Fredlund in Xing

m_{VG} ...oblikovni parameter za funkcijo van Genuchten

n_C ...oblikovni parameter za funkcijo Brooks in Corey

n_f ...oblikovni parameter za funkcijo Fredlund in Xing

n_{VG} ...oblikovni parameter za funkcijo van Genuchten

p ...tlak

r ...radij ukrivljenosti

r_k ...radij kapilare

s ...sukcija

w ...vlaga

w_R ...rezidualna vlaga

w_S ...vlaga pri popolni zasičenosti

M ... molska masa enega mola vode $0,018 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$

P ...tlačni potencial

R ...plinska konstanta $8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

S_r ...zasičenost

T ... temperatura v Kelvinih

V ... volumen

V_s ... volumen zrn zemljine

V_p ... volumen por zemljine

V_v ... volumen vode v zemljini

Z ... gravitacijski potencial

α ...kot, ki ga voda oklepa z osjo kapilare (omočitveni kot)

γ ...površinska napetost vode

φ' ...strižni kot

ρ ...gostota

ρ_w ...gostota vode

ρ_d ...suha gostota

ρ_s ...gostota zrn

ρ_v ...gostota hlapov

ρ_{Hg} ...gostota živega srebra

σ ...napetost

σ' ...efektivna napetost

τ ...strižna trdnost

Φ ...celotni potencial

Π ...osmotski potencial

θ ...volumetrična vlaga

θ_R ... rezidualna volumetrična vlaga

θ_S ...volumetrična vlaga pri popolni zasičenosti

Ψ ...matrični potencial

1 UVOD

Zemljino v geotehničnih izračunih upoštevamo kot homogen zasičen ali nezasičen material. Dejansko pa zemljina ni homogen, temveč nehomogen material, sestavljen iz treh faz: vode, zraka in trdnih delcev. Voda in zrak se nahajata v porah med trdnimi delci, ki sestavljajo matrico (okvir) zemljine. Če se zemljina nahaja pod nivojem talne vode, ima vse pore zasičene z vodo. Taki zemljini, sestavljeni samo iz vode in trdnih delcev, pravimo, da je zasičena. V njej se tlak vode izračuna kot hidrostatični tlak glede na globino pod nivojem talne vode. Zemljina nad nivojem talne vode bi bila popolnoma suha v primeru, da bi bila voda v zemljini podvržena le gravitacijski sili. Temu ni tako, saj vodo vežejo med delce zemljine elektro-kemijske sile. V nezasičeno cono zemljine pride voda s padavinami ali pa jo zemljina potegne navzgor iz zasičenih plasti s pomočjo kapilarnega učinka. Sili, s katero zemljina zadržuje vodo, pravimo sukcija in ustreza natezni hidravlični napetosti.

Sukcija je pomemben del našega okolja, saj omogoča zadrževanje znatne količine vode tudi v plasteh zemljin nad podzemno vodo. To vodo lahko črpajo rastline in jo uporabijo v fotosintezi. Zato so se s sukcijsko najprej začeli ukvarjati v agronomiji, saj je pomembna za hitrost rasti, občutljivost tal na sušo ter pogostost zalivanja kmetijskih površin. V gradbeništvu je sukcija povezana s poroznostjo in prepustnostjo zemljine, dodatno nosilnostjo temeljnih tal (zemeljski plaz lahko povzroči že sam padec sukcije in ne le dvig gladine podtalnice) in nabrekljivostjo zemljin.

Z meritvami sukcije se geotehniki v Sloveniji doslej niso ukvarjali, zato smo zaradi izboljšanja razumevanja obnašanja nekaterih vrst zemljin začeli v Laboratoriju za mehaniko tal (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo) meriti tudi sukcijsko. Meritve sukcije so tako postale nove preiskave v Laboratoriju za mehaniko tal. Zaradi vpeljave novih preiskav je namen moje diplomske naloge izvesti meritve sukcije na dveh referenčnih mejnih materialih (bentonit in kamena moka) in dveh glinah (sivica in fliš) ter meritve pridobiti z različnimi metodami in preveriti enakosti rezultatov. Splošno točnost meritev smo preverili s podatki iz literature ter za dane meritve izrisali različne empirične krivulje in ocenili uporabo le-teh.

2 TEORETSKO OZADJE

Celotno poglavje, v kolikor ni posebej označeno, je povzeto po knjigi Soil physics (Marshall in Holmes, 1988).

2.1 Osnovni pojmi

Na velikost zemljinske sukcije vplivajo različne temeljne lastnosti, ki izvirajo iz mineralogije, ter lastnosti, ki izvirajo iz stanja zemljine, predvsem strukture. V tem poglavju zajeti izrazi so pomembni pri vrednotenju rezultatov in povezovanju meritev z drugimi meritvami. Poleg osnovnega izraza sem dodal še najbolj pogosto uporabljene pretvorbe iz znanih pojmov v želenega.

Gostota

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

Suha gostota

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

Gostota zrn

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

Količnik por

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.4)$$

Zasičenost

$$Sr = \frac{V_v}{V_p} = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad (2.5)$$

Vlaga

$$w = \frac{m_v}{m_s} \quad (2.6)$$

Volumenska vlaga

$$\theta = \frac{V_v}{V} = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w} \quad (2.7)$$

kjer so:

m ... masa

V ... volumen

ρ_w ...gostota vode

m_s ... masa zrn zemljine

m_v ...masa vode v zemljini

V_s ... volumen zrn zemljine

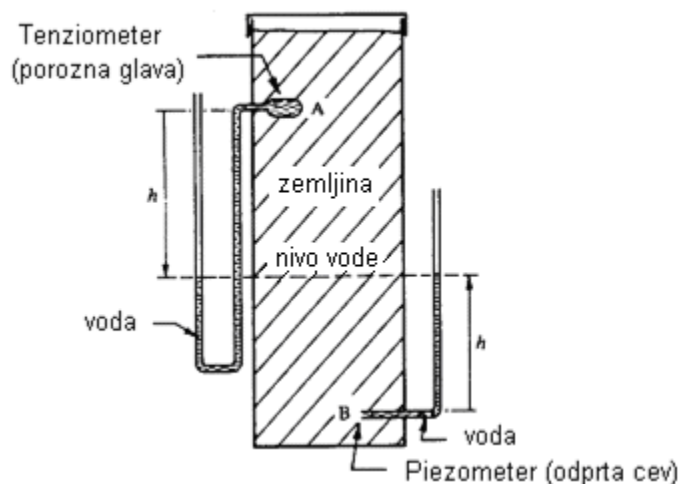
V_p ... volumen por zemljine

V_v ... volumen vode v zemljini

2.2 Osnove sukcije

Sukcija je merilo za energijo, ki privlači vodo v strukturo zemljine ali pa jo tam zadržuje. Zaznamo jo kot natezno napetost v vodi oziroma negativni tlak. Sukcija nastane zaradi adsorpcije vode na delce zemljine, kapilarnega učinka in raztopljenih snovi v vodi, blizu površja pa tudi zaradi vpliva rastlin, ki črpajo vodo iz tal. Vpliva teh pojavov na sukucijo z meritvami običajno ne moremo ločiti, ker v naravi nastopajo sočasno. Zmerimo lahko le seštevek njihovih vplivov, vendar nas to kot gradbenega inženirja ne moti, saj je obnašanje zemljine odvisno od sukcije in ne od posameznega pojava.

Lažje razumevanje sukcije omogoča spodnja slika, ki prikazuje meritev sukcije v kremenčevem pesku. Zemljino na sliki lahko razdelimo na dva dela. Zemljina, ki leži pod nivojem talne vode, je popolnoma zasičena. Gladina vode v piezometru je nad točko merjenja (točka B), kar ustreza pozitivnemu tlaku. Drugi del je nezasičena zemljina, ki se nahaja nad nivojem talne vode. Kremenčev pesek brez adsorpcijskih sposobnosti je podvržen le kapilarnemu učinku. Vodni tlak, ki ga izmerimo s pomočjo tenziometra, je negativen, saj je nivo vode v tenziometru pod nivojem točke merjenja (točka A). Temu negativnemu tlaku pravimo sukucija.



Slika 1: Piezometer pod in tenziometer nad gladino talne vode v zemljini s prikazom meritve tlakov (tenziometer meri negativni tlak) (Marshall in Holmes, 1988).

Sukcijo so najprej začeli raziskovati agronomi, saj je pomembna za rast zemljin. Višja kot je sukcija, več energije rastlina potrebuje za črpanje vode iz zemljine in posledično manj raste.

V agronomiji sta pomembni naslednji točki, saj imata velik vpliv na rastline:

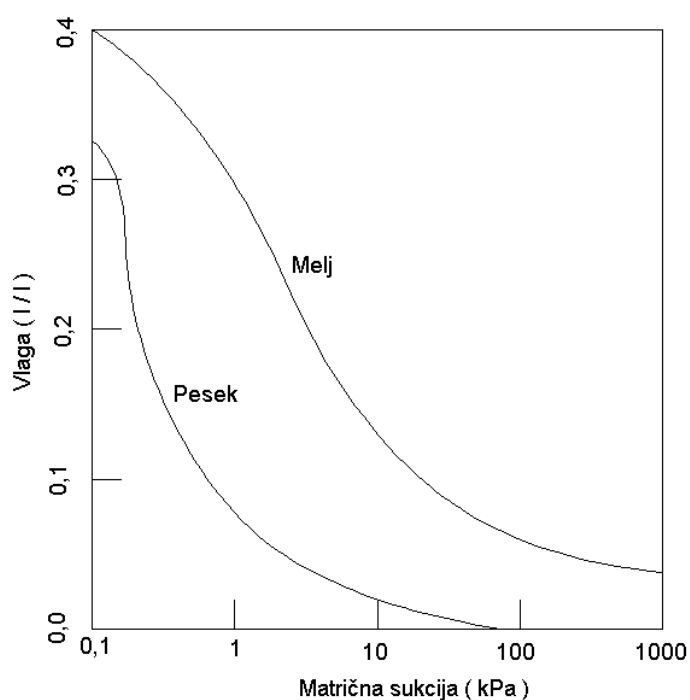
- **Točka venenja** (permanent wilting point)

To je tista vrednost vlage v zemljini, pri kateri rastlina s svojim koreninskim sistemom ne more več črpati vode iz tal. Določa se jo z merjenjem vlage zemljine pri kateri rastlina oveni in si po ponovni navlažitvi čez noč več ne opomore. Tipično jo predpostavimo kot vlago pri sukaciji 1500 kPa (Marshall in Holmes, 1988 str.: 256).

- **Največja možna vlaga** (field capacity)

To je tista vsebnost vode v razmočeni zemljini, iz katere se je voda dva do tri dni prosto izcejala. Pri sami meritvi moramo zaradi dodatne izsušitve preprečiti izhlapevanje vode. Tako dobimo največjo količino vode, ki jo lahko zemljina zadrži in ponudi rastlinam. Hitrost odtekanja vode iz vzorca upada s časom, saj se zmanjša prepustnost zemljine, ko se največje pore napolnijo z zrakom. Iz tega razloga so omejili preskus na dva dni. Običajno se za največjo možno vlago vzame kot vlago pri sukaciji 33 kPa za glinena oziroma 10 kPa za peščena tla (Marshall in Holmes, 1988 str.: 255).

Rastlina ima na voljo za rast vso vodo med točko venenja in največjo možno vlago (na nekem področju). Količina vode, ki je na voljo rastlini, pa je odvisna od zemljine. Vlaga, ki jo zadrži zemljina pri določeni sukaciji, je odvisna od teksture in strukture zrn, vsebnosti organskih spojin in glinenih delcev, mineraloške sestave glinenih delcev in ali je zemljina v fazi sušenja ali fazi vlaženja. Zvezo med vlago in sukacijo opisuje krivulja, ki jo imenujemo retenzijska krivulja. Primer te krivulje vidimo na sliki 2, ki prikazuje retenzijski krivulji za pesek in melj. Vidimo, da ima pesek pri isti vlagi nižjo vrednost sukacije. Prav tako vidimo, da pesek odda večino vode v majhnem območju sukacije, kar je posledica podobno velikih por.



Slika 2: Retenzijska krivulja za pesek in melj (Marshall in Holmes, 1988).

S fizikalnega vidika zapišemo sukacijo kot absolutno vrednost vodnega potenciala.

$$s = |\text{vodni potencial}| \quad (2.8)$$

s ...sukcija

Vodni potencial je enak seštevku matričnega potenciala in osmotskega potenciala. Ker je osmotski potencial pri visoki sukaciji majhen glede na matrični potencial v normalnih zemljinah, ga lahko zanemarimo. V tem primeru sukacijo zapišemo tudi kot spodnjo enačbo.

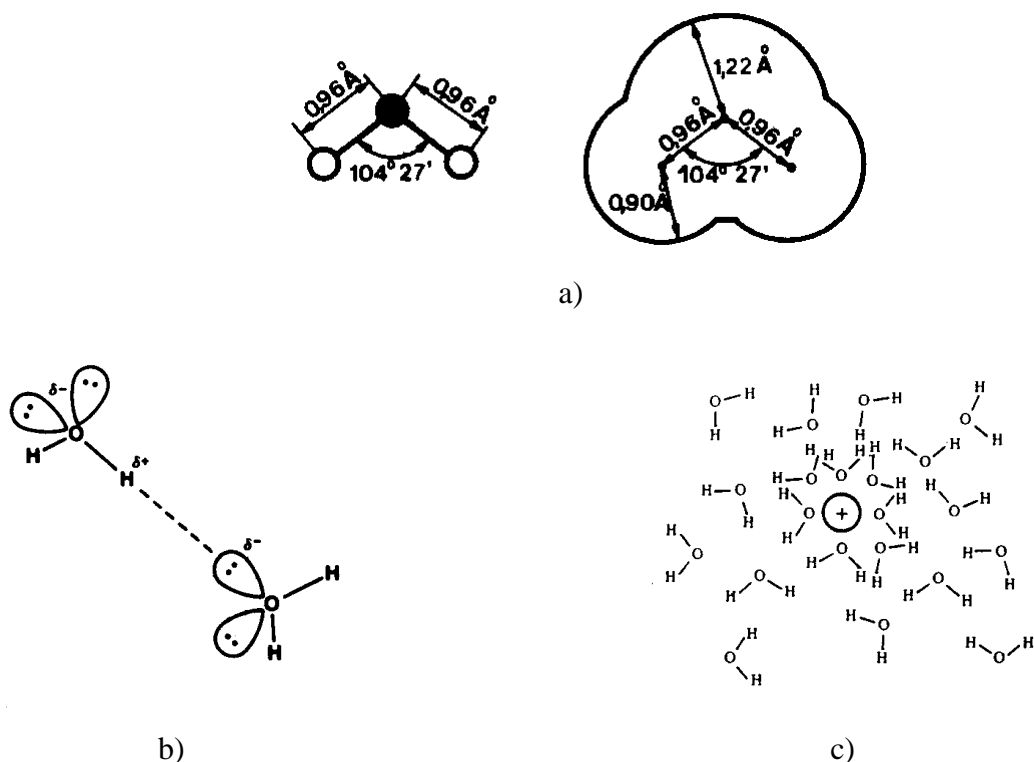
$$s = \psi \quad (2.9)$$

ψ ...matrični potencial

2.3 Pojavi, ki povzročijo sukucijo

2.3.1 Adsorpcija vode in raztopine v vodi

Voda je polarna molekula. Čeprav ima dva vodikova atoma (H) in bi po nekakšni logiki morala biti zrcalna preko kisikovega atoma (O), njeno simetrijo podreta prosta elektronska para. Tako vodna molekula zglenda kot nekakšen nepravilen tetraeder z vodikovimi atomi in prostimi elektronskimi pari v ogliščih in kisikovim atomom v notranjosti tetraedra. To ima za posledico kot med vodikoma, ki ni 180° , ampak je $104,5^\circ$. 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 elektrostatično polje ter tvorijo šibke medmolekulske vezi (van der Waals-ove vezi). Posledica tega je raztapljanje soli v vodi in oblepitev ionov v vodni raztopini, kot je razvidno s slike 3.



Slika 3: a) videz vodne molekule (razdalje in kot med atomi, ter videz molekule glede na znane radije atomov), b) vodikova vez, c) oblak vodnih molekul, ki oblepljajo kation (a in b: Lazarini in Brenčič, 1989 in c: Marshall in Holmes, 1988)

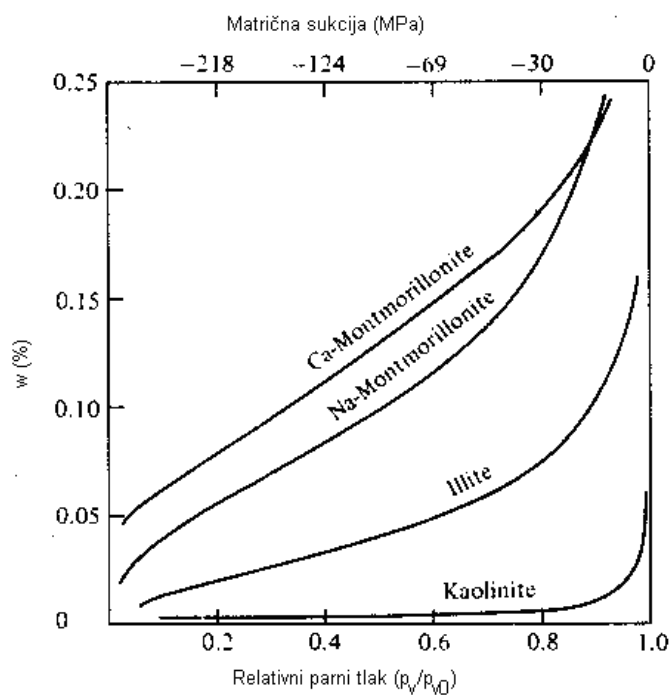
Vendar ima voda še eno posebnost; sposobna je tvoriti vodikove vezi. Vodikova vez je vez med vodikom, ki je vezan na majhen atom fluora F, dušika N ali kisika O in prostim elektronskim parom na dušiku, fluoru ali kisiku. Ta vez je najmočnejša med medmolekulskimi vezmi in ima za posledico unikatno obnašanje vode (skupke vodnih molekul v vodi ali pari, manjšo gostoto ledu, ...).

Adsorbirana voda je tista voda, ki je fizično vezana na zrna zemljine. Iz opisanih lastnosti vode ugotovimo tri načine vezanja vode na zrno. Prvi izmed njih je raztapljanje »zamenljivih« kationov iz zemljine, ki se dogaja v zgodnji fazi vlaženja glin. Drugi način je vzpostavitev šibkih medmolekulskih vezi, tretji pa z močnejšimi vodikovimi vezmi. S pomočjo vodikovih vezi naj bi se naredil oblak vode okoli zrn širok tudi do 5 nm. Za primerjavo naj navedem še velikost vodne molekule, ki znaša 0,14 nm. Seveda pa različne zemljine vežejo različne količine vode. Količina vode je odvisna od velikosti oziroma specifične površine zrn, električne nabitosti zrn in vrste »zamenljivih« kationov. Nekateri minerali (kremen in kalcit) nimajo električno nabite površine in so površinsko neaktivni. Drugi (glineni) minerali pa so površinsko negativno nabiti in privlačijo pozitivno nabito stran vode. Velikost električnega naboja je odvisna od vrste glinenega materiala (preglednica 1). Lažje razumevanje pomena »zamenljivih« kationov vidimo s spodnjega grafa (slika 4). Vidimo, da Ca-montmorilonit leži nad Na-montmorilonitom, oziroma ima pri isti sukaciji višjo vlago. Prav tako vidimo, da ima kaolin s specifično površino $16 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ nižje vlage pri isti sukaciji od montmorilonitov s specifično površino $677 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Nižja vrednost specifične površine pomeni večja zrna.

Prav tako pa se sukcija pojavi tudi pri organskih spojinah in raztopljenih soleh v vodi. Raztopine zvišujejo sukucijo, ker voda oblepi katione in anione.

Preglednica 1: Podatki o specifični površini in katjonski izmenjevalni kapaciteti za glinene materiale (Chen, 1975)

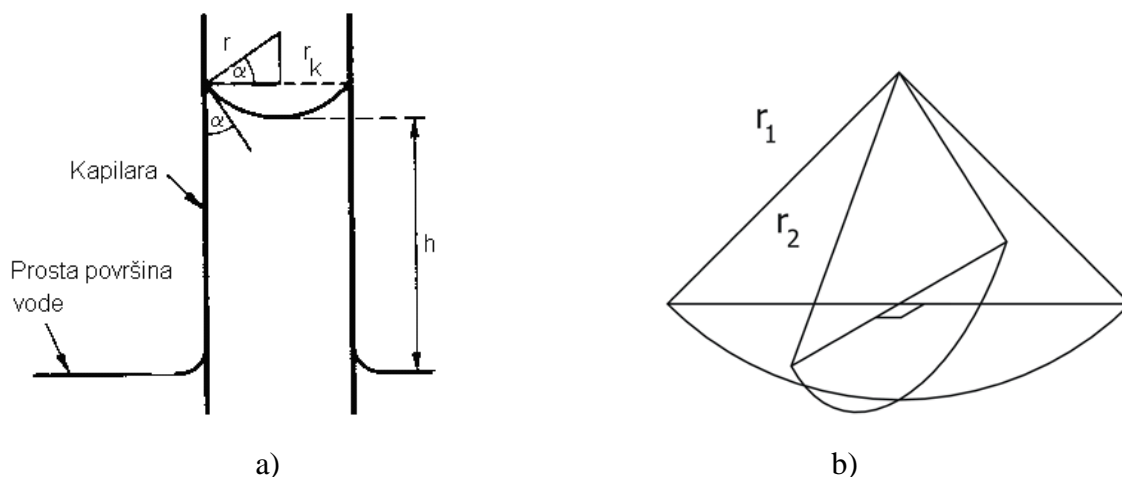
Mineral		Kaolinit	Illit	Montmorillonit
Premer zrna	μm	0,5-4	0,5-10	0,05-10
Specifična površina	$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	10-20	65-180	50-840
Kationska izmenjevalna kapaciteta	$\text{meq}(100\text{g})^{-1}$	3-15	40-40	70-80
Meja židkosti, w_L	%	29-39	61-90	158-344
Indeks plastičnosti, I_P	%	1-11	27-50	99-251



Slika 4: Retenzijske krivulje za različne glinene minerale (Marshall in Holmes, 1988).

2.3.2 Kapilarni učinek

Voda je podvržena privlačnim silam med molekulami, vendar imajo tiste molekule, ki so na površini, vodo le na eni strani. Zaradi tega jih privlačijo molekule le v eno smer – proti vodi. Posledica tega je površinska napetost vode, ki je približno $73 \text{ m}\cdot\text{N}^{-1}$ pri 20°C . To se najlepše vidi kot kapilarni učinek. Če tanko stekleno cevčico potopimo v vodo, opazimo, da je voda v cevčici višja od gladine vode. S pomočjo višine vode v cevčici lahko izračunamo kapilarni tlak vode. V nadaljevanju bom zapisal izpeljavo kapilarnega tlaka. Dimenzije, ki v izpeljavi nastopajo, vidimo s slike 5.



Slika 5: a) Prikaz kapilarnega učinka. Premer kapilare glede na višino vodnega stolpca je močno popačen (Marshall in Holmes, 1988). b) Prikaz dveh radijev ukrivljenosti, ki jih dobimo, če kapilara ni okrogla.

Sila, ki deluje navzgor:

$$F_{v1} = 2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot \gamma \cdot \cos \alpha \quad (2.10)$$

r_k ...radij kapilare

α ...kot, ki ga voda oklepa z osjo kapilare (omočitveni kot)

γ ...površinska napetost vode

Sila, ki deluje navzdol:

$$F_{v2} = \pi \cdot r_k^2 \cdot \rho_w \cdot g \cdot h \quad (2.11)$$

h ...višina vodnega stolpca

Z enačenjem enačb (ravnotežni pogoj) in izrazitvijo tlaka dobimo enačbo:

$$-p = \rho_w \cdot g \cdot h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \alpha}{r_k} = -\frac{2 \cdot \gamma}{r} \quad (2.12)$$

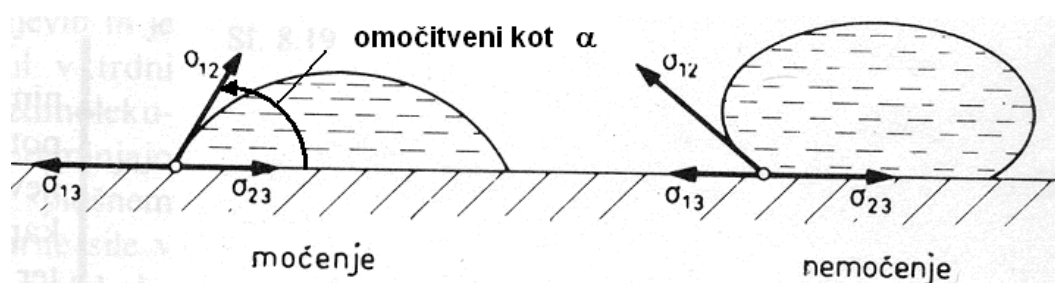
r ...radij ukrivljenosti

Kapilare v zemljinah niso cevke, kjer bi se izoblikovala sferična vodna površina z enim radijem ukrivljenosti. Zato sta za opis oblike površine vode potrebna dva radija ukrivljenosti.

Kapilarni tlak tako izračunamo po naslednji enačbi:

$$p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.13)$$

Če računamo premer kapilar v zemljini iz merjene sukcije, upoštevamo le en radij ukrivljenosti in omočitveni kot enak 0° . Omočitveni kot 0° pomeni, da se voda popolnoma razleze po zemljini, izhaja pa iz predpostavke, da je zemljina zasičena. Kako merimo omočitveni kot, vidimo s slike 6. Na začetku odstavka predstavljena predpostavka o enem radiju ukrivljenosti ni pravilna, saj bomo kasneje videli, da imajo vhodne točke v kapilare manjši premer kakor same pore in kapilare. Pri meritvah sukcije moramo upoštevati še, da površinska napetost upada z višanjem temperature (preglednica 2). Opazimo lahko, da je hitrost upadanja sukcije višja od hitrosti upadanja površinske napetosti. To je posledica ujetega zraka med zrnji, ki je zaradi spremembe temperature podvržen tlaku.



Slika 6: Omočitveni kot in njegovo merjenje (Kladnik, 1979)

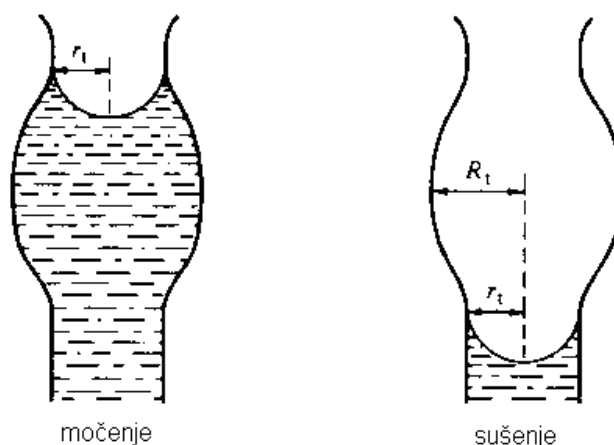
Preglednica 2: Površinska napetost v odvisnosti od temperature (Marshall in Holmes, 1988)

Temperatura - T [°C]	0	10	20	30	40
Površinska napetost - γ [mN·m ⁻¹]	75,7	74,2	72,75	71,2	69,6

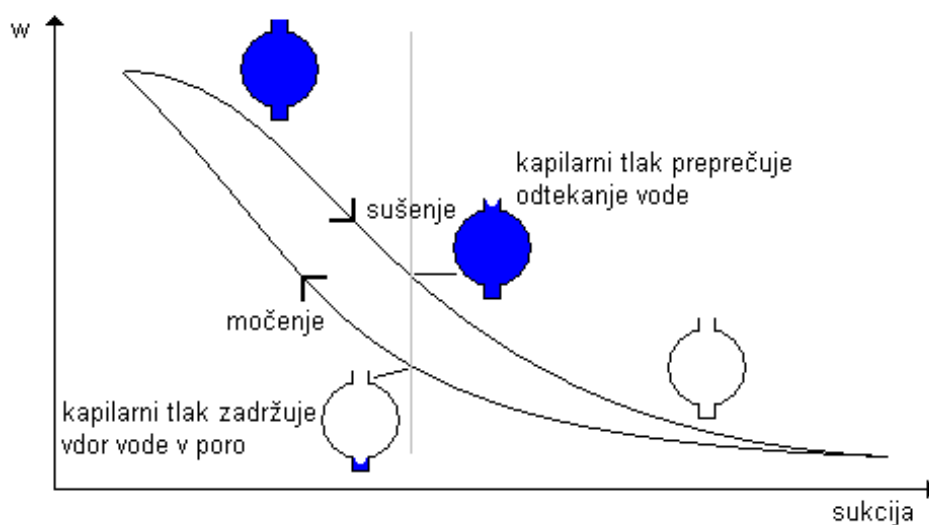
Višina vodnega stolpca v kapilari je omejena na približno 8,5 m, saj se pri tej višini začnejo izločati mehurčki plinov, ki pretrgajo vodni stolpec. Višje višine vodnega stolpca v kapilari dobimo, če vodo v kapilari izpostavimo centrifugalni sili. V tem primeru so natezne napetosti vode izmerili do 22,6 MPa (oziroma po teoriji ocenjene na vrednosti med 50 in 100 MPa). Iz tega pa vidimo, da velikost sukcije ni omejena zgolj na 8,5 m vodnega stolpca (oziroma 85 kPa).

S pomočjo kapilarnega učinka lahko tudi razložimo razliko pri retenzijski krivulji, če zemljino močimo ali sušimo (slika 8). Razlaga velja za melje in peščene materiale, manj pa za gline, saj pri glinah prevladuje adsorpcijski učinek. Poro si lahko predstavljamo kot cevko z razširitvijo.

Pri tem imamo opravka z dvema radijema ukrivljenosti. Prvi je radij razširitve, ki bo definiral, koliko vode bo pora sprejela. Drugi manjši radij pa bo definiral kapilarni tlak, pri katerem se bo bučka spraznila oz. napolnila (slika 7). Dokler ta tlak ne bo dosežen, se pora ne bo hotela izprazniti oziroma napolniti. Poleg tega učinka pa imamo še učinek omočitvenega kota. Pri mokrem materialu je ta kot približno enak 0° , pri suhem pa je večji od 0° . Ker nastopa kosinus omočitvenega kota v imenovalcu ulomka (enačba 2.12), je kapilarni tlak suhe kapilare manjši od kapilarnega tlaka mokre kapilare. Zgornja dva pojava povzročita, da bo zasičena zemljina težje oddajala vodo kot jo bo suha zemljina sprejemala. To vidimo pri retenzijskih krivuljah zemljine, kjer ima zemljina, ki jo sušimo, višje vlage pri isti sukaciji kakor zemljina, ki jo močimo (slika 8).



Slika 7: Učinek močenja in sušenja por (Marshall in Holmes, 1988).



Slika 8: Učinek močenja in sušenja na retenzijsko krivuljo

2.4 Vrste potencialov

Sukcija je absolutna vrednost vodnega potenciala, zato bom v tem poglavju opisal različne potenciale v vodi. Potenciali se od točke do točke razlikujejo in povzročijo gibanje vode iz točk z višjimi potenciali v točke z nižjimi potenciali.

2.4.1 Celotni potencial Φ

Celotni potencial je potrebno delo na enoto količine (volumna ali mase ali teže), da prenesemo neskončno majhen volumen čiste 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.

2.4.2 Tlačni potencial P

Tlačni potencial je posledica premika vode iz tlaka nič na nek tlak p_w pri isti višini. Je torej tlak, kateremu je podvržena voda v vzorcu.

$$P = p_w = \rho_w \cdot g \cdot h \quad (2.14)$$

h ...višina vodnega stolpca

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 (glej sliko 1).

2.4.3 Matrični potencial Ψ

Matrični potencial je posledica interakcije vode s strukturo zemljine in njenimi delci. Vključuje kapilarne sile in adsorpcijo vode na površino delcev. Zaradi svoje privlačne narave je vedno negativen. Definiran je podobno kot tlačni potencial, le da ne vključuje dela zaradi nestandardnega zračnega tlaka.

$$\Psi = \rho_w \cdot g \cdot h \quad (2.15)$$

2.4.4 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. Razlika potencialov med polprepustno membrano in tenziometrom je osmotski potencial. Tudi ta potencial je vedno negativen.

$$\Pi = \rho_w \cdot g \cdot h_\pi \quad (2.16)$$

h_π ...višina vodnega stolpca zaradi osmotskih sil

2.4.5 Gravitacijski potencial Z

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

$$Z = \rho_w \cdot g \cdot z \quad (2.17)$$

z ...sprememba višine

2.4.6 Kombinacije potencialov

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

- **Celotni potencial** je seštevek tlačnega, osmotskega in gravitacijskega potenciala.
- **Hidravlični potencial** je seštevek tlačnega in gravitacijskega potenciala. Njegov gradient nam pove smer toka vode in je sorazmeren z hitrostjo.
- **Vodni potencial** je seštevek matričnega in osmotskega potenciala. Le-ta nas v tej analogi še posebej zanima, saj je njegova pozitivna vrednost enaka sukaciji.

$$\text{vodni potencial} = \psi + \Pi \quad (2.18)$$

2.5 Enote in njihova pretvorba

Sukcijo, ki je po naravi natezna napetost, ponavadi merimo v paskalih (Pa), barih (bar) in atmosferah (atm.). Te enote dobimo, če sukucijo (delo) izrazimo na enoto volumna. Izrazimo jo lahko tudi na enoto mase ali pa na enoto teže. Sukucijo, izraženo na enoto mase, merimo v $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, iz česar vidimo, da lahko o sukuciji govorimo tudi kot o energiji. Sukucijo, izraženo na

enoto teže, merimo v metrih vodnega stolpca (m). V spodnji preglednici pa je tudi enota pF, ki pomeni desetiški logaritem sukcije izražene v centimetrih vodnega stolpca. Sukcija, izražena v enotah pF, barih ali metrih vodnega stolpca, ni v skladu z mednarodnim sistemom enot, ki dovoljuje le paskale. Velikosti meritev sukcije v različnih enotah in pretvorbe med različnimi enotami vidimo iz preglednice 3.

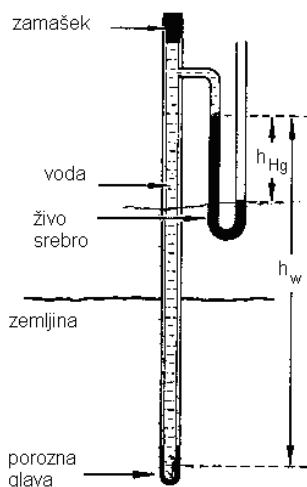
Preglednica 3: Sukcije v značilnih točkah s pretvorbo med enotami (Marshall in Holmes, 1988)

Značilne točke	Enote		
	kPa ali $J \cdot kg^{-1}$	m (vodnega stolpca)	pF
Točka kapilarnega zasičenja	0,1	0,001	0,0
Največja možna vlaga	10	1	2,0
Točka venenja	1.500	150	4,2
Posušena na zraku	100.000	10.000	6,0
Posušena pri 105°C	1.000.000	100.000	6,9
Pretvorba	9,8 h	h	$\log(102 h)$

2.6 Principi merjenja sukcije

2.6.1 Direktno s pomočjo tlakov

2.6.1.1 Princip tenziometra



Slika 9: Tenziometer z živosrebrnim manometrom (Marshall in Holmes, 1988)

Tenziometer meri sukucijo tako, da meri podtlak v vodnem stolpcu, ki ga sukucija ustvarja. Kot vidimo z zgornje slike je sukucija enaka tlaku, ki ga pokaže manometer. Ta pa je:

$$s = \psi = \left| \rho_w \cdot g \cdot h_w - \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_{Hg} \right| \quad (2.19)$$

ρ_{Hg} ...gostota živega srebra

2.6.1.2 S podtlakom

Vzorec se položi na porozno ploščo, ki je izpostavljena nekemu podtlaku p_p . Le ta srka vodo iz zemljine. Zunanji tlak na vzorec je enak nič, tlak vode v porozni plošči pa je enak podtlaku p_p . Tlačni potencial ob ravnovesju je enak podtlaku p_p :

$$P = (\psi + 0) = p_p \quad (2.20)$$

Iz zgornje enačbe pa izpostavimo matrični potencial:

$$\psi = p_p \quad (2.21)$$

Naprava deluje le ob zveznosti vode, tako da moramo paziti na dober stik vzorca s porozno ploščo. Prav tako pa to omejuje delovno območje naprave do podtlaka 85 kPa, saj kasneje začnejo iz vode izhajati zračni mehurčki, ki prekinejo zveznost vode.



Slika 10: Vakuumska plošča – naprava, ki meri sukucijo s pomočjo podtlaka (Marshall in Holmes, 1988).

2.6.1.3 S tlakom

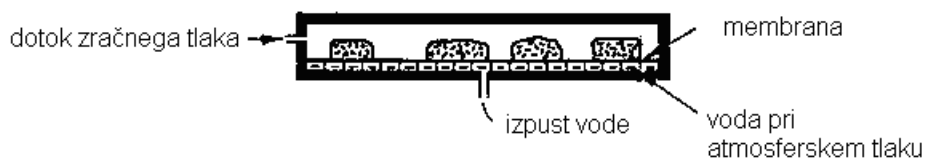
Vzorec se da na porozno ploščo, ki se nahaja v zaprti posodi. V posodi se naredi tlak p_z . Ker je vzorec položen na zasičeno porozno ploščo, ki je povezana z zunanostjo, je tlak v vodi na stiku z vzorcem enak nič. Tlačni potencial ob ravnovesju je tako enak zunanjemu tlaku, sam pa je seštevek matrične sukucije in zračnega tlaka na vzorcu.

$$P = \psi + p_z = 0 \quad (2.22)$$

Iz te enačbe pa dobimo:

$$\psi = -p_z \quad (2.23)$$

Torej je po doseženem ravnovesju matrični potencial enak tlaku v posodi.



Slika 11: Tlačni lonec – naprava, ki meri sukucijo s pomočjo tlaka (Marshall in Holmes, 1988)

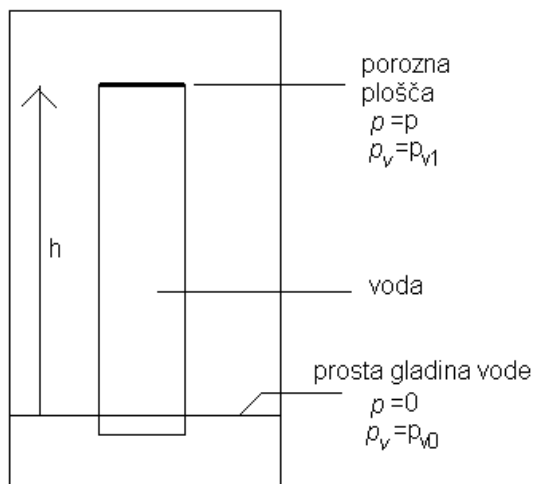
2.6.2 Primerjalno merjenje sukucije

2.6.2.1 S pomočjo poroznih materialov

S pomočjo poroznega materiala vgrajenega v zemljino lahko posredno določimo matrični potencial zemljine. To naredimo tako, da merimo vlago ali električno prevodnost ali toplotno prevodnost materiala, ki sta odvisni od vlage. Pred vgradnjo poroznemu materialu določimo kalibracijsko krivuljo. Nato pa iz meritve vlage preko kalibracijske krivulje sklepamo na matrični potencial vzorca. Seveda je ta metoda približna, saj se materiali malenkostno razlikujejo, delamo na posplošeni kalibracijski krivulji, ne upoštevamo časovne odvisnosti kalibracijske krivulje in ne upoštevamo ali se vzorec suši ali moči. Najbolj pogosto uporabljena porozna materiala sta mavec in filter papir.

2.6.2.2 Na princip vlage v zraku

Voda naredi v zaprti posodi 100% zračno vlago, ki ji pri neki temperaturi in nekem tlaku odgovarja nek delni parni tlak vode v zraku p_{v0} . Če v to vodo postavimo stekleno cev zapolnjeno z vodo, ki ima na zgornjem koncu porozno ploščico, bo voda na vrhu porozne ploščice pod nekim podtlakom p_p . Tako je na tem mestu delni parni tlak p_{v1} , ki odgovarja podtlaku, kateremu je voda podvržena. Prav tako pa se delni parni tlak vode manjša z višino podobno kot hidrostatični tlak.



Slika 12: Prikaz ravnotežja med vodnim in parnim tlakom v zaprti posodi (Marshall in Holmes, 1988).

$$dp_v = \rho_v \cdot g \cdot dh \quad (2.24)$$

$$dp = \rho_w \cdot g \cdot dh \quad (2.25)$$

ρ_v ... gostota hlapov

Če iz zgornjih enačb izpostavimo dh in ju enačimo, dobimo:

$$dp = dp_v \cdot \frac{\rho_w}{\rho_v} \quad (2.26)$$

Sedaj zapišemo še splošno plinsko enačbo:

$$p_v \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (2.27)$$

M ... molska masa enega mola vode $0,018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

R ... plinska konstanta $8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

T ... temperatura v Kelvinih

Maso in volumen izrazimo z gostoto vodnih par, ki jo izrazimo:

$$\rho_v = \frac{p_v \cdot M}{R \cdot T} \quad (2.28)$$

Le to vstavimo v diferencialno enačbo za tlak (2.26) in dobimo:

$$dp = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M} \left(\frac{dp_v}{p_v} \right) \quad (2.29)$$

Če enačbo 2.29 integriramo in upoštevamo, da je na vodni gladini $p=0$ in $p_v=p_{v0}$, ter enačbo zapišemo na višini z , kjer je tlak enak podtlaku p_p in delni parni tlak enak p_v , dobimo:

$$p_p = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M} \ln\left(\frac{p_{v1}}{p_{v0}}\right) \quad (2.30)$$

Ker je p_{v1} manjši od p_{v0} , dobi naravni logaritem negativno vrednost, kar seveda ustreza podtlaku.

Sedaj zapišemo tlačni potencial na porozni ploščici. Na porozno ploščico deluje le podtlak, v njej pa je le matrični potencial, saj je zunanji tlak enak nič.

$$P = \psi + 0 = p_p \quad (2.31)$$

Torej lahko podtlak zamenjamo z matričnim potencialom

$$\psi = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M} \ln\left(\frac{p_{v1}}{p_{v0}}\right) \quad (2.32)$$

Na podoben način zapišemo tudi izraz za osmotski potencial. Pri tem moramo porozno ploščico nadomestiti s polprepustno membrano.

$$\Pi = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M} \ln\left(\frac{p_{v1}}{p_{v0}}\right) \quad (2.33)$$

Oziroma kot skupni učinek vodnega potenciala:

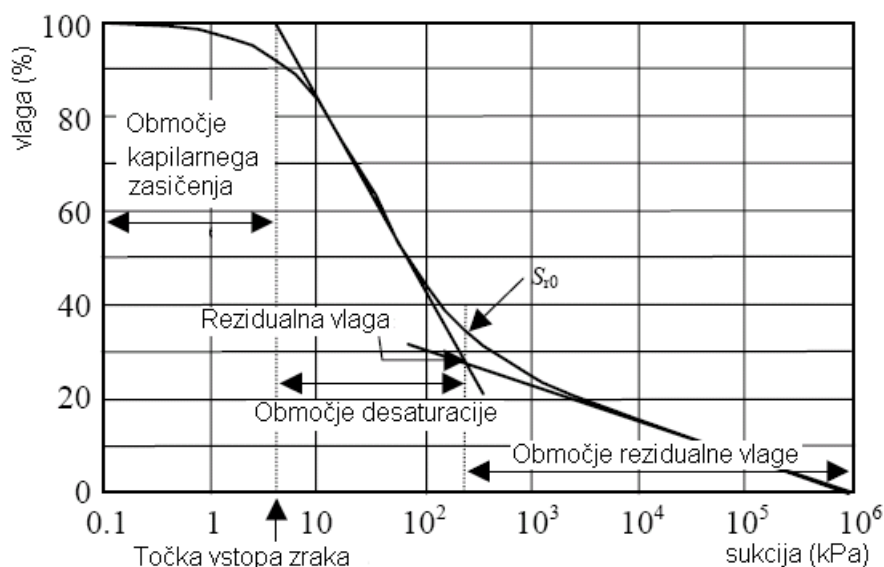
$$\psi + \Pi = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M} \ln\left(\frac{p_{v1}}{p_{v0}}\right) \quad (2.34)$$

Problem te metode je natančnost merjenja $p_{v1} \cdot p_{v0}^{-1}$, saj imamo pri vrednosti $p_{v1} \cdot p_{v0}^{-1} = 0,99$ sukcijsko 1500 kPa. Torej so zaradi natančnosti meritev izmerljive samo visoke sukcije. Relativno vlago oziroma $p_{v1} \cdot p_{v0}^{-1}$ merimo na več načinov. Lahko jo merimo posredno preko vlage poroznega materiala, ki se navlaži toliko, da vzpostavi ravnotežje med vlago v zraku in lastno vlago. Psihrometri delujejo na principu merjenja relativne vlage z dvema termometroma, mokrim in suhim. Mokri termometer se hladi zaradi izhlapevanja vode in glede na temperaturno razliko med njima lahko sklepamo na relativno vlago v zraku. Lahko pa merimo tudi s pomočjo Peltierovega efekta. Peltierov efekt je pojav, ko z enosmernim električnim tokom hladimo spojno mesto dveh različnih kovin. Hladimo psihrometer, dokler ni temperatura enaka temperaturi rosišča. S pomočjo štiričlenskega mostička na katerem merimo električni tok in napetost pa lahko določimo temperaturo. Ob rosišču izmerjeni

temperaturi določimo relativni parni tlak vode in količnik $p_{v1} \cdot p_{v0}^{-1}$. Med psihrometre, ki delujejo na principu rosišča, spada naš potenciometer WP4-T (proizvaja Decagon).

2.7 Retenzijska krivulja - »SWCC«

Vezanje vode glede na sukucijo sledi določenemu pravilu. Pri vlaženju suhe zemljine pride najprej do kationske izmenjave, nato pa se voda fizično veže na površino zrn (adsorpcija). Najmanjšo sukucijo oz. najvišjo vlago, pri kateri ima zemljina vodo vezano samo na zrna, imenujemo točka rezidualne vlage. Ko zemljina preide točko rezidualne vlage, ima vodo vezano tudi v porah in kapilarah. Naraščanje vlage se konča, ko se vse pore zapolnijo z vodo. Tej točki pravimo točka vstopa zraka. Vrednost sukucije v točki vstopa zraka je odvisna od velikosti največjih por. Oblika retenzijske krivulje – »SWCC« (soil water characteristic curve) je odvisna od adsorpcijskih sposobnosti zemljine, velikosti por, zgoščenosti in od tega ali se zemljina moči ali suši. V splošnem prikazuje obliko in značilne točke ter območja retenzijske krivulje slika 13.



Slika 13: Retenzijska krivulja – SWCC (Zhou in Yu, 2004)

Retenzijsko krivuljo opišemo s pomočjo empirično določenih funkcij, saj zaenkrat ni analitično izpeljane formule za opis retenzijske krivulje. Pri vrednotenju rezultatov smo uporabili funkcije štirih različnih avtorjev (iz programa SoilVision in knjige Marshall in Holmes, 1988 (Visser)). Njihove enačbe so zapisane spodaj.

○ **Fredlund in Xing** (1994)

$$w = w_S \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_R}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_R}\right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\left(\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right) \right)^{m_f}} \right] \quad (2.35)$$

w_S ...vlaga pri popolni zasičenosti

ψ ...sukcija

ψ_R ...sukcija pri rezidualni vlagi

e ...exp(1)

a_f, n_f, m_f ...oblikovni parametri funkcije določeni po metodi najmanjših kvadratov

○ **Van Genuchten** (1980)

$$w = w_R - (w_S - w_R) \cdot \left[\frac{1}{\left(1 + (a_{VG} \cdot \psi)^{n_{VG}} \right)^{m_{VG}}} \right] \quad (2.36)$$

$$m_{VG} = 1 - n_{VG}^{-1}$$

w_R ...rezidualna vlaga

a_{VG}, n_{VG}, \dots oblikovna parametra funkcije določena po metodi najmanjših kvadratov

○ **Brooks in Corey** (1964)

$$w = w_R - (w_S - w_R) \cdot \left[\frac{a_C}{\psi} \right]^{n_C} \quad (2.37)$$

a_C, n_C ... oblikovna parametra funkcije določena po metodi najmanjših kvadratov

○ **Visser** (1969)

$$\psi = a_V \cdot w^{b_V} \quad (2.37)$$

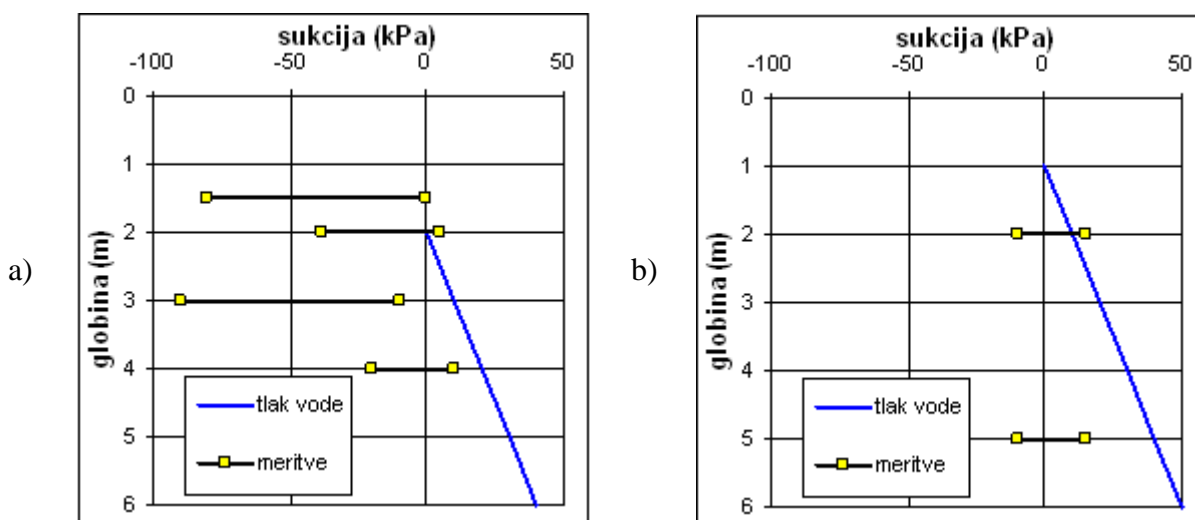
a_V, b_V ...oblikovna parametra funkcije določena iz prikaza retenzijske krivulje v log(w)/log(s) skali

2.8 Povezava sukcije z drugimi karakteristikami zemljin

Sukcija vpliva na lastnosti zemljin in je pomembna količina v mehaniki nezasičenih zemljin. Zmanjšanje sukcije zniža tudi trdnost zemljine, kar lahko povzroči tudi zdrs brežine. Zemljine z visoko sukcijo so zaradi z zrakom zapolnjenih kapilar neprepustne in se kot take uporabljajo za tesnilne namene. Prav tako sukcija zagotavlja vodo nad nivojem talne vode in s tem omogoča dostopnost vode rastlinam tudi na z vodo nezasičenih območjih. Hkrati pa zvišanje sukcije onemogoča rastlinam črpanje vode, ki je potrebna za rast.

Znano dejstvo je, da na hitrost izhlapevanja vode vpliva več stvari. Tri izmed njih so površina nekega predmeta proti njegovemu volumnu (specifična površina), pot do površine in izpostavljenost vetru. Kdorkoli je že kdaj sušil perilo ve, da se perilo najhitreje posuši, če se ga razprostre (obesi) na neko vetrovno mesto. Podoben vpliv na sušenje tal imajo rastline, saj s svojimi listi povečujejo specifično površino in izpostavljenost vetru ter s koreninami črpajo vodo iz večjih globin. S sušenjem tal pa se povečuje sukcija in tako so rastline nekakšen ustvarjalec sukcije.

V izjemnih primerih lahko opazimo, da ima tudi vrsta rastlinja na pobočjih vpliv na stabilnost. S slike 14 vidimo, da brežine poraščene z drevesi v zemljini ustvarjajo višje sukcije in na večjih globinah kakor tiste poraščene s travo (Scott, 2006). V konkretnem primeru je to pomenilo, da so bile brežine poraščene z drevjem stabilne, tiste s travo pa ne.



Slika 14: Vpliv poraščenosti z a) drevesi in b) travo na sukcijo (Scott, 2006).

2.8.1 Vpliv na trdnost zemljin

Efektivne napetosti izračunamo po enačbi 5.1:

$$\sigma' = \sigma - p \quad (2.38)$$

Ker je p tlak vode v zemljini in ker je sukcija negativni tlak, vidimo, da sukcija poveča tlačno napetost v zemljini. Efektivna tlačna napetost je povezana s strižno trdnostjo zemljine. Tako bi imeli izjemno visoko strižno trdnost suhih zemljin, saj bi imeli zelo visoko sukucijo. Vendar temu ni tako, saj enačba 2.38 velja le za zasičene zemljine. Tako enačbo 2.39 popravimo s funkcijo K , ki predpostavlja vpliv zasičenosti. K je določena glede na eksperimente (Bishop 1959):

$$\sigma' = \sigma - K \cdot p \quad (2.39)$$

Če enačbo 2.39, vstavimo v enačbo za strižno trdnost zemljine, dobimo:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \cdot (K \cdot \tan(\varphi')) \quad (2.40)$$

τ ...strižna trdnost

c' ...kohezija

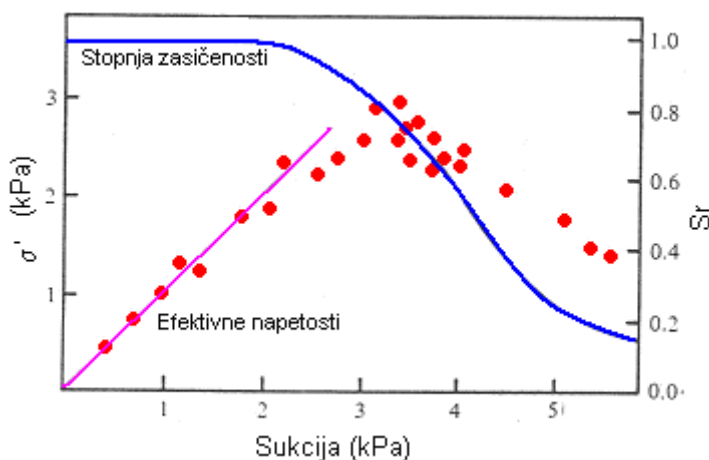
φ' ...strižni kot

$(\sigma_n - u_a)$...normalni tlak

$(u_a - u_w)$...sukcija

Drugi avtorji so predlagali drugačne zveze. Med njimi na primer Fredlund et al. (1978):

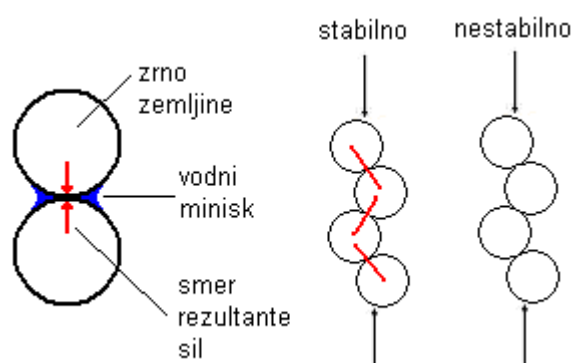
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan(\varphi^a) + (u_a - u_w) \cdot \tan(\varphi^b) \quad (2.41)$$



Slika 15: Prirast efektivnih napetosti z večanjem sukucije (Marshall in Holmes, 1988)

Dejanske meritve efektivnih napetosti s sukcijsko vidimo s slike 15. Efektivna napetost v zemljini narašča sorazmerno do točke vstopa zraka. Nato pa začnejo upadati z manjšanjem zasičenosti.

Teoretična razlaga pojava povečanja trdnosti je povezana s kapilarnim učinkom. Voda se zadržuje med zrninami in tvori drobne upognjene površine. Le-te preko površinske napetosti povežejo zrna med sabo (slika 16) in s tem povečajo efektivne napetosti. Dodatno pa zmanjšujejo trdnost v zemljini razpoke in adsorpcija vode.



Slika 16: Sila, ki jo povzroči vodni menisk (Geotechnical Observations)

2.8.2 Obtežba in sukcija gline

Pri čistih zasičenih glinah velja, da se na začetku vsa obtežba prenese na vodo v porah (za razliko od peskov, kjer se obtežba hitro porazdeli med zrna) in le-ta se začne izcejšati. Temu pojavu pravimo konsolidacija. Glina se bo krčila, dokler ne bo obtežba enaka sukcijski (obtežba iztiska vodo enako močno kakor jo voda privlači).

2.8.3 Prepustnost zemljin

Stopnja zasičenosti zemljine ima velik vpliv na prepustnost zemljine, saj voda teče le po porah, ki so zapolnjene z vodo (slika 18). Tako z nižanjem stopnje zasičenosti pada prepustnost zemljin do rezidualne vlage, ko zemljina postane popolnoma neprepustna. Ker je zasičenost povezana s sukcijsko, lahko predpostavimo zvezo med sukcijsko in prepustnostjo. V literaturi se najpogosteje citira naslednja enačba:

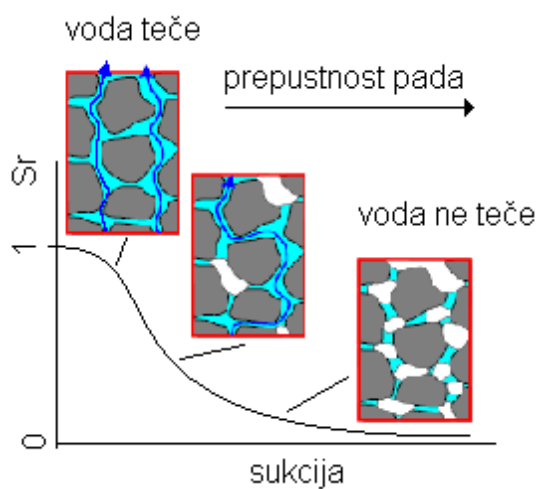
- Van Genuchten (1980)

$$k = k_s \left(\frac{\left(1 - (a_{VG} \cdot \psi)^{n-1} \cdot \left(1 + (a_{VG} \cdot \psi)^{n_{VG}} \right)^{-m_{VG}} \right)}{\left(1 + (a_{VG} \cdot \psi)^{n_{VG}} \right)^{\frac{m_{VG}}{2}}} \right)^2 \quad (2.42)$$

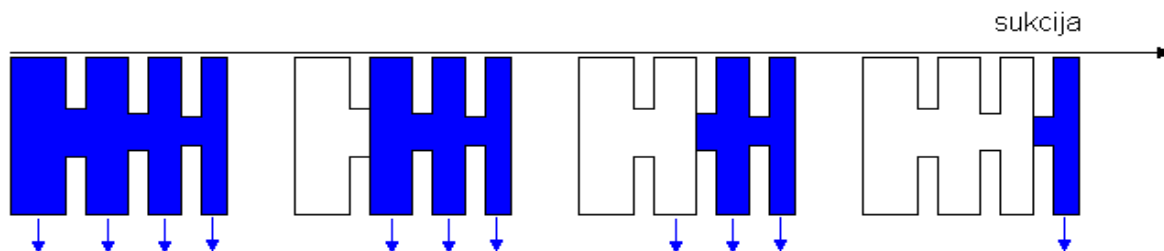
$$m_{VG} = 1 - n_{VG}^{-1}$$

k_s ...prepustnost zasičene zemljine

a_{VG}, n_{VG}, m_{VG} ...oblikovni parametri funkcije določeni po metodi najmanjših kvadratov



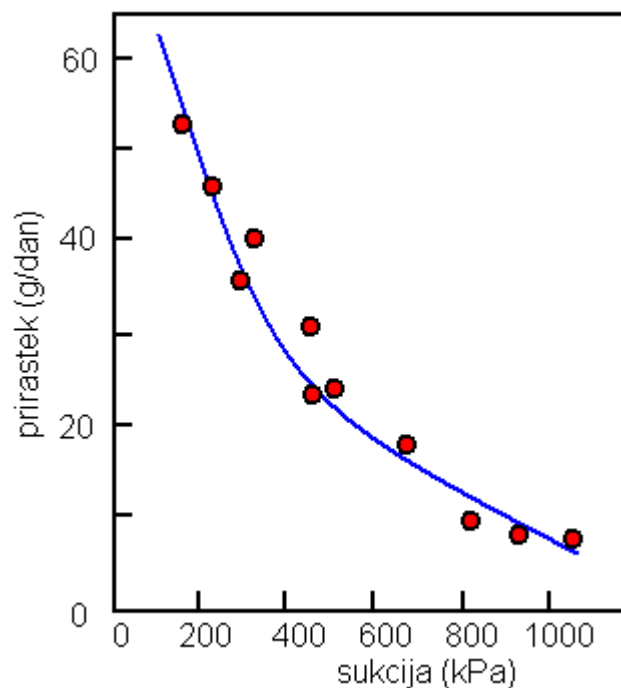
Slika 17: Vpliv sukcije na prepustnost.



Slika 18: Zapolnjenost por v odvisnosti od sukcije (Bouma, Brown in Rao, 2003)

2.8.4 V agronomiji

Za agronomijo je najbolj pomemben vpliv sukcije na rast rastlin. S slike 19 vidimo, da rastline dobro uspevajo v tleh z nizko sukcijo, njihova rast z naraščanjem sukcije hitro upada.



Slika 19: Prirastek rastlin na dan glede na sukcijo v zemljini (Marshall in Holmes, 1988).

3 METODE MERJENJA SUKCIJE

3.1 Uvod

V tem poglavju so opisane naprave za merjenje sukcije, ki smo jih uporabili pri naših meritvah. Uporabili smo tenziometer in tlačni lonec za merjenje sukcij manjših od 100 kPa ter potenciometer in metodo filter papirja za merjenje sukcij višjih od 100 kPa. Vsaka naprava ima svoj način merjenja sukcije opisan v poglavju 2.6, zato bom tukaj predstavil le splošne značilnosti dela s posameznimi napravami. V diplomski nalogi uporabljene naprave so palični tenziometer z rezervoarjem vode in merilno urico, filter papir Schleicher & Schell No.589/2, potenciometer WP4-T proizvajalca Decagon in Enslinov aparat proizvajalca Testing Bluhm & Feuerherdt. Meritve s tlačnim loncem pa so naredili na Biotehnični fakulteti (Univerza v Ljubljani). V prilogah so priloženi obrazci in podrobna navodila za delo z napravami, v preglednici 4 pa merska območja, čas merjenja in opombe k meritvam.

Preglednica 4: Pregled uporabljenih merskih metod z osnovnimi podatki (v oklepaju lastna opazovanja).

naprava	standard	mersko območje	čas preiskave	masa vzorca
palični tenziometer	ASTM D 3404	0-85 kPa	1 dan	500 g
filter papir	ASTM D 5298	10 - 100.000 kPa (totalna od 400 kPa)	7 dni (14 dni)	400 g
tlačni lonec	ASTM D 2325 ASTM D 3152	0 - 1.500 kPa	2 dni	125 g
potenciometer		0 - 60.000 kPa (100 - 300.000kPa)	30 minut	20 g
vodov pojnost (Enslin)	DIN 18132	0 kPa	do 3 dni	20 g

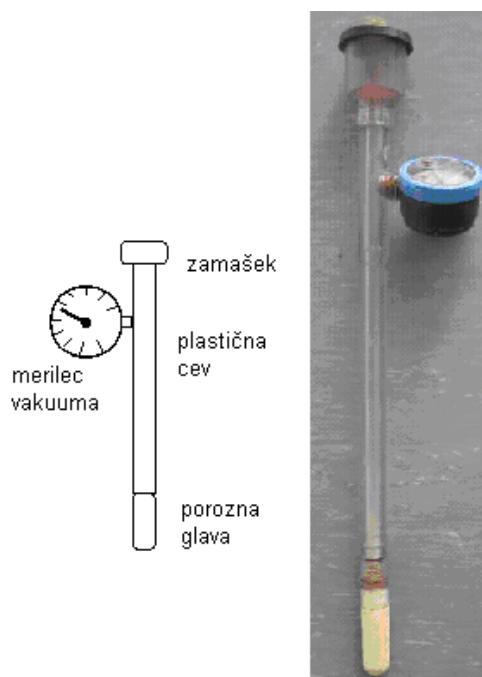
3.2 Opisi naprav in preiskav

3.2.1 Palični tenziometer

3.2.1.1 Opis naprave in princip meritve

Tenziometer je naprava, ki se uporablja v kmetijstvu. Z njim določimo energijo, s katero mora rastlina črpati vodo iz tal. Meri le matrični potencial in ne tudi osmotskega potenciala, zato ni primeren za meritev v slanih tleh. Tenziometer je z vodo zapolnjena cev, ki ima na eni strani keramično glavo, na drugi strani pa urico, ki meri tlak. Meritev opravimo tako, da keramično glavo vstavimo v zemljino. Sukcija zemljine povzroči podtlak v tenziometru, ki se čez čas izenači s sukciijo. Takrat je odčitek tlaka na urici enak sukaciji zemljine. Tenziometer meri sukacije na območju od 0 do 85 kPa, saj višjih ne more zaradi kavitacije vode in izhajanja plinov iz nje. Pri sukacijah, višjih od 85 kPa, se vodni stolpec prekine in tenziometer je potrebno ponovno pripraviti za uporabo, kar ne omogoča stalne rabe. Čas do vzpostavitve ravnotežja med zemljino in tenziometrom je odvisen od prepustnosti keramične glave, natančnost meritve pa od natančnosti manometra.

Podrobnejša navodila za merjenje sukacije s tenziometrom podaja standard ASTM D 3404.



Slika 20: Tenziometer (levo: Smajstrla in Pitts, 2005).

3.2.1.2 Opis meritev s tenziometrom

3.2.1.2.1 Priprava tenziometra

Tenziometer najprej dobro operemo, tako da odstranimo kose zemljine, alge in bakterijske prevleke. Očistimo cev kakor tudi keramično glavo, pri tem pa si pomagamo s krpo in krtačo za cevi primerne premera. Keramično glavo pustimo čez noč v vodi, da se v celoti zapolni z vodo. Naslednji dan tenziometer napolnimo z vodo in pritrdimo keramično glavo. Pred tem med tenziometer in keramično glavo vstavimo tesnilo. Z vakuumsko črpalko odstranimo ves odvečen zrak iz naprave.

Pred meritvijo lahko preverimo še naslednje:

- Zrakotesnost tenziometra preverimo tako, da ga izpostavimo podtlaku in preverimo, da se ne pojavijo zračni mehurčki okoli stikov. Če nastanejo mehurčki, zamenjamo tesnila in še enkrat preverimo zrakotesnost. Obstaja tudi možnost, da pušča stik v keramični glavi med keramiko in plastičnim delom. V tem primeru zamenjamo keramično glavo ali poškodovani stik popravimo.
- Preverimo pravilnost delovanja urice. Najlažje to naredimo tako, da namesto keramične glave na tenziometer pritrdimo vakuumsko črpalko in jo nastavimo na večji podtlak. Le tega postopno zmanjšujemo in preverjamo meritve podtlaka na tenziometru in vakuumski črpalki. Če se le-te razlikujejo, zamenjamo oziroma popravimo merilno urico.
- Sledi le še test prepuščanja vode skozi keramično glavo. Če tenziometer pustimo na zraku nekaj časa, bo voda na keramični glavi izhlapevala in ustvarjala podtlak na celotnem območju tenziometra. S to metodo pa lahko preverimo tudi zrakotesnost tenziometra, saj lahko pri tem opazimo pojav mehurčkov.

Povzeto po Smajstrla in Pitts, 2005.

3.2.1.2.2 Meritev s tenziometrom

Meritve lahko naredimo le na rahlih zemljinah, saj moramo celotno keramično glavo tenziometra vtisniti v zemljino. Za potrebe kmetijstva se tenziometer potisne do globine korenin, saj jih zanima energija, s katero morajo zemljine črpati vodo. Za potrebe določitve retenzijske krivulje pripravimo približno 0,5 kg zemljine, ki jo damo v posodo in pokrijemo s plastično folijo. Tenziometer vtisnemo v zemljino skozi luknjo v foliji in počakamo na vzpostavitev ravnotežja. Zapišemo odčitek na urici in odvezamemo del zemljine za določitev vlage.

3.2.2 Metoda s filter papirjem

3.2.2.1 Opis naprave in princip meritve

Meritev sukcije s filter papirjem deluje na principu relativne vlage v zraku. Če za dani filter papir določimo vlago v odvisnosti od relativne vlage oziroma posredno sukcije, lahko iz znane vlage filter papirja sklepamo o sukciji zemljine. Obstaja tudi način vgradnje filter papirja med vzorec. V tem primeru se bo filter papir obnašal kot porozni material. Navlažil se bo na neko vlago, ki bo ustrezala sukciji zemljine. V tem primeru merimo le matrični potencial, ker ioni v vodi prosto prehajajo iz zemljine v filter papir. Tudi sedaj lahko določimo krivuljo vlage filter papirja glede na sukcijo. Slabost metode je razmeroma dolg čas do vzpostavitve ravnotežja in preverjanje ravnotežja. Ravnotežje se vzpostavlja približno 7 dni. Ali se je ravnotežje že vzpostavilo, ne vemo, saj vlage filter papirja med samo meritvijo ne moremo preverjati. Lahko pa vgradimo kontrolni vzorec, ki ga pustimo dalj časa stati in preverimo rezultate med obema vzorcema.

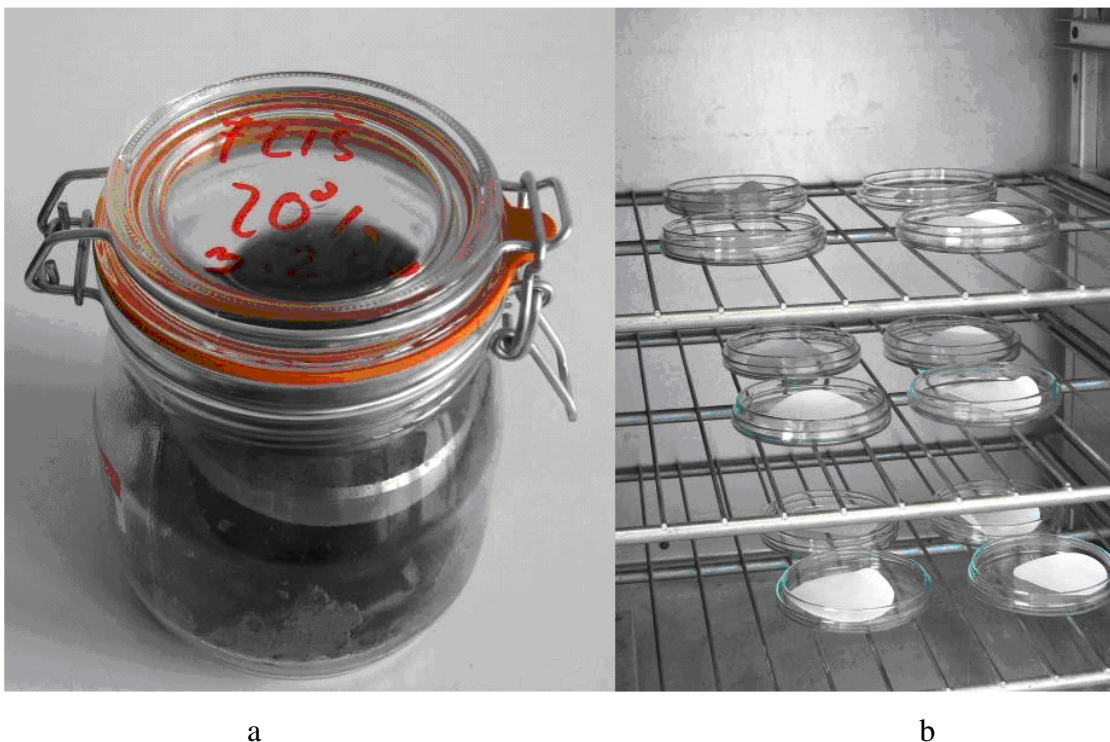
S pomočjo te metode lahko dobro ocenimo sukcije zemljin na zelo velikem območju od 10 kPa pa do 100.000 kPa. Metoda ima več pomanjkljivosti, ki omejujejo natančnost meritve. Najbolj očitne so:

- Sukcijo merimo posredno preko neke funkcije vlage pri tem pa naredimo napako zaradi posplošitve linije (dejanske meritve odstopajo do 2% od generalizirane linije).
- Razlike med filter papirji (iste serije)

- Nepravilnosti vgradnje in rokovanja s filter papirjem (izgube vlage filter papirja pri prenosu iz vzorca do tehtanja, prah na filter papirju, dotik posodice,..).

Po standardu veljata dve meritvi za uspešni, če med njima ni večje razlike kot 0,5 pF.

Podrobnejša navodila za merjenje sukcije s filter papirjem podaja standard ASTM D 5298.



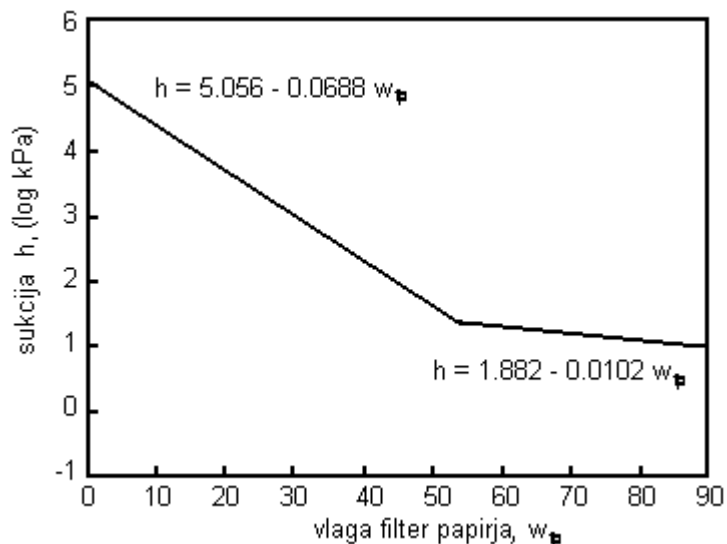
Slika 21: a) Kozarec z vzorcem, b) sušenje filter papirjev v peči

3.2.2.2 Opis meritev

3.2.2.2.1 Kalibracija filter papirja

Ločimo kalibraciji za celotno in matrično sukcijo. Pri visokih vrednostih sukcije upoštevamo, da sta matrična in celotna sukcija enaki. Če hočemo meriti matrično sukcijo, za meritev pripravljen filter papir položimo na keramično ploščo v tlačnem loncu in sledimo postopku merjenja sukcije s tlačnim loncem. Za merjenje celotne sukcije je postopek kalibracije enak meritvi na zemljini, le da tokrat zemljino zamenja vsaj 5 cm³ raztopine z znano sukcijo. Iz

danih meritev pa nato določimo kalibracijsko krivuljo (klasično dve logaritemski premici) (slika 22).



Slika 22: Kalibracijska krivulja za uporabljeni filter papir (Schleicher & Schell No.589/2) (ASTM D 5298-94)

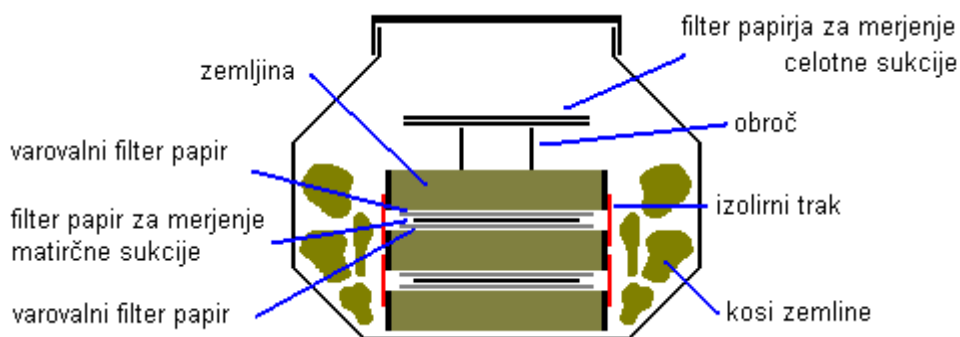
Preglednica 5: Vrednosti osmotskih potencialov raztopin (ASTM standard D 5298-94)

pF	g NaCl/1000 ml H ₂ O (20°C)	g KCl/1000 ml H ₂ O (20°C)
3,0	1,3	1,7
3,5	3,8	5,3
4,0	13,1	17,0
4,5	39,0	52,7
5,0	122,5	165,0

3.2.2.2.2 Postopek priprave vzorca

Pred začetkom meritve moramo filter papir sušiti v peči na 110°C vsaj 16 h, nato pa ga dati v eksikator. Zemljino pripravimo, ko imamo pripravljen filter papir. Načinov priprave zemljine je več, vsi pa sledijo istemu načelu. V vzorec zemljine vtisnemo valjast nož premera 70 mm ter poravnamo zemljino. Tako pripravimo tri valje zemljine. Na površino zemljine položimo filter papir premera 70 mm, na njega položimo papir premera 60 mm tako, da leži v sredini spodnjega filter papirja. Pokrijemo s filter papirjem premera 70 mm in drugim valjem

zemljine. V sendviču filter papirjev meri srednji filter papir matrično sukucijo, ostala dva pa preprečujeta, da bi se sredinski filter papir umazal z delci zemljine. Zato moramo paziti, da ne gleda del sredinskega filter papirja izven sendviča. Prav tako velja pravilo, da se filter papirjev dotikamo le v rokavicah ali s pinceto. Enak sendvič filter papirja položimo še med drugi in tretji valj zemljine. Ko s pripravo vzorcev končamo, imamo stolp treh valjev zemljine, med njimi pa sendvič filter papirjev. Da bi preprečili izsuševanje filter papirjev po obodu valja, stik med valji prelepimo z izolirnim trakom. Vse skupaj vstavimo v kozarec za vlaganje in vmesni prostor narahlo zapolnimo s kosi iste zemljine, ki ji merimo celotno sukucije. Na vzorec postavimo manjši obroč iz nerjavečega jekla, na njega pa položimo dva filter papirja premera 70 mm, s katerima merimo celotno sukucijo. Vrhnja filter papirja predhodno zapognemo, da ju kasneje hitreje izvlečemo. Pokrov kozarca obrišemo, da preprečimo padec umazanije na filter papir. Kozarec zapremo in označimo z oznako vzorca in datumom vgradnje. Postavimo ga v izolirano posodo (hladilno torbo), da zagotovimo konstantno temperaturo. Po najmanj sedmih dneh lahko pričakujemo, da se je ravnotežje že izpostavilo.



Slika 23: Prikaz sestave vzorca za meritev sukucije s filter papirjem.

3.2.2.2.3 Meritev vlage filter papirja

Zaradi majhne mase filter papirja vse mase tehtamo na $\pm 0,0001$ g natančno. Stehramo hranilno posodico (vrečka, petrijevka, kovinska posoda s pokrovom). Filter papir iz zemljine nato čim hitreje s pinceto prenesemo v posodico. To delo vedno opravljata dva, saj moramo prenos filter papirja opraviti v 5 s. Pokrito posodico s filter papirjem stehramo, odkrijemo in damo sušiti v peč za vsaj 2 h na $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Po končanem sušenju posodico pokrijemo in

damo v eksikator, da se ohladi. Ponovno jo stehtamo z in brez filter papirja. Iz dobljenih štirih mas določimo vlago filter papirja in posredno preko kalibracijske krivulje še sukucijo. Zemljini določimo maso in gostoto.

Poglavje 3.2.2 povzeto po ASTM standardu D 5298-94

3.2.3 Tlačni lonec

3.2.3.1 Opis naprave in princip meritve

Tlačni lonec je naprava podobna ekonom loncu. Z vodo zasičene vzorce položimo na z vodo zasičeno porozno ploščo, ki omogoča prehajanje ionov iz zemljine, zato merimo le matrični potencial. Problem naprave je v tem, da moramo za pravilno delovanje naprave zagotoviti zveznost vode. To pomeni, da morajo biti vzorci in porozna ploščica zasičeni in v porozno ploščo ne smejo vstopati zračni mehurčki (ne smemo preseči točke vstopa zraka porozne ploščice). Iz vzorca izpostavljenega nekemu tlaku prične iztekati voda. Iz vzorca se iztisne toliko vode, da se vzpostavi ravnotežje med tlakom, ki hoče iztisniti vodo iz vzorca in sukucijo, ki hoče vodo potegniti v vzorec.

Naprava je omejena s tlakom, ki ga zdrži posoda in tlakom pri katerem vstopi zrak v porozno ploščo. Tlačni lonci imajo tako območje do 10 MPa, čeprav so običajne omejitve porozne ploščice 1,5 MPa. Pri nizkih tlakih v posodi (do 100 kPa) ujeti mehurčki zraka v zemljini znižajo izmerjeno matrično sukucijo.

Podrobnejša navodila za merjenje sukucije s tlačnim loncem podajata standarda ASTM D 2325 in D 3152.

3.2.3.2 Opis meritev

3.2.3.2.1 Priprava vzorca

Vzorci so lahko različno pripravljene – zbiti, paste, naravni vzorci. Za vse velja enaka zahteva, da morajo biti zasičeni. To naredimo tako, da vzorce položimo na zasičeno porozno ploščo. Nivo vode na porozni plošči postopoma zvišujemo do vrha vzorcev in jih tako preplavljene pustimo stati 1 dan. V našem primeru smo v tlačnem loncu merili nizke sukcije (do 100 kPa). V ta namen smo vzorec navlažili na mejo vodovpojnosti (Enslin) in ga dobro premešali, tako da smo dobili enakomerno pasto.



Slika 24: Tlačni lonec (Biotehniška fakulteta, UL)

3.2.3.2.2 Meritev

V tlačni lonec nastavimo nosilce poroznih plošč. Porozne plošče potopimo v vodo, da se z njo prepojijo. V tlačni lonec položimo porozno ploščo ter na njo postavimo valjaste nožke, ki jih zapolnimo z vzorci. Na isti plošči naj bodo vzorci s podobnimi karakteristikami. Na porozno ploščo nalijemo približno 10 mm vode in jo pustimo stati en dan (zasičenje vzorcev).

Naslednji dan vodo s površine plošče odstranimo. Nastavimo cev, ki povezuje porozno ploščo z iztokom. Na tlačni lonec pritrdimo pokrov in v njega spustimo zaželeni tlak. Opazujemo pretok vode skozi iztoke posameznih keramičnih plošč. Ko voda preneha teči, je meritev končana (na koncu cevi iztoka ne nastajajo več kapljice). To traja različno dolgo, saj je pretok odvisen od prepustnosti vzorcev. V posodi zmanjšamo tlak ter odstranimo pokrov. Porozne plošče dvignemo iz tlačnega lonca, vzorce s pomočjo ploščatega noža odstranimo in jim določimo vlago.

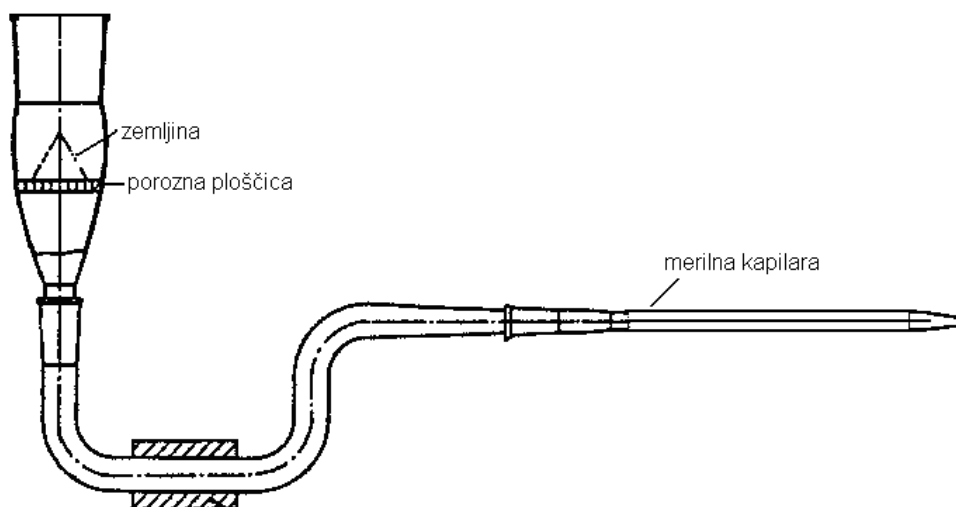
3.2.4 Meritev vodovpojnosti – Enslin/Neff postopek

3.2.4.1 Opis naprave in princip meritve

Vpijanje (absorpcija) vode je karakteristična vrednost vsake zemljine in je odvisna od površine delcev ter sposobnosti vezanja vode na njih. V gradbeništvu se uporablja predvsem za ugotavljanje ustreznosti ali kakovosti glin za tesnilne sloje.

Enslin/Neff aparat sestoji iz kapilare z merilno razdelbo in steklenega valja povezanega s kapilaro. Kapilara in steklen valj sta preko brušenih stikov zrakotesno povezana. V steklenem valju je na višini 3 cm nad kapilaro vstavljena porozna ploščica. Ko Enslinov aparat postavimo v vodoravno lego in ga zapolnimo z vodo, na porozno ploščico stresemo vzorec. Vzorec zemljine, ki je popolnoma suh, začne srkati vodo. Vlaži se toliko časa, dokler ni njegova sukcija enaka 0 kPa, saj je podvržen le zunanjemu tlaku (relativni tlak je 0 kPa). Iz izmerjenega volumna vsrkane vode in znane teže vzorca zemljine se izračuna vlaga.

Podrobnejša navodila za merjenje vodovpojnosti z Enslin/Neff postopkom podaja standard DIN 18132.



Slika 25: Enslinov aparat (interna navodila LMT, FGG 2003)

3.2.4.2 Opis meritev

3.2.4.2.1 Priprava vzorca

Približno 20 g posušene (v peči na $105 \pm 5^\circ\text{C}$) zemljine presejemo skozi sito 0,4 mm. Presejek shranimo do meritve v eksikatorju.

3.2.4.2.2 Priprava aparata

Preverimo ali so sestavni deli aparata čisti in jih po potrebi očistimo. Brušene dele stekla namočimo, da se lepo sprimejo. Prav tako namočimo drenažno ploščico. Na konec kapilare nastavimo cevko katere drugi konec potopimo v destilirano vodo. S podtlakom v aparat načrpamo vodo (to lahko naredimo kar z usti), tako da voda pokrije drenažno ploščico. Preverimo, da ni zračnega mehurčka pod drenažno ploščico. Če je, s tlakom izpihamo vodo pod ploščico in ponovimo posrkamo vodo. Nato s tlakom in nagibanjem iz aparata iztisnemo preostale mehurčke. Pri tem pazimo, da ne spustimo nivoja vode pod drenažno ploščico. Aparat postavimo v vodoraven položaj, snamemo cevko s kapilare in pustimo, da preostala voda odteče. Nato s papirnato brisačo narahlo obrišemo drenažno ploščico, tako da se nivo vode v kapilari premakne v merilno območje. Preverimo še, ali aparat stoji pokončno.

3.2.4.2.3 Meritev

Suh in v eksikatorju ohlajen vzorec odtehtamo z natančnostjo $\pm 0,01$ g. Količina vzorca, ki ga vgradimo v aparat, je odvisna od pričakovane vodovpojnosti. Če je pričakovana vodovpojnost manjša od 80%, odtehtamo 1 g vzorca sicer 0,2 g. Vzorec odtehtamo na plastificiranem papirju. Zabeležimo začetni odčitek na kapilari. Vzorec s pomočjo lijaka nasujemo na drenažno ploščico tako, da vzorec oblikuje stožec. Če pričakujemo, da bo meritev trajala dlje od 15 minut, namestimo zamašek s katerim preprečimo izhlapevanje vode. Odčitke na kapilari odčitavamo po 30 s, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60 minutah in 2, 4, 6 in 24 urah. Meritev pa predčasno končamo, če se zaporedna odčitka ne razlikujeta med seboj. Če se po 24 urah odčitek na kapilari še ni umiril, preiskavo končamo vendar to zapišemo med opombe. Pri preizkusih daljših od 1 ure naredimo še popravek zaradi izhlapevanja vode. V aparat damo samo vodo in naredimo odčitke po 1, 2, 4, 6 in 24 urah. Te spremembe odčitkov na kapilari predstavljajo vpliv izhlapevanja vode in jih odštejemo od prejšnjih odčitkov. Za vsako preiskavo velja, da je rezultat povprečje treh meritev. Zato zgoraj opisani postopek ponovimo še dvakrat. Aparat razstavimo, da preprečimo zlepljenje obrušeni delov. Pri vrednotenju preiskave poleg povprečne vodovpojnosti na poseben graf rišemo tudi vlago vzorca v odvisnosti od logaritma časa. Z grafa razberemo kako hitro vzorec posrka vodo vase.

Poglavje 3.2.4 povzeto po internih navodilih za preiskavo.

3.2.5 Potenciometer

3.2.5.1 Opis naprave in princip meritve

Meritev sukcije s pomočjo potenciometra deluje na principu relativne vlage v zraku. Z ohlajanjem zraka se relativna vlaga povečuje do 100% vlage, oziroma do točke rosišča. To temperaturo meri potenciometer tako, da sveti z laserskim žarkom na ogledalce in ga ohlaja. Na njem se pri temperaturi rosišča pojavi kondenz, tako da postane neodbojno in prekine laserski žarek. Naprava izmeri temperaturo ogledalca in temperaturo okolice. Preko zveze (enačba 2.34) dobi relativno vlago v zraku in sukucijo zemljine. Naprava meri tudi temperaturo vzorca, saj ta ne sme biti prevroč ali prehladen pri vgradnji. Prevroč in vlažen vzorec lahko

povzroči kondenz po celi površini komore (tudi na površini laserja) in s tem onemogoči meritev. Prehladen vzorec pa lahko povzroči nepravilno meritev in dobimo previsoko vrednost sukcije. Dobra lastnost naprave je hitra meritev in široko območje (0-60.000 kPa), vendar njeno uporabo v primeru merjenja nizkih sukcij omejuje natančnost 100 kPa.

3.2.5.2 Opis meritev

3.2.5.2.1 Priprava vzorca

Naprava meri sukcijo zemljin na majhnih vzorcih. Za določitev sukcije naravnega materiala vzamemo koščke zemljine in jo nadrobimo, da se ji poveča površino. Za določitev retenzijske krivulje pa se približno 40 g zemljine posuši, preseje skozi sito 0,4 mm in shrani do meritve v eksikatorju. Približno štiri grame zemljine navlažimo na zeleno vlago in vgradimo v plastično posodico. Rob posodice očistimo in pokrijemo s pokrovčkom. Vzorce položimo na napravo zaradi temperaturne uskladitve.



a)

b)

Slika 26: a) potenciometer z računalnikom in tehtnico, b) potenciometer

3.2.5.2.2 Priprava naprave

Potenciometer in računalnik vključimo. Na računalniku zaženemo program »HyperTerminal«. Na napravi vključimo možnost stalnega merjenja sukcije. V napravo vstavimo 0,5 molalno raztopino KCl, ko se temperatura v napravi ustali na 25°C. Naprava je umerjena, če je odčitek naprave med 2,1 in 2,3 MPa. Drugače jo je potrebno umeriti tako, da na napravi zaženemo

meni nastavitve začetne točke. S ponovno meritvijo odčitamo vrednost sukcije, le da tokrat povemo velikost odčitka (2,2 MPa). Vrednost potrdimo in naprava je pripravljena za meritev.

3.2.5.2.3 Meritev

Posodici z vzorcem odstranimo pokrovček in jo vstavimo v napravo. V primeru, da je vzorec višje temperature kot naprava, počakamo, da se ohladi (na zaslonu je prikazana negativna temperaturna razlika). Vzorec pustimo toliko časa v napravi, dokler se meritve sukcije ne umirijo. To vidimo na izpisu programa »HyperTerminal«. Pri visokih sukcijah (nad 2 MPa) je dovolj, če se meritve umirijo v pF skali. Vzorec odstranimo iz naprave ter mu izmerimo vlago. Meritve sukcije in vlage vnesemo v preglednico.

3.3 Praktično delo

V sklopu diplomske naloge smo merili sukcijo s pomočjo metode filter papirja, tenziometra in potenciometra. Zemljinam smo izmerili tudi vodovpojnost. Podatki pri nizkih sukcijah so bili pomanjkljivi, zato smo izvedli preiskave tudi na tlačnem loncu. Najprej smo določili retenzijske krivulje na referenčnih materialih, spodnjo mejo na čisti kameni moki, zgornjo mejo pa na bentonitu. Preostale meritve smo naredili na sivici in flišu. Te zemljine so bile izbrane zaradi svoje nabreklijve narave.

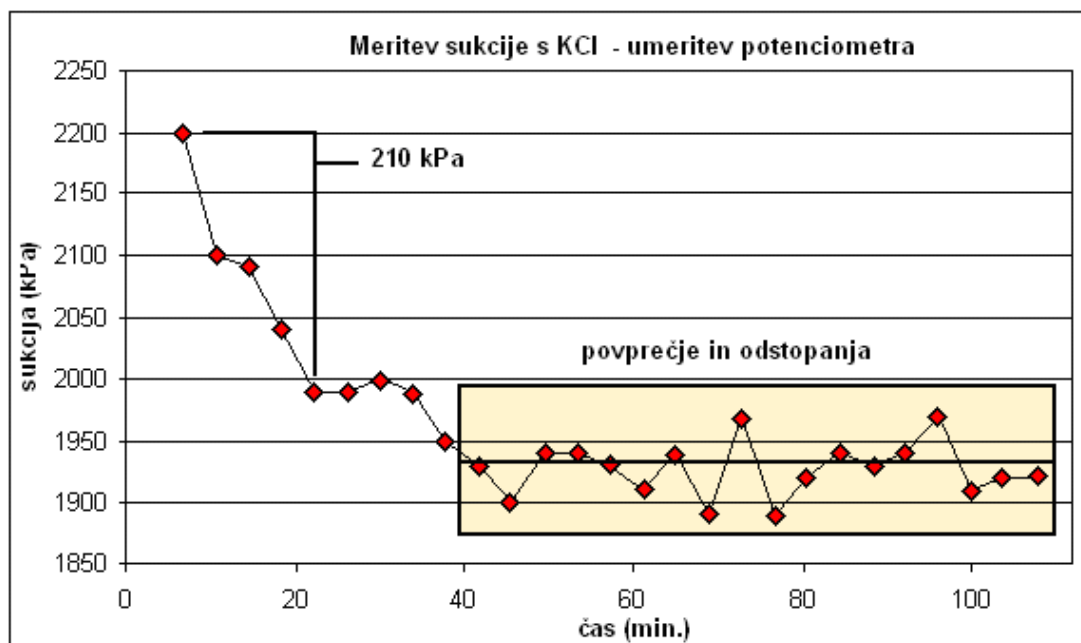
V Laboratoriju za mehaniko tal se meritev sukcije še ni izvajalo, zato smo postopke dela ob pomoči standardov in opisov meritev iz literature spreminjali tern dopolnjevali s sprotimi izkušnjami. Pri tem je marsikaj temeljilo na poizkušanju, učenju na napakah in presoji rezultatov. Najbolj očiten primer prilagajanja postopka meritve je bilo merjenje s potenciometrom, kar je v naslednjem poglavju na kratko opisano.

3.3.1 Prilagajanje meritve

Zaradi pomanjkanja podatkov o merjenju s potenciometrom iz literature in neizkušenosti se je postopek meritve sprotno dopolnjeval. V tem poglavju so opisni glavni problemi, ki so nastali med merjenjem in popravki postopka.

o Umiritev meritve

Na začetku smo nameravali ročno odčitavati meritve sukcije, zato naprava ni bila priključena na računalnik. Zaradi nepoznane natančnosti meritev, razen podatka o merski natančnosti naprave 100 kPa ali 1 %, in stalnosti umeritve smo nameravali narediti meritve na treh vzorcih iste vlage s predhodno umeritvijo in preverjanjem umeritve po koncu preiskave. Pri prvih meritvah se je pri preverjanju umeritve pojavil problem, saj so meritve s standardno raztopino kar naprej padale iz umeritvenega območja. Ko pa smo napravo zaradi tega umerjali, pa je ponovna meritev padla v umeritveno območje. Podvomili smo v meritev brez računalnika in stalnega zajema podatkov. Z meritvijo v stalnem zajemu podatkov dobimo graf rasti oziroma padanja sukcije s časom, kot vidimo s slike 27. Vidi se razlika med prvo in peto meritvijo (210 kPa), ki nam je delala zgoraj opisane probleme z umeritvijo. Meritev se ustali pri 1925 kPa z odstopanji od povprečja, velikimi kar 40 kPa. Merska napaka meritve je 100 kPa, zato so ti skoki znotraj natančnosti meritve.

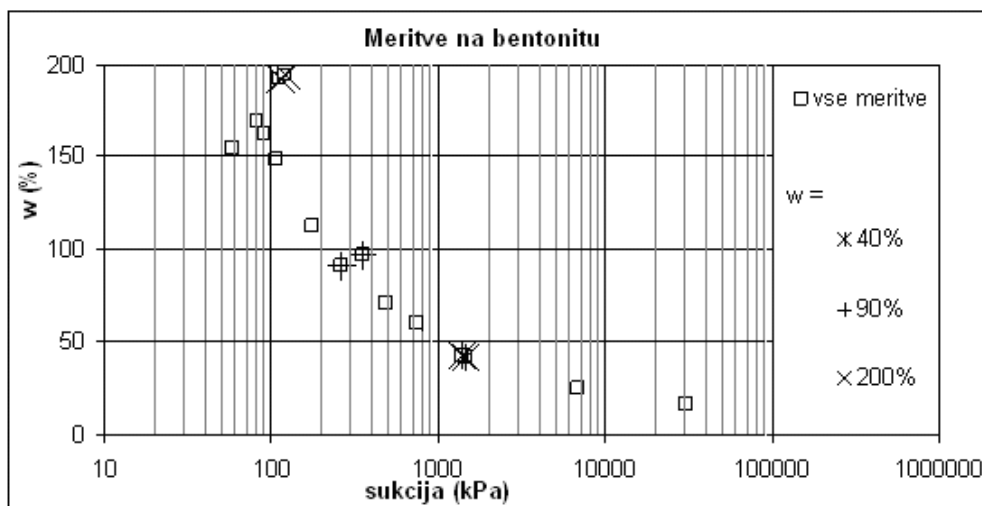


Slika 27: Graf merjenja sukcije KCl.

Zaradi vpogleda v umiritev meritve smo se odločili za merjenje z uporabo stalnega zajema podatkov. Po nekaj preiskavah smo videli, da se je meritev umirila, če se zaporedne štiri vrednosti ne razlikujejo za več kot 100 kPa. Poleg tega smo pridobili tudi na času, saj smo lahko čas, ki smo ga prej presedeli pred napravo in zapisovali meritve, porabili za druge preiskave.

○ Ponovljivost meritev

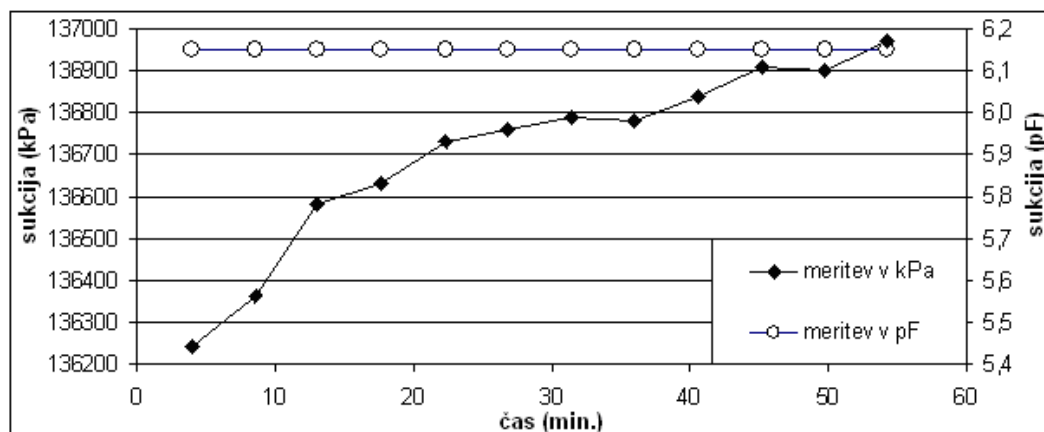
Še vedno pa nismo poznali ponovljivosti meritev sukcije pri enakih pogojih. Po opravljenih meritvah smo opazili, da je raztros meritev na vzorcih z enako vlago manjši od 0,5 pF (natančnost metode s filter papirjem), zato smo se odločili, da bomo opustili meritve na več vzorcih in bomo raje izmerili več vzorcev pri različnih vlažnostih. Raztros vzorcev in meritve, ki smo jih opravili na bentonitu, vidimo s slike 28.



Slika 28: Meritve sukcije na bentonitu

○ Problem visokih sukcij

Pri meritvah sukcije nad 10 MPa se vrednosti niso nikoli umirile, a je bila natančnost meritev (razen prvih) vedno znotraj 1 % vrednosti. Opazili smo, da njihova logaritmična vrednost ostajala enaka. Zato smo sklenili, da v takem primeru raje počakamo na ustalitev meritve na (logaritmski) pF skali (slika 29), kot pa da vsakič računamo mersko napako.



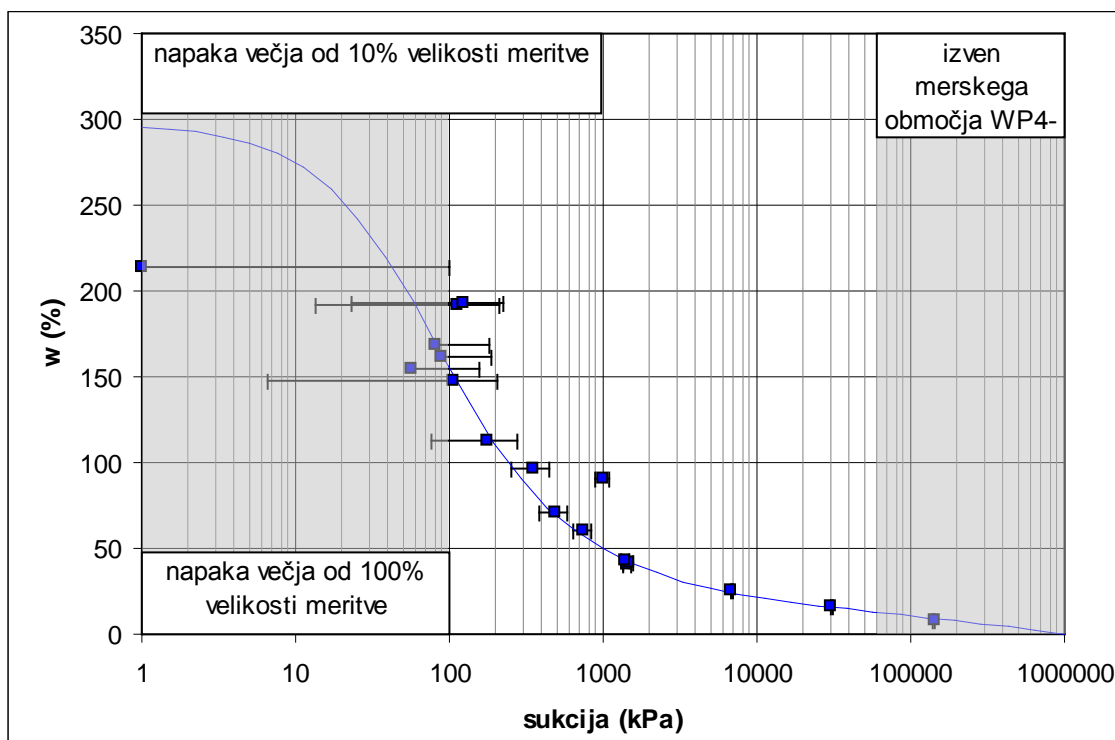
Slika 29: Graf meritve sukcije v različnih enotah – prikaz umiritve

4 REZULTATI MERITEV

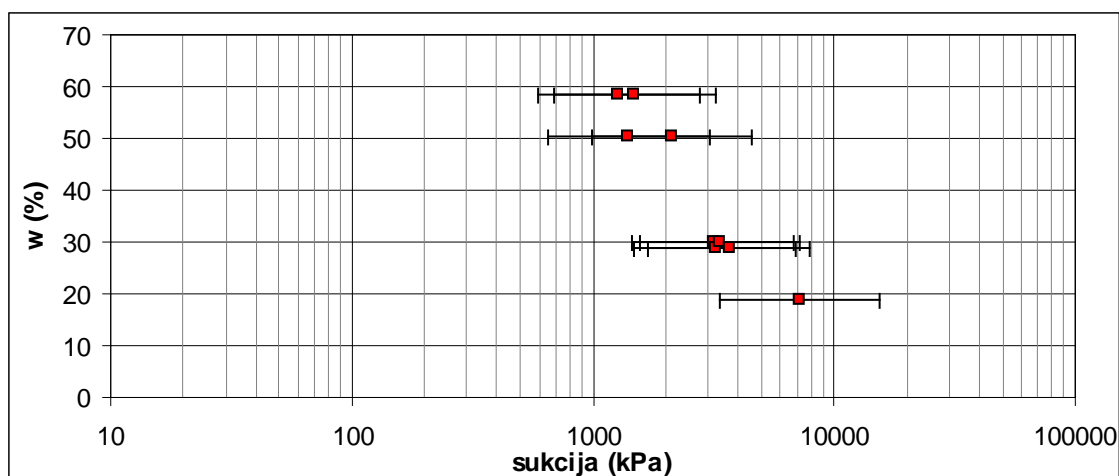
4.1 Merske napake

Vsaka meritev je podvržena merski napaki, ki je odvisna od metode merjenja neke količine. Pri samem vrednotenju rezultatov je potrebno poznati natančnost merjenja, da lahko sklepamo o kakovosti meritev. Iz literature pridobljene natančnosti meritev sukcije za različne preiskave so prikazane na meritvah bentonita.

Na sliki 30 vidimo mersko natančnost pri merjenju s potenciometrom. Le-te se z višanjem sukcije zmanjšujejo do 1% (znotraj kvadrata, ki označuje meritev). Pri tem ne upoštevamo napake pri merjenju vlage in napak zaradi drugih vplivov. Za primerjavo vidimo natančnost metode merjenja sukcije s pomočjo filter papirja (slika 31). Ta metoda je manj natančna od merjenja sukcije s potenciometrom. Natančnost merjenja vodovpojnosti je približno 1%, za tenziometer in tlačni lonec pa v literaturi nismo zasledili velikosti merske napake.



Slika 30: Merska natančnost pri merjenju s potenciometrom WP4-T



Slika 31: Merska natančnost pri merjenju sukcije s pomočjo filter papirja

4.2 Opravljene meritve

Meritve smo opravili na štirih materialih: kameni moki, bentonitu, sivici in flišu. Kamena moka je inerten material in predstavlja spodnjo mejo vlage pri določeni sukciji, bentonit pa s svojo visoko adsorpcijsko sposobnostjo predstavlja zgornjo mejo. Fliš in sivica sta nabrekliivi glini, za kateri imamo v Laboratoriju za mehaniko tal že precej podatkov.

Sukcijo smo merili na več načinov in sicer na rahlih vzorcih:

- Vodovpojnost (Enslin).
- Določili vlage vzorcem, ki so bili predhodno navlaženi na mejo vodovpojnosti, v tlačnem loncu pri sukcijah 10, 33 in 60 kPa.
- Vlažili vzorce in merili sukcijo s potenciometrom pri različnih vlagah.
- Sušili vzorce, ki so bili predhodno navlaženi na mejo židkosti, jih zdrobili in merili sukcijo s potenciometrom pri različnih vlagah.
- Merili sukcijo s tenziometrom.

Ter na zbitih vzorcih (po standardnem Proctorjevem preizkusu):

- Merili sukcijo s potenciometrom
- Merili sukcijo s filter papirjem (matrična in celotna)

Vsem materialom smo nato po metodi najmanjših kvadratov določili retenzijske krivulje.

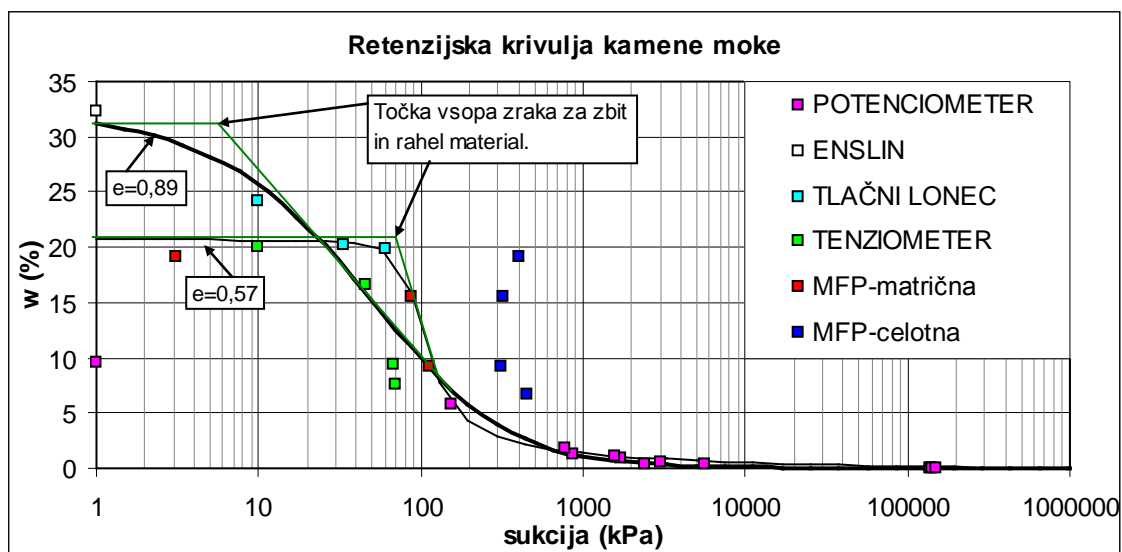
Meritve sukcij so v nadaljevanju predstavljene le v grafični obliki, natančnejši tabelarni zapis meritev pa je podan v prilogah.

4.2.1 Kamena moka

Kamena moka je zdrobljen apnenčev prah. Kalcitni minerali so inertni in nimajo visokih adsorpcijskih sposobnosti, tako v kameni moki prevladuje le kapilarna voda. Zaradi svoje enakomerne zrnivosti bi morali iz meritev opaziti strm padec vlage pri določeni vrednosti sukcije in skoraj ničelno vlago nad to mejo. V diplomski nalogi uporabljena kamena moka je iz kamnoloma Stahovica.

S slike 32 vidimo, da kamena moka nima velikih adsorpcijskih sposobnosti, saj ima mejo vodovpojnosti le 32%. Ostale meritve na rahlih vzorcih kažejo na strm (skorajda navpičen) padec vlage pri sukciji ~100 kPa. Iz meritev sukcije vidimo tudi prehiter padec sukcije merjene s potenciometrom, kar je posledica majhne natančnosti potenciometra v območju do 100 kPa.

Na zbitih vzorcih smo merili le sukcije s pomočjo filter papirja, saj je bila kamena moka premokra za merjenje s potenciometrom. Iz danih meritev opazimo odpoved merjenja celotne sukcije s filter papirjem (glej poglavje 5.3).

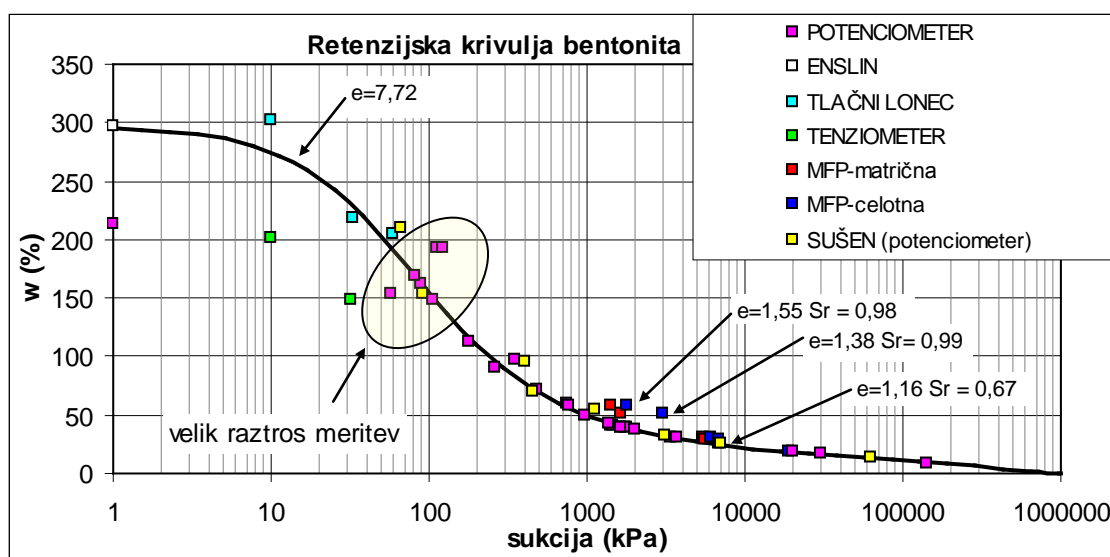


Slika 32: Meritve na kameni moki.

Fredlundova in Xingova retenzijska krivulja sukcije se lepo ujema z meritvami visokih sukcij. Pri nizkih vrednostih pa imajo meritve precejšen raztros glede na retenzijsko krivuljo. Če pa rišemo retenzijsko krivuljo za zbite vzorce, dobimo krivuljo, ki se lepše ujema z rezultati. Opazimo tudi premik točke vstopa zraka iz ~ 10 kPa za rahle vzorce na 74 kPa za zbite vzorce. Točka vstopa zraka za rahle vzorce je le približno določena, saj pade v območje velikih merskih napak in/ali izven delovanja merskih metod. Pri obeh linijah je napisan količnik por, za katerega je dana krivulja predpostavljena.

4.2.2 Bentonit

Bentonit je montmorilonitna glina. Glineni mineral montmorilonit ima visoko specifično površino in s tem visoko adsorpcijsko sposobnost (preglednica 1). Zaradi njegovih visokih adsorpcijskih sposobnosti pričakujemo najvišje vrednosti vlage na celotnem območju.



Slika 33: Meritve na bentonitu.

Pri rahlih vzorcih pozornost vzbudi vlaga pri meritvi s tlačnim loncem pri 10 kPa, saj da višjo vlago od meritve s pomočjo Enslinovega aparata. To je posledica majhne prepustnosti samega materiala, dejstva, da je bil vgrajen pri višji vlagi od vodovpojnosti in same meritve vodovpojnosti, ki jo končamo po 24 urah. Zaradi same nepropustnosti materiala smo prehitro končali tudi z meritvijo tenziometra, ki izmeri prenizko sukcijo. Prav tako vidimo velik

raztros meritev s potenciometrom v okolici 100 kPa, ki mu z višanjem vlage sledi nagel padec na 0 kPa. Med močenimi in sušenimi vzorci ni moč opaziti razlik.

Fredlundova in Xingova retenzijska krivulja sukcije se lepo ujema z meritvami sukcij na rahlih vzorcih. Retenzijske krivulje za zbite vzorce ni bilo moč skonstruirati, saj ima bentonit v nasprotju s kameno moko 100% zasičenost (oziroma $S_r=99,5\%$ pri gostoti zrn iz literature) že v rezidualni coni. To je posledica nabrekanja materiala, ki je posledica večanja obroča adsorpcijske vode.

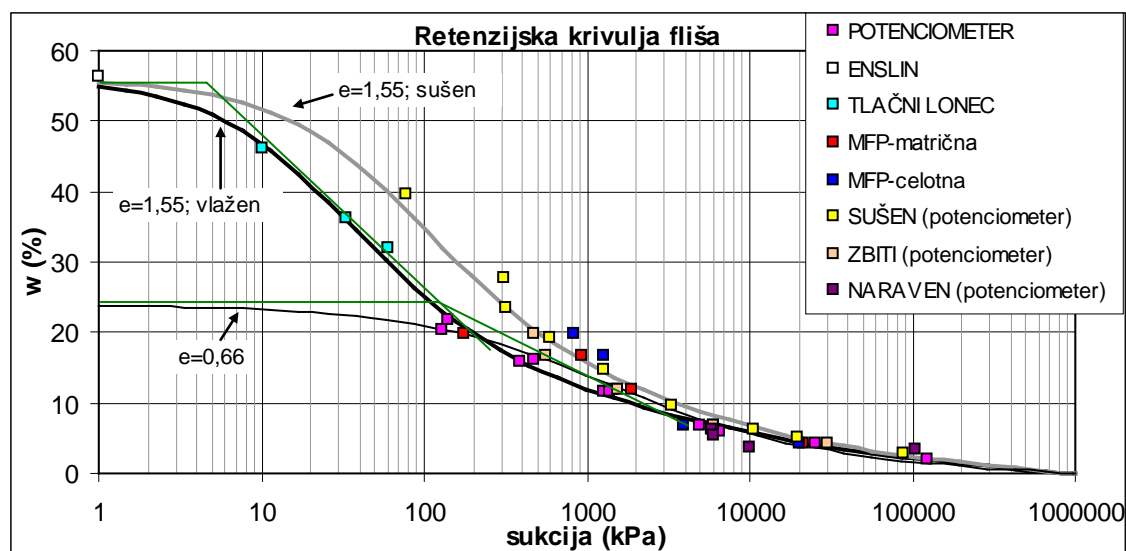
4.2.3 Fliš

Fliš je sedimentna kamenina, ki jo sestavljajo laporji, peščenjaki in glineni skrilavci. Glina, ki sestavlja fliš, je pusta glina trdne konsistence. V stiku z vodo fliš najprej razpade na manjše kose, dokler se popolnoma ne razkroji v glineno preperino. Razpad flišnih zrn v stiku z vodo se pojavlja tudi v inženirskih konstrukcijah in zato je kot tak zanimiv za preiskave. V nadaljevanju je kot fliš poimenovana le glinena komponenta fliša iz plazu Slano Blato (Lokavec).

Na rahlih vzorcih se meritve opravljene s potenciometrom lepo nadaljujejo v meritve tlačnega lonca in meritev vodovpojnosti. Meritve opravljene na sušenem materialu imajo višje vlage kakor meritve opravljene na močenem materialu pri sukcijah pod 6000 kPa. Pri višjih sukcijah se meritve močenega in sušenega materiala pokrijejo.

Meritve na zbitih vzorcih se medsebojno pokrivajo. Sicer ležijo med retenzijsko krivuljo močenega in sušenega materiala, kar pa je lahko posledica izsuševanja vzorcev pred vgradnjo filter papirjev.

Retenzijska krivulja po Fredlundu in Xingu za rahel material se lepo ujema z meritvami sukcij. Dobil sem dve krivulji (eno za sušen in drugo za močen material), ki predstavljata skrajni meji, med katerima so naše meritve. Pri konstrukciji retenzijske krivulje za zbite vzorce same meritve ne nakazujejo hiter padec sukcije. Najvišjo možno vlago (~24 %) smo ocenili iz zasičenosti nabitih vzorcev. Točka vstopa zraka za zbit material je 108 kPa.



Slika 34: Meritve na flišu.

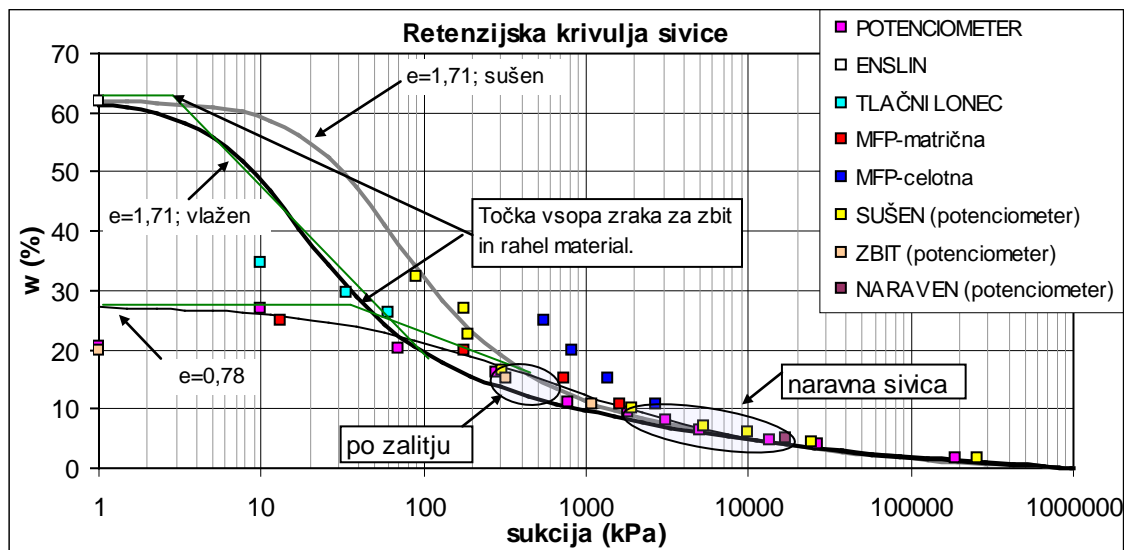
4.2.4 Sivica

Sivica je oligocenska morska glina, značilna po svoji sivi barvi. Je prekonsolidirana glina nizke plastičnosti in se v naravi nahaja v poltrdni do trdni konsistenci. Znana je po tem, da v stiku z vodo začne nabrekati. Sivica, uporabljena v diplomski nalogi, je iz predora Ljubno.

Meritve na sivici pri visokih sukciyah lepo sovpadajo. Meritve manjše od 300 kPa pa so se razprostrle v pravo pahljačo meritev. Meja vodovpojnosti je 62%; meritve, opravljene s tlačnim loncem, dajo najvišjo vlago okoli 40%. Ta pahljača meritev je posledica različnih zgoščenosti materiala. Tudi tukaj se pojavi razlika med vzorci, ki so bili močeni, in tistimi, ki so bili sušeni. Območje večjih razlik med sušenjem in močenjem je pri sukciyah pod 300 kPa, ki pa sovpada z območjem večje merske nenatančnosti, tako da ta razlika ni tako očitna kot pri flišu. Še enkrat se lepo vidi neustreznost meritev potenciometra pod 100 kPa, saj izmeri vrednost 0 kPa že pri 17% vlage. Kljub temu pa smo izmerili sukciye večje od nič tudi pri vlagi 27%.

Meritve na zbitih vzorcih se ne pokrijejo. Potenciometer da nižje rezultate kot je matrična sukciya merjena s filter papirjem. Celotna sukciya merjena s filter papirjem pa je še višja. Razlika med meritvami pri najbolj vlažni sivici je precejšnja, saj potenciometer kaže sukciyo 0

kPa, filter papir pa 550 kPa. Meritve zopet ležijo med retenzijsko krivuljo močnega in sušenega materiala, kar pa je lahko posledica izsuševanja vzorcev pred vgradnjo filter papirjev.



Slika 35: Meritve na sivici

Retenzijske krivulje se lepo ujemajo z meritvami zbitih vzorcev in sušenih vzorcev. Malce manj se ujemajo z meritvami za močene materiale. Zopet je lepo viden premik točke vstopa zraka iz ~ 10 kPa za rahle vzorce na 52 kPa za zbite vzorce. Točka vstopa zraka za rahle vzorce je le približno določena, saj znaša 1,8 kPa, če krivuljo vlečemo na mejo vodovpojnosti, in 16 kPa, če jo določimo glede na rezultate tlačnega lonca ($w_{\max}=40\%$).

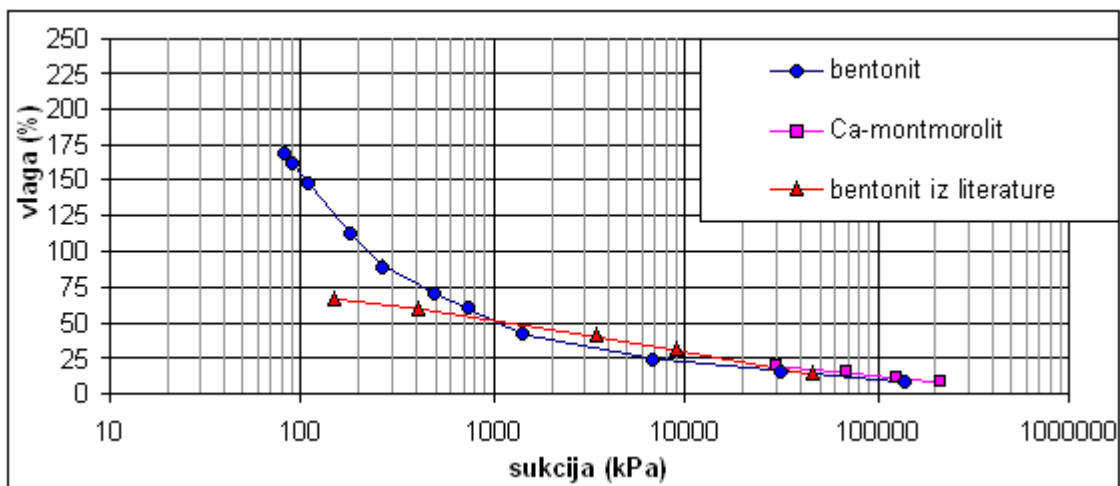
Iz znanih naravnih vlag in iz meritev sukcije pri naravnih vlagah vidimo, da ima naravna sivica sukucijo med 2000 in 20000 kPa ($w = 5 - 8\%$). Po zalitju pa so sivice imele vlago $\sim 12\%$. 12% vlaga pa približno ustreza tudi rezidualni vlagi (glej sliko 35) in meji plastičnosti ($w_p = 13\%$). Iz tega lahko sklepamo, da bo sivica nabrekala približno do svoje meje plastičnosti (Petkovšek, 2006).

5 ANALIZE MERITEV

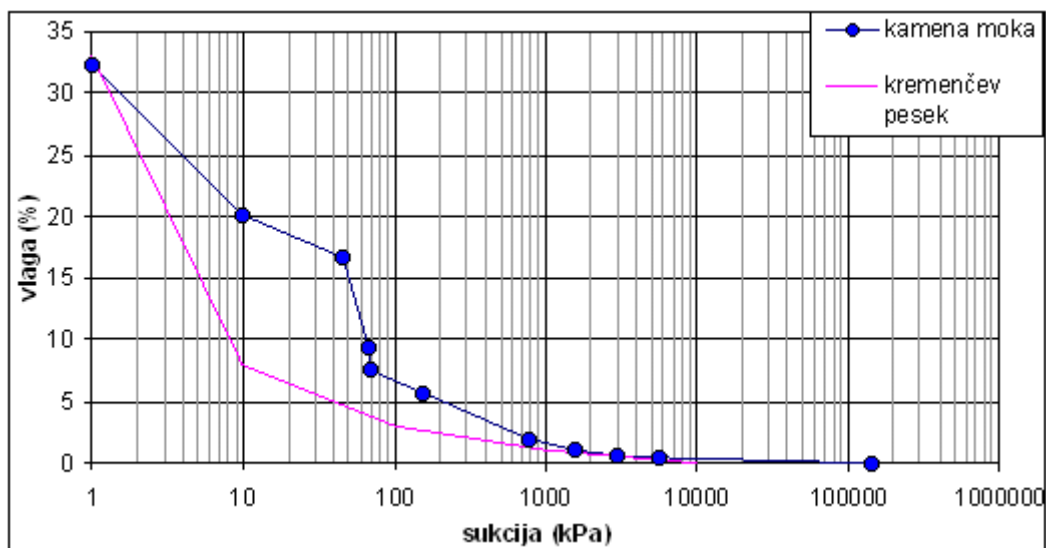
5.1 Primerjava s podatki iz zunanjih virov

Najprej smo merili sukucijo na bentonitu in kamenu moki, saj smo imeli podatke iz virov za bentonit (Thakur in Singh, 2005), Ca-montmorilonit (Marshall in Holmes, 1988) in kremenčev pesek (Marshall in Holmes, 1988). Kamena moka in bentonit sta zaradi svoje narave zahtevna za meritve sukucije (sta ekstremna), vendar je primerljivost rezultatov prevladala nad zahtevnostjo meritev. Na sliki 36 vidimo primerjavo naših meritev sukucije bentonita s potenciometrom in podatke iz literature za bentonit in Ca-montmorilonit. Bentonit po pričakovanju leži pod linijo Ca-montmorilonita, saj je Ca-montmorilonit prečiščen bentonit. Prav tako se naše meritve na bentonitu ujemajo z meritvami iz literature pri visokih sukucijah. Meritve sukucij s potenciometrom so, kot smo že napisali pri opisu naprave, podvržene napaki 100 kPa, zato je treba upoštevati, da je v območju nizkih sukucij relativna napaka velika. Pri tem je treba še poudariti, da ima naša linija meritev obliko retenzijske krivulje, meritve pridobljene iz literature pa ne (sicer velja linearen odnos pri visokih sukucijah).

Drug material, za katerega smo imeli podatke, je bila kamena moka. Kamena moka in kremenčev pesek sta inertna materiala, ki vodo vežeta predvsem na račun kapilarnega učinka. Zaradi tega smo lahko primerjali rezultate kamene moke s kremenčevim peskom na sliki 37. Kamena moka kasneje odda vodo kot kremenčev pesek, saj ima finejša zrna in zaradi tega večje kapilarne tlake. Ko pa sukucija preseže te kapilarne tlake, izgubi vodo na zelo ozkem območju. Krivulja ima obliko stolpca – pri nizkih tlakah zadržuje vodo, nato jo naenkrat odda in postane suha.



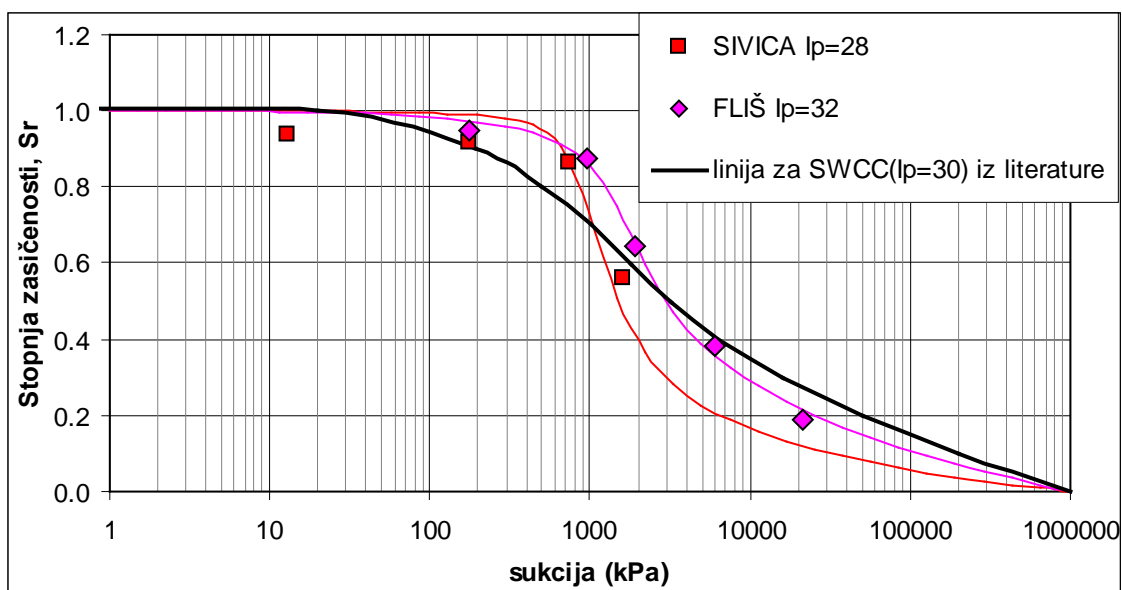
Slika 36: Meritve sukcije bentonita in primerjava s podatki iz literature (bentonit iz literature: Thakur in Singh, 2005 in Ca- montmorilonit: Marshall in Holmes, 1988)



Slika 37: Meritve sukcije kamene moke in primerjava s podatki iz literature za kremenčev pesek (Marshall in Holmes, 1988)

Retenzijsko krivuljo lahko rišemo tudi kot volumetrično vlago ali saturacijo v odvisnosti od sukcije. Enačbe za prevrednotenje ene izmed količin v drugo najdemo v poglavju 2.1. V literaturi smo našli precej meritev, ki niso bile podane v masni vlagi – w ($g \cdot g^{-1}$), ampak v volumetrični vlagi – θ ($m^3 \cdot m^{-3}$) ali stopnji zasičenosti – S_r . Ko smo naredili meritve sukcije s pomočjo filter papirja in izmerili gostote, smo lahko primerjali tudi graf stopnje zasičenosti v odvisnosti od sukcije. Na spodnji sliki (slika 38) vidimo ujemanje naših meritev z linijo

predpostavljeno v literaturi (Zapata, Andrei in Witczak, 2005). Odstopanja meritev so v večini meritev znotraj merske natančnosti meritve 0,5 pF (polovična razdalja med 10 in 100kPa), dodatno napako pa prispeva tudi predpostavljena gostota zrn. Linija iz literature je predpostavljena glede na znane meritve za nek povprečen material z indeksom plastičnosti 30.



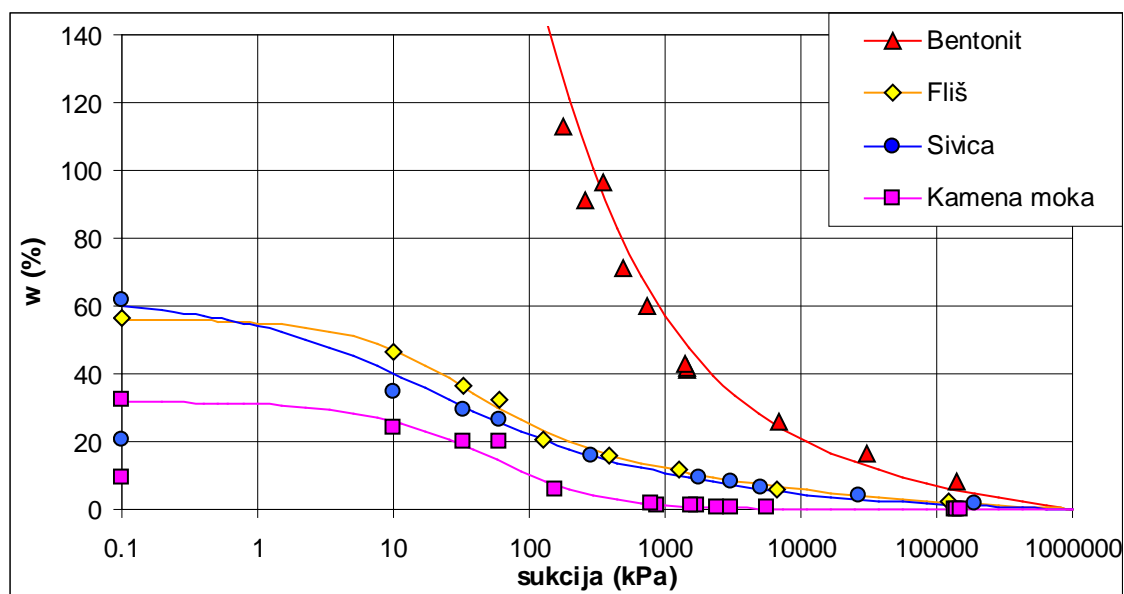
Slika 38: Meritve sukcije fliša in sivice in primerjava s podatki iz literature (linija iz literature Zapata, Andrei in Witczak, 2005)

5.2 Medsebojna primerjava meritev na različnih materialih

Meritve sukcije med različnimi materiali smo primerjali tudi med seboj. S slike 39 in preglednice 6 se da razbrati, da obstaja povezava med indeksom plastičnosti, I_p , in meritvami sukcije. Z višanjem indeksa plastičnosti, I_p , se viša tudi vlaga pri ničelni sukciji in rezidualna vlaga. Ker imata sivica in fliš podoben indeks plastičnosti, ležita v istem območju grafa.

Preglednica 6: Osnovne lastnosti materialov

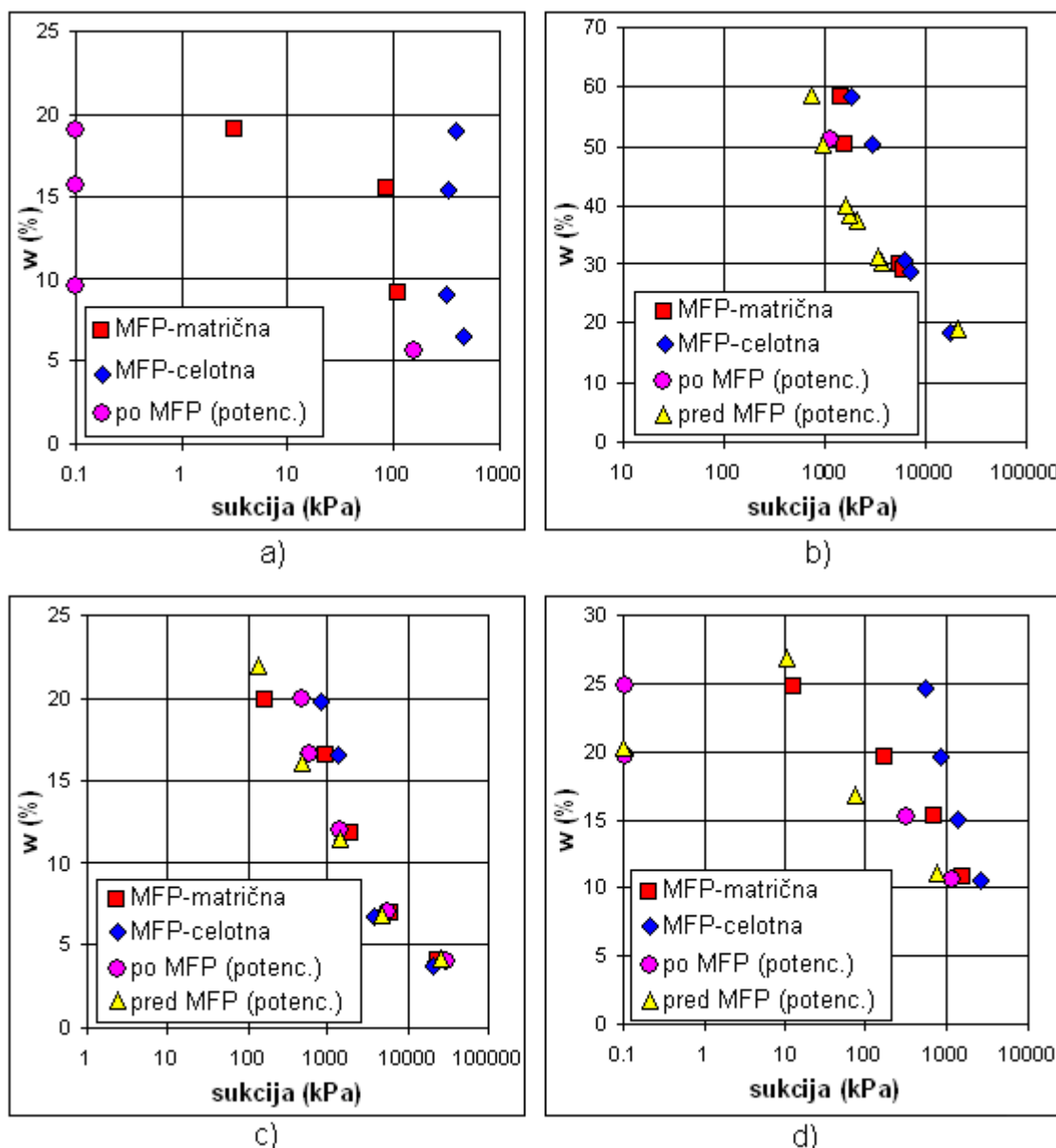
Material	w_L %	w_P %	I_p %
Bentonit	210	35	175
Kamena moka	23	/	/
Sivica	41	13	28
Fliš	45	14	31



Slika 39: Primerjava materialov med seboj

5.3 Primerjava rezultatov merjenih s filter papirjem in s potenciometrom

Da bi preverili pravilnost meritev sukcije s potenciometrom, smo na zbitih vzorcih zemljin merili sukcijo še s filter papirjem. Merili smo matrično kakor tudi celotno sukcijo. S slike 40 vidimo rezultate teh meritev. Pri visokih sukcijah se rezultati merjenj sukcije s pomočjo filter papirja in potenciometrom lepo ujamejo. Pri sukcijah, manjših od 1000 kPa, pa se pokrijejo vrednosti matričnih sukcij merjenih s filter papirjem in meritve s potenciometrom. Pri teh meritvah celotne sukcije merjene s filter papirjem dajo nekoliko višje rezultate. Pri meritvah sukcij, manjših od 100 kPa, potenciometer in meritve celotne sukcije s pomočjo filter papirja ne dajeta zadovoljivih rezultatov. Prva metoda da prenizke, druga pa previsoke rezultate. Iz grafa meritev sukcije kamene moke vidimo, da lahko celotno sukcijo, ki jo določimo s filter papirjem, merimo le do vrednosti 400 kPa.

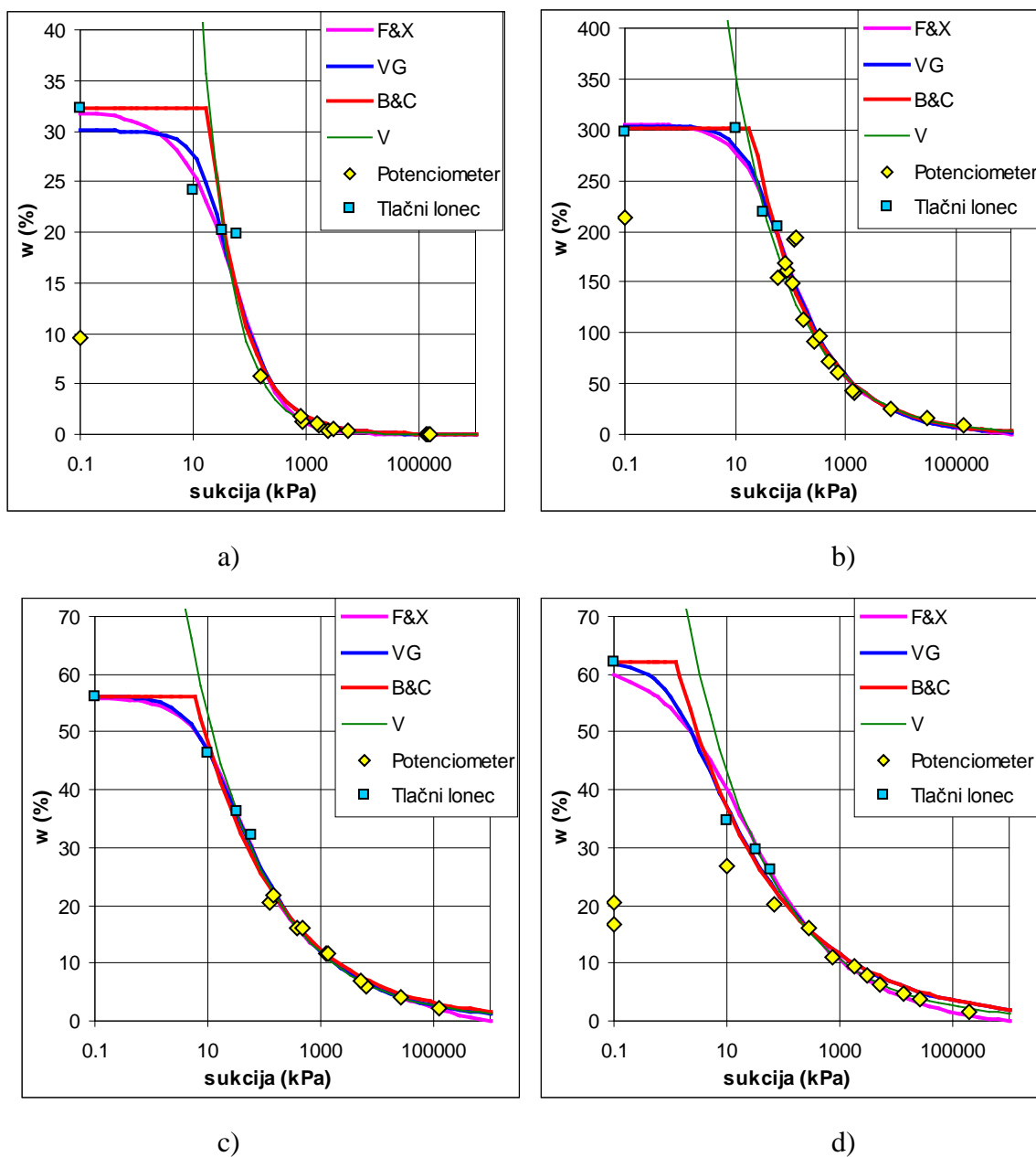


Slika 40: Primerjava različnih načinov meritev sukcije za kameno moko (a), bentonit (b), fliš (c), sivico (d)

5.4 Primerjava funkcij retenzijskih krivulj

Retenzijske krivulje smo določili s pomočjo reševalca v MS Excelu. Določili smo parametre za štiri različne modele, predstavljene v poglavju 2.7. Vrednosti parametrov najdemo v prilogah. S slike 41 vidimo lepo ujemanje predpostavljenih modelov pri meritvah sukcije nad 100 kPa. Vidimo, da Visserjev model nima omejitve vlage navzgor (je potenčna funkcija) in je kot tak primeren le za vrednotenje retenzijskih krivulj pri sukcijah nad točko vstopa zraka.

V tem območju je zelo dober model, saj je enostaven. Brooksov in Coreyev model ima oster prehod v točki vstopa zraka in kot tak omogoča enostavno določitev te točke. Navzgor neomejena vlaga in oster prehod v točki vstopa zraka sta razloga za neujemanje modelov pri nizkih vrednostih sukcije. Van Genuchtenov ter Fredlundov in Xingov model pa opišeta dejansko obliko retenzijske krivulje. Van Genuchtenov model je enostavnejši in mu je lažje določiti obliko (z reševalcem v MS Excelu). Fredlundov in Xingov model se edini lepo prilagaja meritvam visokih sukcij (nad 100.000 kPa), saj vsi ostali modeli ne predpostavijo neke končne vrednosti sukcije. Pri meritvah visokih sukcij (v kolikor jim še lahko zaupamo) so izmerjene vlage nižje od tistih, ki jih predpostavljajo modeli (na primer Van Genuchten). Pri Fredlundovem in Xingovem modelu smo tudi opazili probleme pri določitvi retenzijske krivulje, če imamo točko vstopa zraka pri nizkih vrednostih sukcije, hkrati pa imamo sorazmerno velike razlike v vlagi (na primer sivica).



Slika 41: Primerjava retenzijskih krivulj a) kamena moka, b) bentonit, c) fliš, d) sivica; F&X - Fredlundov in Xingov model, VG – Van Genuchtnov model, B&C – Brooksov in Coreyev model, V- Visserjev model; Tlačni lonec – meritve s tlačnim loncem in Enslinovim aparatom

5.5 Primerjava metod

Za merjenje sukcije smo uporabili več naprav (metod): tenziometer, tlačni lonec, potenciometer in filter papir. V preglednici 7 so zajete prednosti in slabosti določene metode, splošni podatki o metodah pa v preglednici 4.

Palični tenziometer je nezahtevna preiskava, z majhno mersko natančnostjo. Drugačne konstrukcije tenziometrov imajo tudi večje natančnosti, vsem pa je enako merjenje sukcije le do 85 kPa. Podobno napako ima tlačni lonec, ki meri sukcijo le do 1500 kPa, vendar ima večjo natančnost. Dodatne prednosti tlačnega lonca so vgradnja intaktnih vzorcev in zanesljivost meritev v območju pod 100 kPa. Njegove slabosti pa so primernost le za peščene in meljaste zemljine in velik raztros podatkov pri glinah. Najbolj univerzalen način merjenja sukcije je meritev s filter papirjem. Metoda merjenja sukcije s filter papirjem je poceni in z velikim območjem merjenja (matrična: 10-100.000 kPa, celotna: 400-100.000 kPa). Ima pa tri velike pomanjkljivosti: dolgotrajnost preiskave (14 dni), ni možnosti preverjanja vzpostavitve ravnotežja in nenatančnost zaradi posplošitve kalibracijske linije. Zadnja izmed uporabljenih metod je merjenje sukcije s potenciometrom. Potenciometer WP4-T omogoča hitro in natančno meritev sukcije. Ima pa vrsto omejitev. Sukcijo meri na majhnem vzorcu, kateremu težko določimo gostoto. Poleg tega meri sukcijo zanesljivo le nad 100 kPa, kar pa nadoknadi z velikim območjem merjenja sukcije do 300.000 kPa. Pri vsem tem je potrebno poudariti, da so le nekatere zemljine v takem stanju, da imajo sukcijo višjo od 1500kPa.

Preglednica 7: Primerjava naprav za merjenje sukcije

naprava	+	-
palični tenziometer	preprosta primerna za teren	nenatančna meri le do 85 kPa
filter papir	poceni zajame celotno območje primeren za zbite zemljine	čas preiskave ni preverjanja v zpostavitve ravnotežja zamudna nenatančna
tlačni lonec	zajame območje pod 100 kPa primeren za zbite zemljine	samo območje do 1500 kPa velik raztros podatkov primeren za peščene zemljine
potenciometer	hitro mala količina materiala	meri le nad 100 kPa težko določiš gostoto materiala majhnost vzorca

6 PRAKTIČNI PRIMER UPORABE

6.1 Uvod

V poglavju 2.8 smo omenili povezavo med sukcijsko in ostalimi lastnostmi zemljin. Ena izmed njih je tudi prepustnost, ki smo jo numerično modelirali s programom CHEMFLO-2000. S CHEMFLO-2000 lahko modeliramo eno dimenzionalni tok vode skozi nezasičeno zemljin. Program uporablja enakomerno porazdeljene končne elemente in van Genuchtenov ali Brooksov in Coreyev model za povezavo sukcije s prepustnostjo. Odločili smo se za van Genuchtenov model, ki bolje opisuje retenzijsko krivuljo.

Primer, na katerem si bomo ogledali praktično uporabo sukcije, je zalitje sivice v edometru pri preiskavi nabrekalnih deformacij.

6.2 Izračun

S programom smo imeli probleme, saj je narejen za agronome. Zaradi značilnosti njihovega dela je program omejen na sukcije pod 1500 kPa in je uporaben za nenabreklije materiale. V našem primeru pa imamo začetno sukcijsko silo 4000 kPa in nabrekli material.

Sama sprememba višine vzorca ni tako pomembna, saj se je višina vzorca med nabrekanjem povečala le za 1-2 %. Sprememba višine vzorca je tako približno enaka napaki izračuna in velikosti končnega elementa. Veljavnost modela kot takega pa je seveda vprašljiva.

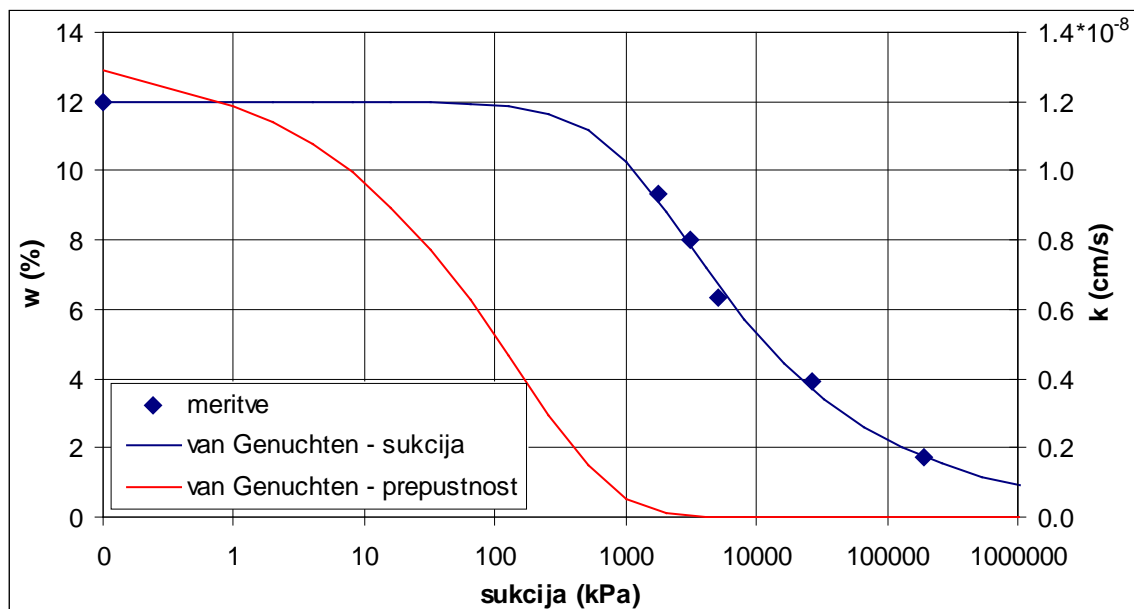
Problem previsoke sukcije ni tako problematičen, če pogledamo enačbi 2.36 in 2.40. Iz enačb vidimo, da ima velikost sukcije vpliv le na parameter a_{VG} , ki pa ga lahko spremenimo, da povečamo območje sukcije, ko podajamo model zemljine (slika 42). V našem primeru ga delimo z 10.

$$w = w_R - (w_S - w_R) \cdot \left[\frac{1}{\left(1 + (\alpha_{VG} \cdot \psi)^{n_{PG}}\right)^{m_{PG}}} \right]$$

$$k = k_s \left(\frac{\left(1 - (\alpha_{VG} \cdot \psi)^{n-1} \cdot \left(1 + (\alpha_{VG} \cdot \psi)^{n_{PG}}\right)^{-m_{PG}}\right)^2}{\left(1 + (\alpha_{VG} \cdot \psi)^{n_{PG}}\right)^2} \right)^2$$

Slika 42: Enačbi 2.36 in 2.40 z označenim parametrom α_{VG} .

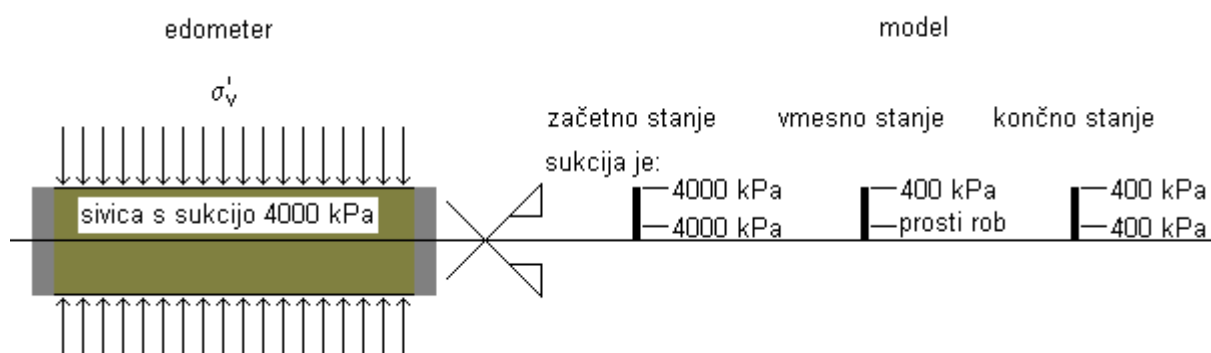
V programu uporabljene lastnosti sivice vidimo iz preglednice 8, model na sliki 44, obliko retenzijske krivulje in krivuljo vodoprepustnosti v odvisnosti od sukcije pa vidimo na sliki 43. Model ima v začetnem stanju sukcijo 4000 kPa, kar je enako izmerjeni sukciji pri znani vlagi, za končno stanje pa sukcijo 400 kPa, kar je enako obremenitvi pri zalitju vzorca. Pri tem moramo poudariti, da smo meritev sukcije na sivici prevzeli po poglavju 4 in ni bila opravljena na dejanskem edometriškem vzorcu. Prepustnost je določena iz konsolidacijske krivulje že zalitega vzorca sivice iz vrtnice LP-7, višina pa je zaradi robnih pogojev (obojestransko zalitje) le polovica dejanske.



Slika 43: Meritve sukcije in van Genuchtnovi krivulji vlage in prepustnosti v odvisnosti od sukcije.

Preglednica 8: Vstopni podatki v program

volumetrična rezidualna vlaga	θ_R	0.000	
volumetrična vlaga pri zasičenju	θ_S	0.265	(w=12%)
oblikovni parameter	a_{VG}	8.10E-04	kPa ⁻¹
oblikovni parameter	n_{VG}	1.384	
prepustnost zasičene zemljine	k	4.90E-05	cm·h ⁻¹
gostota	ρ	2.44	t·m ⁻³
višina modela	h	0.95	cm

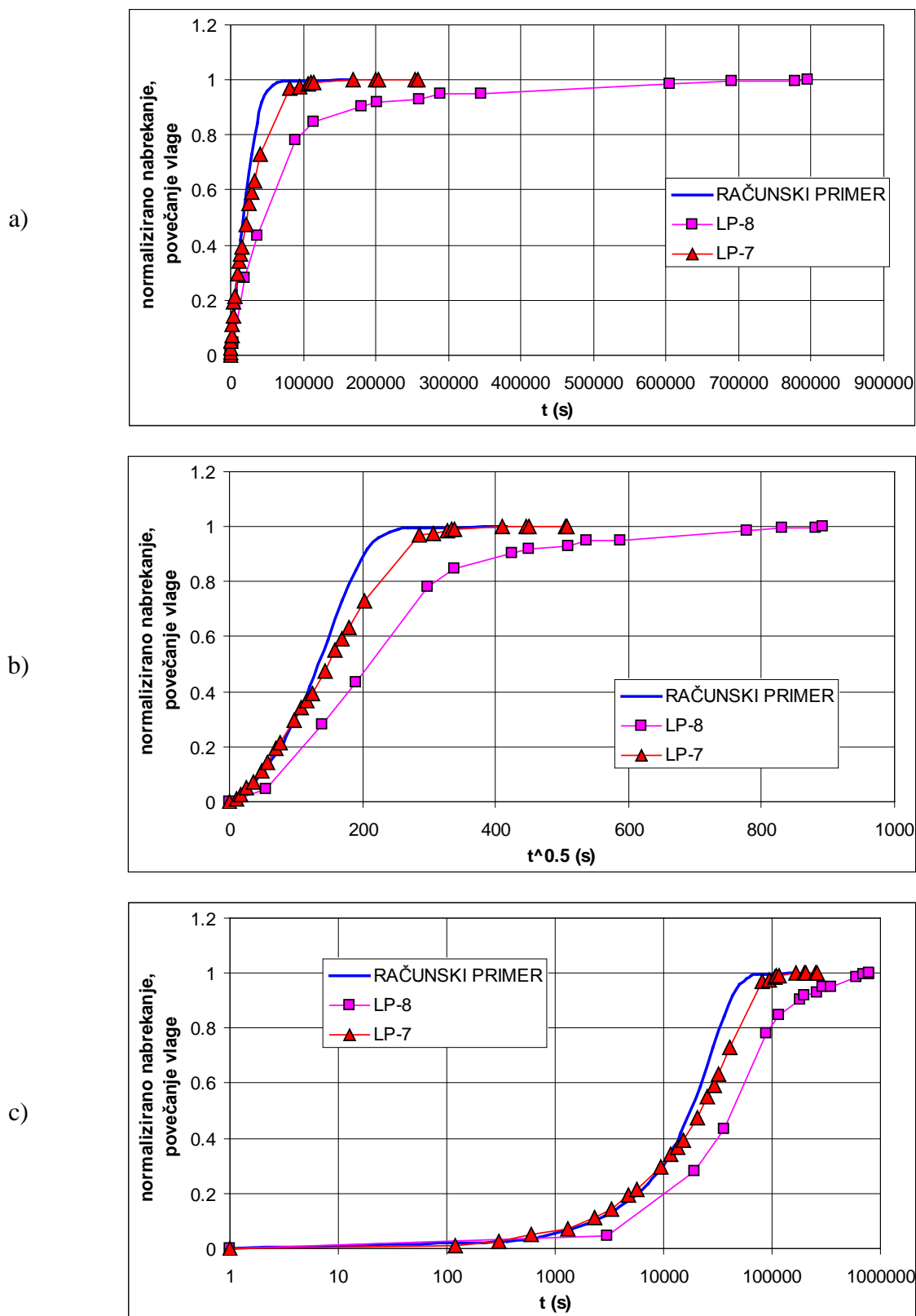


Slika 44: Prikaz stanja sivice v edometru pred zalitjem in računski model (desno)

6.3 Predstavitev rezultatov

Sivica je pred zalitjem skorajda popolnoma zasičena (~ 95 %), tako da se celotno povečanje vlage kaže v povečanju volumna. Iz tega sledi, da lahko primerjamo povečanje vlage z nabrekanjem. Zaradi lažjega predstavljanja rezultatov je na sliki 45 prikazano normalizirano povprečno povečanje vlage in normalizirana nabrekalna deformacija. Graf je zrisan tudi v logaritmični odvisnosti od časa.

Vidi se lepo ujemanje računskega modela z merjenimi podatki za sivico iz vrtine LP-7. Z grafa prav tako opazimo enakost oblike linije povečanja vlage z merjenimi podatki, tako da očitno predpostavljeni računski model dobro opiše obnašanje nezasičene zemljine.



Slika 45: Prikaz normaliziranega povečanja vlage v odvisnosti od časa (merjeni podatki so LP-7 in LP-8): a) normalno merilo, b) koren časa in c) logaritem časa.

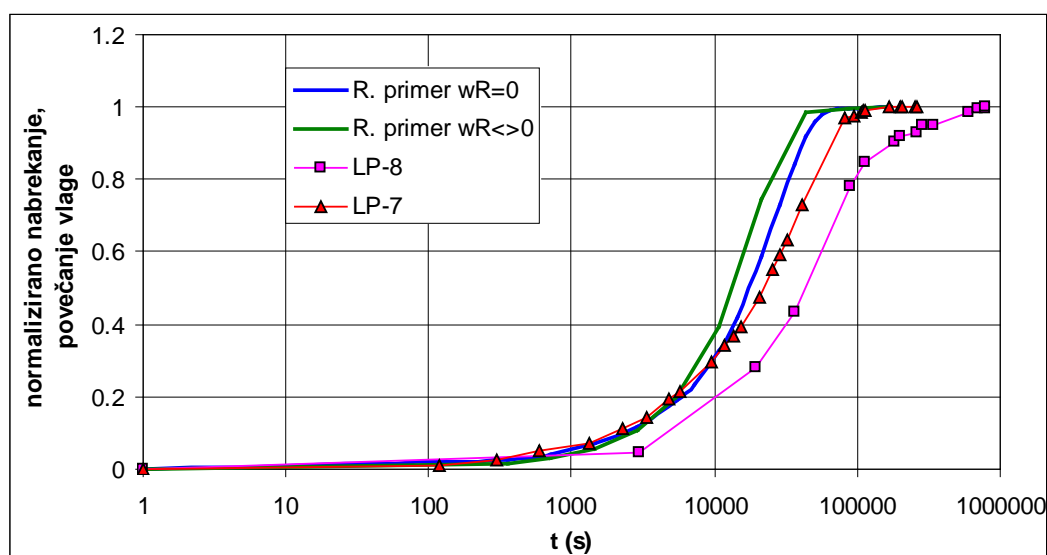
6.4 Vpliv manjše spremembe parametrov

Pri vrednotenju retenzijskih krivulj se zgodi, da reševalec izračuna rahlo drugačne oblikovne parametre glede na začetne izbrane vrednosti parametrov.

Preglednica 9 predstavlja nove, rahlo spremenjene parametre, s slike 46 pa vidimo vpliv teh majhnih razlik pri vrednotenju retenzijskih krivulj na rezultate numeričnega modela. Pri izračunu oblikovnih parametrov smo predpostavili, da začetna vlaga ni enaka nič ter jo določil glede na najlepše prileganje k merjenim točkam. Iz podanih rezultatov vidimo, da imajo majhne spremembe oblikovnih parametrov viden vpliv na potek razvoja vlaženja vzorca.

Preglednica 9: Vstopni podatki v program s spremenjenimi oblikovnimi parametri

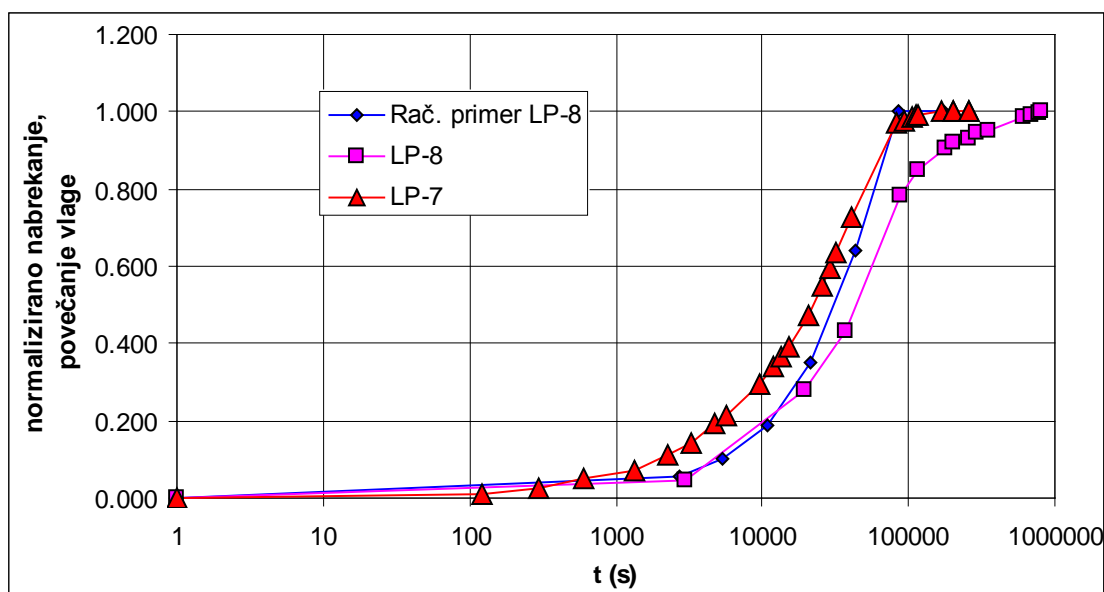
volumetrična rezidualna vlaga	θ_R	0,011	
volumetrična vlaga pri zasičenju	θ_S	0,265	(w=12%)
oblikovni parameter	a_{VG}	7,48E-04	kPa ⁻¹
oblikovni parameter	n_{VG}	1,433	
prepustnost zasičene zemljine	k	4,90E-05	cm·h ⁻¹
gostota	ρ	2,44	t·m ⁻³
višina modela	h	0,95	cm



Slika 46: Prikaz normaliziranega povečanja vlage v odvisnosti od časa za različen opis van Genuchtenove retenzijske krivulje.

6.5 Izračun za sivico iz vrtine LP-8

Na sliki 47 vidimo prilagajanje računskega modela merjenim podatkom za sivico iz vrtine LP-8. Pri tem smo popravili končno stanje sukcije na 1000 kPa (vzorec je bil zalit pri obremenitvi 1000 kPa) in prepustnost na $5 \cdot 10^{-9} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (določeno iz krivulj konsolidacije). Ostali podatki pa so enaki računskemu modelu iz poglavja 6.2. V tem primeru se računski model prileže meritvam za sivico iz vrtine LP-8.

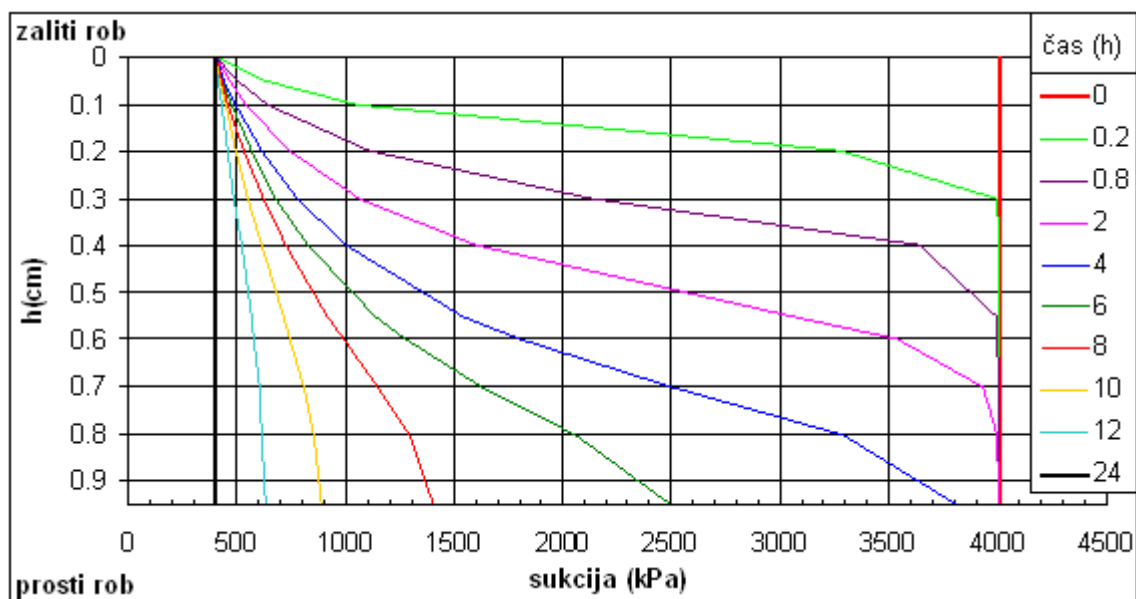


Slika 47: Prikaz normaliziranega povečanja vlage v odvisnosti od časa. Ocena prepustnosti za vzorec sivice iz vrtine LP-8

6.6 Dogajanje v vzorcu

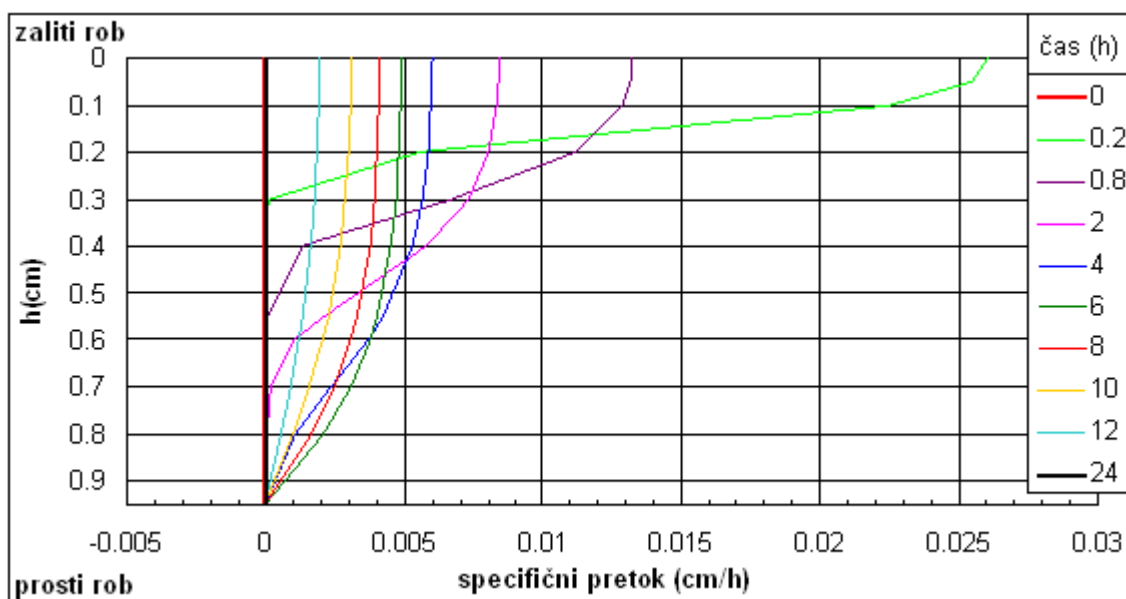
Običajno nimamo vpogleda v dogajanje v vzorcu med nabrekanjem. Numerični model je na osnovi opravljenih meritev sukcije dobro orodje za izračun dogajanja v vzorcu zemljine po zalitju. Naslednje slike prikazujejo zmanjšanje sukcije v odvisnosti od časa ter specifični pretok in gradient potenciala porne vode.

Na sliki 48 je prikazano zmanjšanje sukcije glede na čas in globino v vzorcu. Vidimo postopno premikanje z zalitvijo še ne obremenjenega dela vzorca. Po preteku štirih ur se začne celotni vzorec močiti. Po preteku 24 ur se sukcija v vzorcu skorajda popolnoma uravnesi z zunanji pogoji in posledično se vzorec ne vlaži več.

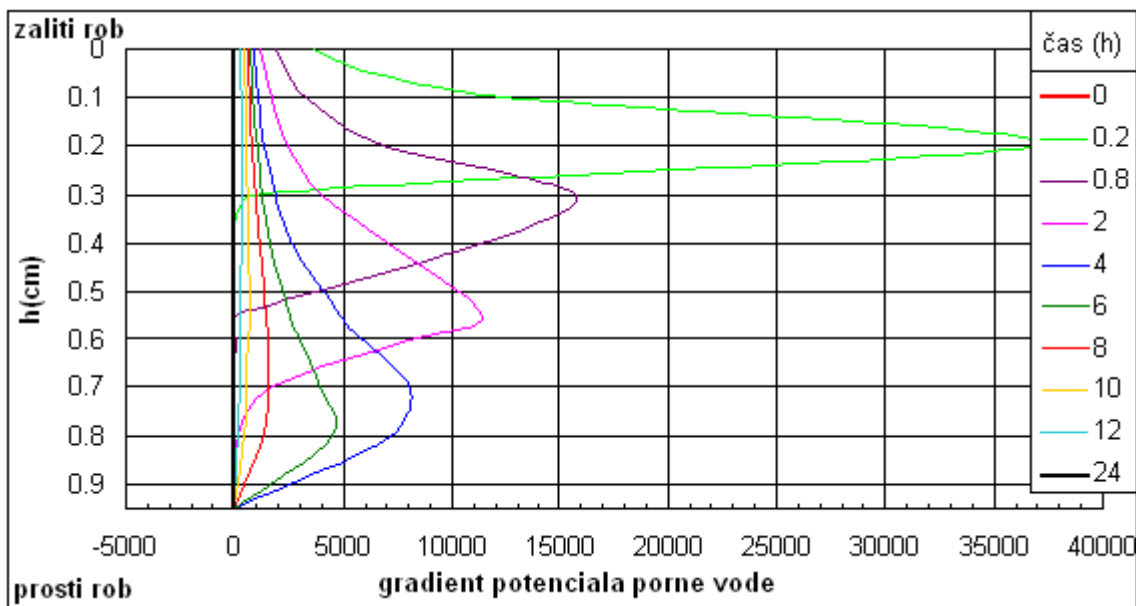


Slika 48: Prikaz zmanjšanja sukcije skozi vzorec z daljšanjem časa zalitja.

Prav tako lahko pogledamo kaj se dogaja s specifičnim pretokom v vzorcu (slika 49). Vidimo velike gradiente na začetku zalitja, ki pa ne sežejo daleč v vzorec. Voda napaja le vrhnji del vzorca. Po 24 urah vidimo, da je specifični pretok enak 0 – vzorec je že namočen. Isto dogajanje kaže slika 50, ki prikazuje gradient potenciala porne vode. S te slike vidimo, da se vrh pomika v notranjost (premikanje »vodne fronte«) in razširja. Pri časih daljših od štiri ure vrh obstane v notranjosti vzorca, njegova vrednost pa začne upadati.



Slika 49: Prikaz gostote toka skozi vzorec z daljšanjem časa zalitja.



Slika 50: Prikaz gradienta potenciala porne vode skozi vzorec z daljšanjem časa zalitja.

7 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil seznaniti se s sukucijo v mehaniki tal in z metodami za merjenje sukucije, izvesti meritve sukucije, vrednotiti rezultate lastnih meritev in meritev iz zunanjih virov s pomočjo različnih metod.

V sklopu dela za diplomsko nalogo smo se naučili uporabljati različne metode za merjenje sukucije, ugotovili njihove prednosti in slabosti ter opravili meritve za štiri materiale. Meritve sukucije na materialih se ujemajo z obliko retenzijske krivulje in s podatki iz literature. Meritve smo izvrednotili s štirimi različnimi retenzijskimi krivuljami in pridobili parametre za opis teh materialov. V nadaljevanju je bil izveden numerični izračun z izmerjenimi podatki.

Numerični izračun časovnega poteka vlaženja vzorca lepo opiše dejansko postopno vlaženje nezasičenega vzorca ter poda detajlnejši in bolj celovit vpogled v dogajanje v vzorcu zemljine, ki je izpostavljen vlaženju.

Del diplomske naloge predstavljajo tudi navodila in obrazci za delo s potenciometrom WP4-T in za metodo merjenja sukucije s pomočjo filter papirja. Navodila, obrazce in meritve so podani v prilogah.

V diplomski nalogi smo se osredotočili na meritve sukucije, vrednotenje parametrov retenzijskih krivulj in na različne metode merjenja sukucije. Iz literature je razviden trend laboratorijev in prakse po svetu na povezovanje sukucije z ostalimi karakteristikami zemljin, saj je poznavanje sukucije ključnega pomena za razumevanje obnašanja nezasičene zemljine in napoved njihovega obnašanja glede na spremembo vlage.

VIRI

Uporabljeni viri:

ASTM D 3152 Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Fine-Textured Soils by Pressure-Membrane Apparatus: 6 str.

ASTM D 5298 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) using Filter paper: 6 str.

ASTM D 2325 Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Midium Textured Soils by Porous-Plate Apparatus: 6str.

ASTM D 3404 Standard Guide for Measuring Matric Potential in the Vadose Zone using Tensiometers: 11 str.

Bouma, J., Brown, R.B., Rao, P.S.C. 2003. Movement of Water: Basics of Soil-Water Relationships - Part III . University of Florida, IFAS.

<http://edis.ifas.ufl.edu/SS110> (22.2.2006)

Chen, F., 1975. Foundations on expansive soils. Amsterdam, London, New York, Elsevier Scientific Publishing Company: 270 str.

Kladnik, R. 1989. Osnove fizike 1. Ljubljana, DZS: str. 197-208

Lazarini, F., Brenčič, J. 1989. Splošna in anorganska kemija. Ljubljana, DZS: 557 str.

Marshall, T. J., Holmes, J. W. 1988. Soil physics. Cambridge, Cambridge University Press: 374 str.

Nofziger, D. L., Jinquan, W. 2003. CHEMFLO-2000 Interactive Software for Simulating Water and Chemical Movement in Unsaturated Soils. Oklahoma, Oklahoma Agricultural Experiment Station

Petkovšek, A. 2003. Interna navodila: Navodilo za ravnanje z Enslinovim aparatom in opis postopka izvedbe in izrednotenja rezultatov raziskave. Ljubljana, Laboratorij za mehaniko tal, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 7 str.

Scott, J. M., 2006. Influence of vegetation on the Performance of Railway Embankments. V: Szavits-Nossan, V., Proceedings of the 17th European young geotechnical engineers' conference. Zagreb, Croatian Geotechnical Society: str. 101-112

Smajstrla, A. G., pitts, D. J. 2005. Tensiometer Service, Testing and Calibration. University of Florida, IFAS.

<http://edis.ifas.ufl.edu/AE086> (22.2.2006)

Thakur, V. K. S., Singh, D. N. 2005. Swelling and suction in clay minerals. V: Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics EXPERUS 2005. A.A.Balkema Publishers: str. 27-31

Zapata, C. E., Andrei, D., Witczak, M. W., et al. 2005. Incorporation of environmental effects in pavement design. Madrid, International Workshop on Water in Pavements –wip'05: 18

Zhou, J., Yu, J., 2005. Influences affecting the soil-water characteristic curve. Journal of Zhejiang University SCIENCE.

<http://www.zju.edu.cn/jzus/2005/A0508/A050804.pdf> (20.8.2006)

Ostali viri:

1999. Brooks and Corey SWCC. Soil Vision.

<http://www.soilvision.com/subdomains/soildatabase.com/downloads/reports/SWCCBrooks.pdf> (22.2.2006)

1999. Fredlund and Xing SWCC. Soil Vision.

<http://www.soilvision.com/subdomains/soildatabase.com/downloads/reports/SWCCFredlundandXing.pdf>

(22.2.2006)

1999. Van Genuchten SWCC. Soil Vision.

<http://www.soilvision.com/subdomains/soildatabase.com/downloads/reports/SWCCvanGenuchten.pdf>

(22.2.2006)

Fredlund, D. G., Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & sons: 510 str.

Majes, B. Skripta za mehaniko tal

Petkovšek, A. 2006. Vpliv matrične sukcije na deformacijske karakteristike zemljin, Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 278 str.

Tarantino, A.(ur.), Romero, E. (ur.), Cui, Y. J. (ur.).Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics EXPERUS 2005. A.A.Balkema Publishers: str. 27-31

What is soil suction?. Geotechnical Observations

<http://www.geo-observations.com/Information/Whatissoilsuction.html> (22.2.2005)

WP4-T Operator's Manual. Decagon devices

PRILOGE

A) Osnovni podatki o preiskovanih materialih

B) Meritve sukcije za dane materiale

C) Oblikovni parametri za opis retenzijskih krivulj

D) Vrednotenje meritev

E) Obrazci za meritve

F) Navodila za delo s potenciometrom WP4-T

G) Navodila za merjenje sukcije s pomočjo filter papirja

PRILOGA A) Osnovni podatki o preiskovanih materialih:

Vzorec	AC klasifikacija	Atterbergovi konsistenčni meji		Indeks plastičnosti	gostota zrn	Vpijanje vode - Enslin	MBI
		w _p %	w _L %				
K.M.		/	23.4	/	2.73	32	0
SIVIČA	CL	13.3	41.3	28.0	2.77	62	12
FLIŠ	CL	14.1	44.6	30.5	/	56	10
BENTONIT	CH	35.2	207.1	171.9	/	297	44

PRILOGA B) Meritve sukcije za dane materiale:

vrsta	KAMENA MOKA														
	TLAČNI LONEC						WP4-T								
w (%)	24.2	20.2	19.8	9.6	5.7	1.9	1.3	1.0	0.9	0.5	0.5	0.4	0.0	0.0	
s (Mpa)	-0.01	-0.03	-0.06	0.00	-0.15	-0.78	-0.88	-1.57	-1.71	-3.02	-2.43	-5.62	-150.50	-141.60	-136.72
s (kPa)	10	33	60	0	154	780	876	1569	1707	3020	2433	5623	150504	141603	136720
s (pF)	2.01	2.53	2.79	0.00	3.20	3.90	3.95	4.20	4.24	4.49	4.39	4.76	6.19	6.16	6.14

vrsta	TENZIOMETER				MFP-totalna				MFP-matrična				ENSLIN
	w (%)	20.1	7.5	9.3	16.7	19.2	15.6	9.2	6.7	19.2	15.6	9.2	
s (Mpa)	-0.01	-0.07	-0.07	-0.05	-0.41	-0.32	-0.31	-0.46	0.00	-0.09	-0.11	0.00	
s (kPa)	10	70	67	46	409	325	310	459	3	87	113	0	
s (pF)	2.01	2.85	2.83	2.67	3.62	3.52	3.50	3.67	1.50	2.95	3.06	0.00	
$\hat{\phi}_{4,SPP}$ (t/m ³)					1.69	1.75	1.61	1.62	1.69	1.75	1.61		
W _{SPP} (%)					19.2	15.6	9.2	6.7	19.2	15.6	9.2	32.3	
S _{rSPP}					0.85	0.75	0.36	0.26	0.85	0.75	0.36	1.00	
e _{SPP}					0.624	0.570	0.709	0.701	0.624	0.570	0.709	0.889	
W _{max}					22.7	20.7	25.8	25.5	22.7	20.7	25.8	32.3	

BENTONIT

vrsta	TLAČNI LONEC										WP4-T										
	w (%)	302.1	219.0	204.4	213.6	193.5	192.1	168.8	161.7	154.4	148.1	112.9	96.7	91.1	71.0	60.2	42.8	41.8	41.2	25.6	16.6
s (Mpa)	-0.01	-0.03	-0.06	0.00	-0.12	-0.11	-0.08	-0.09	-0.06	-0.11	-0.18	-0.35	-0.26	-0.49	-0.74	-1.39	-1.46	-1.44	-6.87	-30.40	-141.05
s (kPa)	10	33	60	0	123	113	82	90	58	107	177	350	262	485	737	1392	1463	1437	6868	30403	141052
s (pF)	2.01	2.53	2.79	0.00	3.10	3.06	2.92	2.96	2.77	3.04	3.26	3.55	3.43	3.69	3.88	4.15	4.17	4.17	4.85	5.49	6.16

vrsta	Sušen - desukcija										Vzorci pripravljene za SPP										TENZIOMETER	
	w (%)	32.5	25.6	12.9	54.2	70.6	95.9	153.9	210.0	37.6	39.3	18.8	30.1	50.2	58.3	31.4	38.7	40.0	38.6	201.6	148.6	
s (Mpa)	-3.10	-6.97	-63.26	-1.12	-0.46	-0.41	-0.09	-0.07	-2.03	-1.62	-20.02	-3.72	-0.98	-0.76	-3.38	-1.74	-1.65	-1.79	-0.01	-0.03		
s (kPa)	3100	6970	63260	1120	460	405	91	67	2028	1620	20020	3718	977	760	3383	1743	1652	1788	10	32		
s (pF)	4.50	4.85	5.81	4.06	3.67	3.62	2.97	2.83	4.32	4.22	5.31	4.58	4.00	3.89	4.54	4.25	4.23	4.26	2.01	2.51		

vrsta	po FPM	MFP-totalna					MFP-matrična					ENSLIN
		w (%)	51.1	29.0	30.0	18.8	50.4	58.5	29.0	30.0	50.4	
s (Mpa)	-1.12	-6.90	-6.03	-18.84	-3.04	-1.79	-5.64	-5.48	-1.64	-1.42	0.00	
s (kPa)	1118	6904	6025	18844	3043	1787	5645	5478	1637	1419	0	
s (pF)	4.06	4.85	4.79	5.28	4.49	4.26	4.76	4.75	4.22	4.16	0.00	
$\alpha_{d,SPP}$ (t/m ³)	1.09	1.21	1.21	1.09	1.09	1.02	1.21	1.21	1.09	1.02		
w _{SPP} (%)	50.6	30.1	30.1	18.6	50.6	59.3	30.1	30.1	50.6	59.3	297.0	
S _{r,SPP}	0.96	0.68	0.68	0.35	0.96	0.99	0.68	0.68	0.96	0.99	1.00	
e _{SPP}	1.375	1.156	1.156	1.386	1.375	1.552	1.156	1.156	1.375	1.552	7.722	
W _{max}	52.9	44.5	44.5	53.3	52.9	59.7	44.5	44.5	52.9	59.7	297.0	

SIVICA

vrsta	Naraven kos	Priprava 2					Vzorci pripravljeni za SPP					TLAČNI LONEC					WP4-T					
		31.3	1.6	4.5	14.6	16.2	4.7	11.0	20.1	16.6	26.8	26.2	29.6	34.7	20.5	16.2	9.4	8.0	6.3	3.9	1.7	
w (%)	5.0																					
s (Mpa)	-16.90	-0.14	-188.51	-22.67	-0.52	-0.30	-13.43	-0.77	-0.07	0.00	-0.01	-0.06	-0.03	-0.01	0.00	-0.28	-1.80	-3.10	-5.06	-27.04	-188.60	
s (kPa)	16896	135	188510	22670	515	303	13430	770	70	0	10	60	33	10	0	281	1800	3100	5056	27040	188600	
s (pF)	5.24	3.14	6.28	5.36	3.72	3.49	5.14	3.90	2.85	0.00	2.01	2.79	2.53	2.01	0.00	3.46	4.26	4.50	4.71	5.44	6.28	

Sušen - desukcija										
vrsta										
w (%)	1.5	4.3	6.0	6.9	10.1	16.6	22.7	26.9	32.3	
s (Mpa)	-254.97	-24.50	-9.85	-5.36	-1.92	-0.31	-0.19	-0.18	-0.09	
s (kPa)	254970	24500	9850	5360	1920	305	190	178	90	
s (pF)	6.42	5.40	5.00	4.74	4.29	3.49	3.29	3.26	2.96	

vrsta	Po FPM					MFP-totalna					MFP-matrična					ENSLIN	
	10.7	15.3	19.7	24.8	10.7	15.3	19.7	24.8	10.7	15.3	19.7	24.8	10.7	15.3	19.7		24.8
w (%)																	
s (Mpa)	-1.09	-0.32	0.00	0.00	-2.66	-1.37	-0.82	-0.55	-1.62	-0.74	-0.18	-0.01	0.00				
s (kPa)	1092	319	0	0	2657	1368	822	549	1625	736	176	13	0				
s (pF)	4.05	3.51	0.00	0.00	4.43	4.14	3.92	3.75	4.22	3.88	3.25	2.12	0.00				
$\rho_{d,SPP}$ (t/m ³)	1.78	1.79	1.67	1.55	1.78	1.79	1.67	1.55	1.78	1.79	1.67	1.55					
W _{SPP} (%)	11.0	16.8	21.6	26.6	11.0	16.8	21.6	26.6	11.0	16.8	21.6	26.6	62.0				
S _{fSPP}	0.56	0.86	0.92	0.94	0.56	0.86	0.92	0.94	0.56	0.86	0.92	0.94	1.00				
e _{SPP}	0.541	0.535	0.647	0.779	0.541	0.535	0.647	0.779	0.541	0.535	0.647	0.779	1.705				
W _{max}	19.7	19.4	23.5	28.3	19.7	19.4	23.5	28.3	19.7	19.4	23.5	28.3	62.0				


PRILOGA C) Oblikovni parametri za opis retenzijskih krivulj:

material	Fredlund in Xing					Visser	
	w_r	s_r	a_f	n_f	m_f	a	b
Kamena moka	31.93	181.5	90.25	0.830	3.721	377.03	-0.8306
Kamena moka - zbita	20.01	106.7	89.30	8.393	0.809	653.76	-0.8914
Bentonit	305.82	145.2	42.48	1.043	1.165	904.43	-0.4015
Fliš	55.99	2127.9	16.96	1.057	0.998	112.31	-0.3265
Fliš - zbit	23.53	857.6	538.86	0.872	0.970	139.77	-0.3468
Sivica	62.00	2500.0	10.00	0.600	1.600	86.91	-0.3044
Sivica - zbita	28.22	285.4	119.30	0.555	1.122	122.20	-0.3433


material	van Genuchten				Brooks in Corey			
	w_r	w_s	a_{vg}	n_{vg}	w_r	w_s	a_c	n_c
Kamena moka	0.00	30.0	0.041	1.760	0.00	32.33	18.331	0.716
Kamena moka - zbita	0.00	20.1	0.010	3.386	0.59	20.70	74.268	1.908
Bentonit	0.00	304.0	0.037	1.456	0.00	302.13	20.499	0.425
Fliš	0.00	56.2	0.109	1.329	0.00	56.20	6.002	0.295
Fliš - zbit	0.00	22.6	0.003	1.416	0.00	23.95	109.097	0.277
Sivica	0.00	62.4	0.726	1.256	0.00	62.00	1.283	0.252
Sivica - zbita	0.00	27.0	0.014	1.320	0.00	28.34	51.998	0.305

PRILOGA D) Vrednotenje meritev:


o Merjenje sukcije s filter papirjem

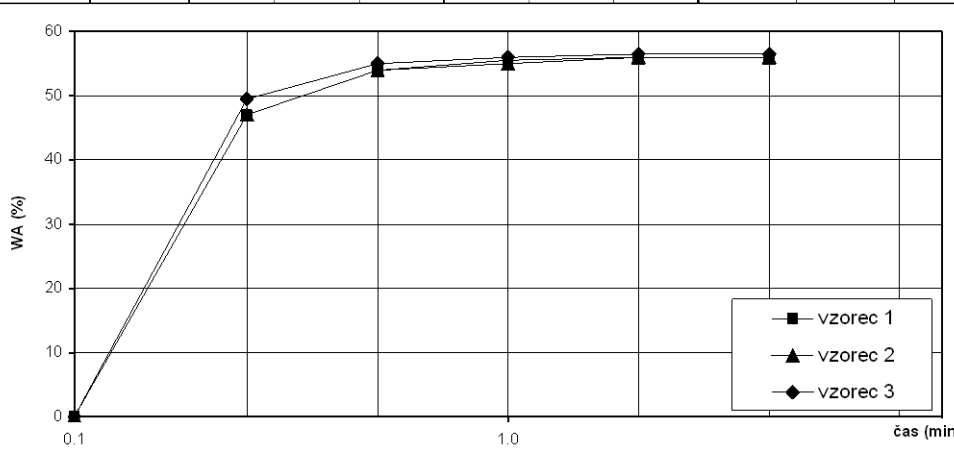
		SUKCIJA MPF						Katedra za mehaniko tal z laboratorijem <i>Jamova c. 2, p. p. 3422</i> <i>1000 Ljubljana, Slovenija</i> <i>telefon 01 4768 500</i> <i>faks 01 4250 681</i> <i>e-mail bmajsa@fgg.uni-lj.si</i>
LOKACIJA: AC MARIBOR LENART		D.N.: 22/06						
$\gamma_s =$ 2.70 t/m ³		DATUM DOSTAVE:						
		POROČILO:						
	Vrtina:	0363	0364	0365	0366	0437-1	0437-2	
	Globina:							
TOTALNA 1	m _{p1}	108.5527	85.9681		127.8302	92.9587	103.3548	g
	m _{p+f1}	108.9378	86.3551		128.2505	93.3554	103.7612	g
	m _{p+f2}	108.8570	86.2709		128.1482	93.2599	103.6623	g
	m _{p2}	108.5546	85.9679		127.8302	92.9578	103.3535	g
	sukcija	4.17	4.15		3.84	3.90	3.88	pF
TOTALNA 2	m _{p1}	95.1220	93.3909	93.3928	95.1217	108.9685	83.0355	g
	m _{p+f1}	95.5095	93.7737	93.7887	95.5260	109.3699	83.4314	g
	m _{p+f2}	95.4281	93.6905	93.6945	95.4238	109.2738	83.3360	g
	m _{p2}	95.1209	93.3905	93.3900	95.1216	108.9689	83.0341	g
	sukcija	4.26	4.16	3.99	3.73	3.88	3.91	pF
MATRIČNA 1	m _{p1}	117.3320	102.9288	102.9309	110.6073	99.7276	85.4315	g
	m _{p+f1}	117.5753	103.1716	103.1860	110.8573	99.9754	85.6769	g
	m _{p+f2}	117.5182	103.1143	103.1180	110.7878	99.9123	85.6130	g
	m _{p2}	117.3283	102.9280	102.9272	110.6073	99.7267	85.4301	g
	sukcija	4.12	3.97	3.74	3.41	3.75	3.70	pF
MATRIČNA 2	m _{p1}							g
	m _{p+f1}							g
	m _{p+f2}							g
	m _{p2}							g
	sukcija							pF
VLAGA	posodica	7	51	13	44	36	48	
	m _p	34.48	35.70	35.03	35.21	34.10	35.61	g
	m _{p+fn}	168.60	157.19	150.47	154.67	128.32	141.90	g
	m _{p+ss}	143.32	138.22	122.54	127.98	111.20	120.74	g
VALJ	D	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	mm
	H	19.10	19.10	19.10	19.10	19.10	19.10	mm
	m _v	82.51	82.27	82.27	83.46	83.36	82.51	g
	m _{v+fn}	218.77	225.62	215.96	219.32	221.03	213.82	g
KONTROLA	totalna	OK	OK	1	OK	OK	OK	
	matrična	1	1	1	1	1	1	
PODATKI	vlaga	23.23	18.50	31.92	28.77	22.20	24.86	%
	sukcija _{total}	-1.641	-1.419	-0.977	-0.611	-0.775	-0.788	MPa
	sukcija _{matr}	-1.320	-0.930	-0.545	-0.255	-0.562	-0.506	MPa
	γ_d	1.50	1.65	1.38	1.44	1.53	1.43	t/m ³
	Sr	0.79	0.78	0.90	0.88	0.79	0.76	
	e	0.795	0.641	0.958	0.881	0.762	0.887	
	wvol.	0.15	0.11	0.23	0.20	0.14	0.17	
	wmax	29.44	23.73	35.49	32.63	28.21	32.86	%
PREISKAL: M.Maček		PREGLEDAL: mag. A. Petkovšek						
ZAČ. PREISKAVE: 19.7.06								
KON. PREISKAVE: 19.7.06		PRILOGA:						

o Merjenje sukcije s potenciometrom WP4-T

Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo 		SUKCIJA WP4-T					Katedra za mehaniko tal z laboratorijem Jamova c. 2, p. p. 3433 1000 Ljubljana, Slovenija telefon 01 4798 500 faks 01 4350 081 e-mail: bmojca@fgg.uni-lj.si	
LOKACIJA: PLAZ POLANA VRTINA: VREČA 2 GLOBINA:							D.N.: 22/06 DATUM DOSTAVE: POROČILO:	
$\rho_s =$		2.70 t/m ³						
	Vrtina:	20%	15%	10%	7%	4%	2%	
	Globina:							
SUKCIJA		0.11	0.22	0.94	1.80	5.15	28.04	Mpa
VLAGA	posodica	1	2	3	4	5	6	
	m _p	32.72	32.77	33.6	33	32.77	32.57	g
	m _{p+H}	43.81	44.63	43.89	42.99	42.28	41.87	g
	m _{p+S}	42.03	43.12	43	42.36	41.88	41.65	g
VALJ	D	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	mm
	H	5.55	6.1	6.05	6.15	5.95	6.1	mm
	m _v	6.25	6.87	6.46	7.15	6.67	6.68	g
	m _{v+H}	17.36	18.75	16.78	17.15	16.19	15.94	g
PODATKI	vlaga	19.1	14.6	9.5	6.7	4.4	2.4	%
	sukcija	110	223	936	1795	5147	28040	kPa
	sukcija	3.05	3.36	3.98	4.26	4.72	5.46	pF
	ρ_d	1.72	1.74	1.59	1.56	1.57	1.51	t/m ³
	Sr	0.90	0.71	0.37	0.25	0.16	0.08	
	e	0.572	0.555	0.696	0.734	0.724	0.783	
	wvol.	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	
wmax	21.20	20.55	25.77	27.20	26.82	29.00	%	
	Vrtina:							
	Globina:							
SUKCIJA								Mpa
VLAGA	posodica							
	m _p							g
	m _{p+H}							g
	m _{p+S}							g
VALJ	D							mm
	H							mm
	m _v							g
	m _{v+H}							g
PODATKI	vlaga							%
	sukcija							kPa
	sukcija							pF
	ρ_d							t/m ³
	Sr							
	e							
	wvol.							
wmax							%	
PREISKAL: M.Maček ZAČ. PREISKAVE: 19.7.06 KON. PREISKAVE: 20.7.06				PREGLEDAL: mag. A. Petkovšek PRILOGA:				

○ Merjenje vodovpojnosti – Enslin


 <p>Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo</p>	<h2 style="margin: 0;">DOLOČANJE VPIJANJA VODE</h2> <p style="margin: 10px 0 0 0;">DIN 18132: 1995-12</p>	Katedra za mehaniko tal z laboratorijem Jamova c. 2, p.p.3422 1000 Ljubljana, Slovenija telefon 01 4768 500 faks 01 4250 681 e-mail bmajsa@fgg.uni-lj.si							
LOKACIJA: VRTINA: FLIŠ GLOBINA: OPIS ZEMLJINE:	D.N.: DATUM DOSTAVE: POROČILO:								
priprava vzorca: posušen, zdrobljen, presejan skozi sito 0.5mm temperatura: 24 °C masa vzorca m_d : 1.00 g									
čas	ODČITEK (mL)			MASA VODE m_w (g)			ABSORPCIJA w_A (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
sec 0	4.950	4.960	4.945	0.000	0.000	0.000	0	0	0
sec 15	4.480	4.490	4.450	0.470	0.470	0.495	47	47	50
sec 30	4.410	4.420	4.395	0.540	0.540	0.550	54	54	55
min 1	4.395	4.410	4.385	0.555	0.550	0.560	56	55	56
min 2	4.390	4.400	4.380	0.560	0.560	0.565	56	56	57
min 4	4.390	4.400	4.380	0.560	0.560	0.565	56	56	57
min 8									
min 15									
min 30									
min 45									
ure 1									
ure 2									
ure 4									
ure 6									
ure 24									

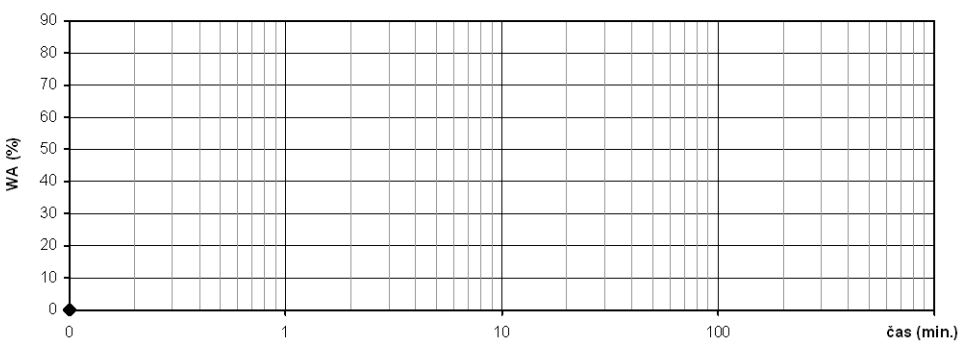


č. čas (min.)

ABSORPCIJA w_A: 56.2 %	
PREISKAL: M. Maček ZAČ. PREISKAVE: 6.2.06 KON. PREISKAVE: 6.2.06	PREGLEDAL: mag. A. Petkovšek PRILOGA:

○ Merjenje vodoupojnosti – Enslin

<p>Univerza v Ljubljani</p> <p>Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo</p> 	<h2 style="margin: 0;">DOLOČANJE VPIJANJA VODE</h2> <p style="margin: 10px 0 0 0;">DIN 18132: 1995-12</p>	<p>Katedra za mehaniko tal z laboratorijem</p> <p>Jamova c. 2, p. p. 3423 1000 Ljubljana, Slovenija telefon 01 4768 500 faks 01 4350 681 e-mail zmojca@fgg.uni-lj.si</p>			
<p>LOKACIJA: _____ D.N.: _____</p> <p>VRTINA: _____</p> <p>GLOBALINA: _____</p>					
<p>priprava vzorca: _____</p> <p>temperatura: _____ °C</p> <p>masa vzorca m_d: _____ g</p>					
	čas	ODČITEK (mL)	MASA VODE m_w (g)	ABSORPCIJA w_a (%)	
		1 2 3	1 2 3	1 2 3	
sec	0				
sec	15				
sec	30				
min	1				
min	2				
min	4				
min	8				
min	15				
min	30				
min	45				
ure	1				
ure	2				
ure	4				
ure	6				
ure	24				



ABSORPCIJA w_A: _____ %
PREISKAL: _____ PREGLEDAL: _____ ZAČ. PREISKAVE: _____ KON. PREISKAVE: _____

PRILOGA F) Navodila za delo s potenciometrom WP4-T:

MERITEV SUKCIJE Z WP4-T

Pripomočki

- Naprava WP4-T
- Plastične posodice in pokrovčki
- 0,5M KCl (0,5 molaren kalijev klorid)
- Nožki, žličke in valjast nož višine 6mm za vgradnjo vzorca
- Kirurške rokavice
- Petrijevke premera 70mm
- Tehnica natančnosti $\pm 0,0001$ g
- Škarje in izolirni trak
- Čistilni pribor:
plastična palčka, destilirana voda, isopropanol, brezprašni robčki (za čiščenje leč)

Priprava WP4-T

- Vključimo WP4-T (stikalo je pod priključkom za povezavo z računalnikom (levo-spodaj za napravo)).
- Pritisnemo gumb »A« (levo zgoraj). V zgornjem levem vogalu se izpiše napis C, kar pomeni stalno odčitavanje.
- Pritisnemo gumb »D« (desno spodaj). Naprava pokaže temperaturo komore (T_b).
- Vključimo računalnik.
- Zaženemo program HyperTerminal (oz WP4-T bližnjico na omizju).
- V HyperTerminalu izberemo v orodni vrstici možnost Edit / Clear Backscroll in Clear Screen in izbrišemo prejšnje podatke.
- Počakamo, da se naprava segreje na 25°C ($T_b = 25^\circ\text{C}$).

Umeritev WP4-T

- Pred vsakim začetkom meritev umerimo napravo.
- V posodico nalijemo 0,5M KCl oziroma izpraznimo ampulo, tako da pokrijemo dno posodice. Očistimo rob in zunanost posodice z robčkom.
- Posodico vstavimo v merilni predalček.
- Gumb obrnemo na »READ«
- Počakamo, da se meritve umirijo (kar najbolje vidimo iz izpisa v HyperTerminal-u).
- Meritve morajo biti med 2,1 in 2,3 MPa.
- Če ni, nastavimo začetno točko naprave.
- Obrnemo gumb na »OPEN/LOAD« in odstranimo posodico.
- Meritve prekopiramo v excel-ovo datoteko in jih opremimo s podatki meritve (datum, ime vzorca, vlaga, končna meritev sukcije in morebitne opombe) (Zgled datoteke je na C:\SUKCIJA\sukcija.xls)
- Izbrišemo zaslon v HyperTerminalu (Edit/Clear Backscroll in Clear Screen)
- S pritiskom na gumb »D« (desno spodaj) izmerimo temperaturo naprave (T_b).

Nastavitev začetne točke WP4-T

- Pritisnemo gumb »B« (levo spodaj) nato gumb »C« (desno zgoraj) in potrdimo s ponovnim pritiskom na gumb »B«.
- Počakamo na meritev.

- Z gumboma »C« in »D« (desna gumba) nastavimo želeno vrednost: 2,22MPa

Opombe

- Če je meritev pri nastavitvenem merjenju dosti drugačna od meritve pri umeritvi le to pri nastavitvi začetne točke upoštevamo (prišteješ razliko med meritvijo pri nastavitvi začetne točke in meritvijo pri umeritvi).

Priprava vzorca

- Odvzamemo kos intaktnega vzorca.
- Vzorček vtisnemo v valjast nož (višine 6mm).
- Približno 5g vzorca navlažimo na želeno vlažnost.
- Odvzamemo kos materiala in ga posušimo na želeno vlago.

Postopek

- Vzorec damo v posodico, ki jo pokrijemo s pokrovčkom in označimo.
- Vzorec naj zapolni samo polovico posode.
- Če je le mogoče, naj vzorec pokrije dno.
- Očistimo rob posodice z robčkom, da zagotovimo zrakotesnost komore.
- Če bomo meritev delali šele čez nekaj časa, stik med posodico in pokrovčkom prelepimo z izolirnim trakom

Meritev

- Vzorec/vzorke položimo na napravo za približno pol ure, da se segrejejo na temperaturo naprave.
- Posodico z vzorcem vstavimo v merilni predalček.
- Gumb obrnemo na »READ«
- Če se pojavi napis »SAMPLE TO HOT«, zavrtimo gumb na »OPEN/LOAD« in izvlečemo predalček. Pritisnemo gumb »D« (desno spodaj), da naprava pokaže temperaturno razliko med vzorcem in napravo. Vsakih 5-15s porinemo predalček v napravo, da preverimo temperaturo vzorca. Ko le ta pade pod temperaturo naprave (razlika je negativna), obrnemo gumb na »READ« in pričnemo z meritvijo.
- Če se pojavi napis »Equilibrating $T_s - T_b = - \dots$ «, to pomeni, da smo vstavili vzorec z prenizko temperaturo. Ne naredimo nič, le počakati moramo, da se temperatura umiri (približno 24.5°C).
- Počakamo, da se meritve umirijo (kar vidimo iz izpisa v HyperTerminal-u).
- Obrnemo gumb na »OPEN/LOAD« in odstranimo posodico.
- Meritve prekopiramo v Excel-ovo datoteko in jih opremimo s podatki meritve (datum, ime vzorca, vlaga, končna meritev sukcije in morebitne opombe)
- Izbrišemo zaslon v HyperTerminalu
- Vzorčku določimo vlago. (stehtamo stekleno posodico (s pokrovčkom) in stekleno posodico z vzorcem, posušimo, damo v eksikator, stehtamo stekleno posodico s suhim vzorcem)

Opombe

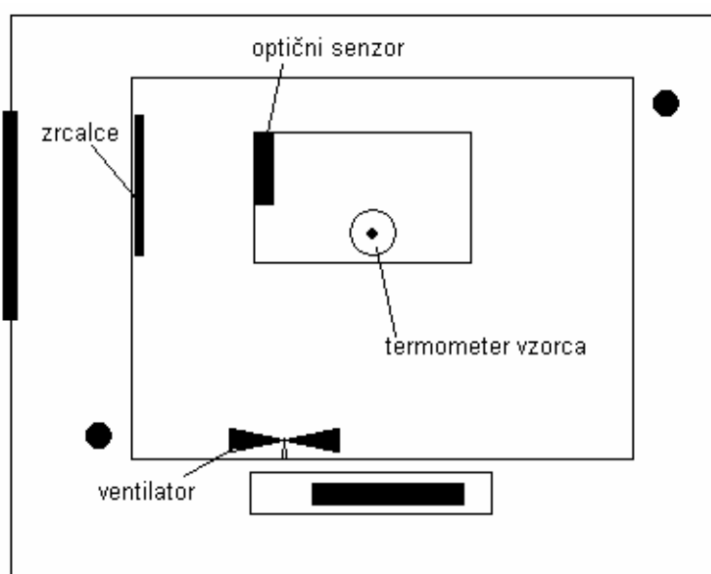
- Če je vrednost sukcije večja od 30MPa, obstaja možnost, da se bodo absolutne vrednosti posameznih meritev znatno razlikovale. Za to ga lahko po 2-3 meritvah izvlečemo iz naprave.
- Pri visokih sukcijah nad 2MPa ni potrebno, da se vrednost umiri v meritvi MPa ampak v meritvi pF.
- Pri nizkih sukcijah se mora vzorec umiriti v skali MPa.
- Občasno se meritve nočejo izpisati na okno HyperTerminal-a zato kliknemo nanj, odpremo drugo okno ali ga celo ponovno zaženemo.
- Trikotnik desno zgoraj pomeni čiščenje naprave.

Vzdrževanje naprave

- Vsakih 100 meritev ali če se naprava ne kaže več pravilnih vrednosti pri umerjanju, jo je potrebno očistiti.

Postopek

- Izklopi kabel za elektriko in povezavo z računalnikom.
- Odvij vijak pokrova (na zadnji strani naprave) in odstrani pokrov tako, da ga potisneš nazaj in dvigneš.
- Odvij vijaka na pokrovu merilne celice.
- Izključi 20-pin povezavo na merilni celici (to narediš tako, da potisneš dva nastavka narazen).
- Dvigni blok in obrnjena na glavo previdno položi na mizo, tako da vidiš merilno komoro.
- Merilna komora:



-
- Pred čiščenjem si umij roke z milom.
- Navij 1,5-2cm široko krpico iz čistilnega robčka na paličko. Robček namoči v destilirano vodo ali v Decagon čistilno raztopino in nežno očisti zrcalce. Če je zrcalce zelo umazano, ga lahko očistiš tudi z isopropanolom, vendar ga moraš nato večkrat obrisati z robčki namočenimi v destilirano vodo. Očisti še termometer vzorca, optični senzor in merilno komoro (pazi na lopatice ventilatorja) na podoben način kot zrcalce.
- Odstrani merilni predalček za vzorec ter očisti merilni prostor in predalček morebitnih delcev.
- Preveri ali je vse očiščeno.
- Nastavi merilno celico na napravo, vključi 20-pin povezavo na merilno celico (potisni do konca) in zaskoči z nastavkoma. Privij vijake na pokrovu merilne celice (s prsti).
- Pritrdi pokrov in pričvrsti z vijakom pokrova.
- Vključi kabel za elektriko in povezavo z računalnikom.

PRILOGA G) Navodila za merjenje sukcije s pomočjo filter papirja:

MERJENJE SUKCIJE S POMOČJO FILTER PAPIRJA

Pripomočki

- filter papir (Whatman No.42 ali Schleicher and Schuell No. 589/2)
- posoda za vzorec (kozarec za vlaganje)
- 4x posoda za filter papir (petrijevka $\phi 90$)
- hladilna torba (za stalnost temperature)
- tehtnica natančnosti $\pm 0,0001\text{g}$
- sušilna peč s temperaturo $105\pm 5^\circ\text{C}$
- cilindrični noži (3x $\phi 70$ mm in 1x $\phi 50$ mm), noži in žična žaga, pincete, kirurške rokavice, eksikator, termometer

Priprava filter papirja

- Filter papir $\phi D=70$ in $\phi 55$ sušimo v peči na $105\pm 5^\circ\text{C}$ 16 ur.
- Do uporabe ga shrani v eksikatorju.

Priprava vzorca

- Tri vzorce vrežemo v cilindrični nož $\phi 70$. Površine previdno poravnamo.
- Filter papirja se lahko dotikamo le s pinceto in kirurškimi rokavicami.
- Prvi valj položi na podlago. Na poravnano površino položi filter papir $\phi 70$, na sredino tega drugi filter papir $\phi 55$ in ponovno filter papir $\phi 70$. Pazi, da med filter papirje ne pride umazanija.
- Na prvi valj položimo drugega in zopet naredimo enak sendvič filter papirjev.
- Na drugi valj položi tretjega.
- Med cilindričnimi noži nalepi izolirni trak, da zatesnimo stik.
- Vzorec vstavimo v kozarec.
- Prostor med kozarcem in vzorcem zapolnimo z zemljino.
- Na vzorec položimo cilindrični nož $\phi 50$ s priostreno stranjo navzgor.
- Dvema filter papirjema $\phi 70$ s pinceto ostro zapognemo rob. Ta dva filter papirja položimo na nož $\phi 50$ tako, da se ne dotikata sten kozarca in da nista zapognjena roba na isti strani.
- Obrišemo pokrov kozarca.
- Zapremo kozarec.
- Na pokrov kozarca napišemo datum vgradnje in ime vzorca.
- Kozarec damo v hladilno torbo.

Meritev

- Za vsak filter papir ($\phi 70$ nad vzorcem in $\phi 55$) ponovimo naslednji postopek:
 - Filter papirja in petrijevke se lahko dotikamo le s pinceto in kirurškimi rokavicami.
 - Stehtamo petrijevko
 - Manj kot v 5sek preložimo merjeni filter papir iz vzorca v petrijevko
 - Stehtamo petrijevko in filter papir
- Filter papirje sušimo v peči na $105\pm 5^\circ\text{C}$ 2 uri.
- Petrijevke zložimo v eksikator, da se shladijo.
- Za vsak filter papir ponovimo naslednji postopek:
 - Stehtamo petrijevko in filter papir.
 - Odstranimo filter papir.
 - Stehtamo petrijevko.
- Stehtamo sredinski valj in na vzorcu sredinskega valja izmerimo vlago.
- Iz sredinskega valja odstranimo zemljino.
- Cilindrični nož stehtamo in premerimo.