

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

Kandidatka:

Polona Kogovšek

Enodimenzionalna konsolidacija tal z napetostno odvisnimi materialnimi parametri

Diplomska naloga št.: 3003

Mentor:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 21. 3. 2008

Hvala mentorju Janku Logarju za pomoč in napotke pri pripravi diplomske naloge.

Hvala somentorju Juretu Klopčiču za podporo, pomoč in potrpljenje.

Hvala Mateju Mačku za pomoč pri zbiranju podatkov.

in ne nazadnje

Hvala staršema, sestri in Maticu.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana POLONA KOGOVŠEK izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»ENODIMENZIONALNA KONSOLIDACIJA TAL Z NAPETOSTNO ODVISNIMI
MATERIALNIMI PARAMETRI«.

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

Ljubljana, 10.03.08

Podpis: _____

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.13(043.2)
Avtor:	Polona Kogovšek
Mentor:	doc. dr. Janko Logar, univ. dipl. inž.grad.
Somentor:	Jure Klopčič, univ. dipl. inž.grad.
Naslov:	Enodimenzionalna konsolidacija tal z napetostno odvisnimi materialnimi parametri
Obseg in oprema:	71 str., 20 pregl., 18 graf., 35 sl., 45 en.,
Ključne besede:	enodimenzionalna konsolidacija, vodoprepustnost, količnik por
Izveček	

Karakteristike stisljivosti zemljine po globini niso konstantne. Tako je diplomska naloga nastala z namenom računati posedke in čas, v katerem se posedek izvrši, z napetostno odvisnimi materialnimi parametri (krajše nelinearnimi parametri). Zaradi kompleksnosti računa je obremenitev predstavljala brezkrajna obtežba. Zanimala nas je predvsem primerjava zgoraj omenjenega časa, računanega najprej s konstantnimi in nato še z nelinearnimi materialnimi parametri.

Krivulje stisljivosti pri simulaciji edometra, dobljene s programom AJDA, razvitim v okviru naloge, so se z ustreznim prekonsolidacijskim tlakom in ustreznim določanjem razbremenilne konstante κ , skoraj popolnoma prekrile s krivuljami dobljenimi v programu CONDES0 (Yao, Znidarcic, 1997). Po pričakovanjih sta obe skupini krivulj pri prvi bremenski stopnji nekoliko odstopali od krivulj, ki smo jih dobili z edometriško preiskavo. Pri višjih bremenskih stopnjah so se vse krivulje ponovno prekrile.

Pri primerjavi rezultatov programa AJDA z meritvami pod poskusnim nasipom na Ljubljanskem barju smo prišli do zaključka, da je izračun posedkov s programom AJDA primerljiv z meritvami.

Iz zgoraj navedenih ugotovitev smo zaključili, da AJDA daje dovolj dobre rezultate, da z njimi preverimo razlike izračunanih parametrov, če predpostavimo konstanten oz. nelinearen potek karakteristik stisljivosti zemljine po globini. Ugotovili smo, da se spreminja predvsem čas končane konsolidacije. V povprečju je ta, izračunan z nelinearnimi parametri, za kar polovico manjši od konsolidacijskega časa izračunanega s konstantnimi parametri.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	624.13(043.2)
Author:	Polona Kogovšek
Supervisor:	Assist. Prof. dr. Janko Logar, b.s.c.e.
Co-Supervisor:	Jure Klopčič, b.s.c.e.
Title:	One-dimensional consolidation with strain-dependent material parameters
Notes:	71 p., 20 tab., 18 diag., 35 fig., 45 eq.,
Key Word:	one-dimensional consolidation, permeability, void ratio

Abstract

Since the characteristics of soil compressibility are not constant with depth, the main purpose of the thesis was the calculation of the settlements and their development during the consolidation process with strain-dependent material parameters (nonlinear parameters in short). To simplify the task only wide spread load was used for calculations. We focused mainly on comparison of the consolidation times, calculated with constant and with nonlinear parameters.

To verify the AJDA code which was developed for the purpose of this thesis, several comparisons of the calculated compression curves were made to the existed code CONDES0 (Yao, Znidarcic, 1997). Because of the different material model used in both codes the overconsolidation pressure and swelling constant were suitably modified to obtain the agreement of the calculated compression lines. According to expectations the compression lines obtained with the above mentioned codes did not fully fit the oedometer measurements in the first load step, while in next load steps a satisfying agreement was obtained.

A comparison of the calculated and measured response was performed for the test embankment on Ljubljana marshland and comparable settlements were obtained.

On the basis of the presented calculations and comparisons to other computer codes and the performed measurements we can conclude that the AJDA code is suitable for the calculation of the consolidation settlements and their development during time for constant as well as for the nonlinear parameters. The main difference between these two calculations is the required time period of the consolidation process. In average the calculated time with the nonlinear parameters is approximately half of time calculated with the constant parameters.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Opredelitev problema in namen naloge	1
1.2	Metoda dela	2
2	KONSOLIDACIJA	3
2.1	Uvod	3
2.2	Pojem konsolidacije	3
2.3	Terzaghijeva enodimenzionalna konsolidacija	5
3	VODOPREPUSTNOST	7
3.1	Darcy-jev zakon	7
3.2	Matematični modeli prepustnosti	8
3.2.1	Model v programu AJDA	9
3.2.2	Model v programu CONDES0	9
4	STISLJIVOST ZEMLJINE $e(\sigma)$	10
4.1	Mehanizmi stiskanja zrn zemljine	10
4.2	Napetostno stanje pri obremenjevanju in razbremenjevanju zemljine	11
4.3	Cam clay model	12
4.3.1	Izotropno obremenjevanje in razbremenjevanje	12
4.3.2	Prekonsolidacijski tlak	14
4.3.3	Enodimenzionalno obremenjevanje in razbremenjevanje	15
4.3.4	Enačbe	16
4.4	Hiperbolični model	17
4.5	Primerjava hiperboličnega in Cam clay modela	17
5	PREIZKUSI IN REZULTATI	19
5.1	Edometer	19
5.1.1	Opis	19
5.1.2	Rezultati	20
5.2	Ugotavljanje prostorninske teže zrn – metoda s piknometrom	22
5.2.1	Opis	22
5.2.2	Rezultati	22
5.3	Triosna strižna preiskava	23

5.3.1	Opis	23
5.3.2	Rezultati	25
6	DOLOČANJE MATERIALNIH PARAMETROV	26
6.1	Funkcija $k(e)$	26
6.1.1	AJDA	26
6.1.2	CONDES0	31
6.2	Funkcija $e=e(\sigma'_i)$	32
6.2.1	AJDA	32
6.2.2	CONDES0	33
7	RAČUN FIZIKALNIH KOLIČIN V PROCESU KONSOLIDACIJE	34
7.1	Konstantni materialni parametri	34
7.2	Nelinearni materialni parametri	36
8	RAČUNSKI PRIMERI	39
8.1	Vhodni podatki	39
8.1.1	AJDA	39
8.1.2	CONDES036	39
8.2	Primerjava izračunov iz programov CONDES0 in AJDA	40
8.3	Simulacija edometra	42
8.3.1	CH glina	43
8.3.2	Primer CL gline (OŠO-8)	47
8.3.3	Primer MH melja	51
8.3.4	Primer SC peska	55
8.3.5	Primerjava in komentar rezultatov	59
8.4	Posedanje pod poskusnim nasipom na Ljubljanskem barju	60
8.5	Primerjava računov posedkov s konstantnimi in nelinearnimi parametri	61
8.5.1	Račun posedkov s konstantnimi parametri s "peš" računom	61
8.5.2	Rezultati	63
8.5.3	Komentar	66
	ZAKLJUČEK	67
	VIRI	68

KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Prepustnosti k , določene po Taylorju in merjene neposredno
- Preglednica 2: Količniki por v v odvisnosti od napetosti
- Preglednica 3: Prostorninske teže zrn posameznih vzorcev
- Preglednica 4: Prepustnosti, merjene neposredno in določene po Taylorju
- Preglednica 5: Zbrane funkcije $k(e)$
- Preglednica 6: Prikaz iskanja parametrov A , B in Z s pomočjo reševalca v Excelu
- Preglednica 7: Vhodni podatki programa CONDES0 za ugotavljanje pravilnosti računanja programa AJDA
- Preglednica 8: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za CH glino
- Preglednica 9: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za CH glino
- Preglednica 10: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za CL glino (OŠO-8)
- Preglednica 11: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za CL glino (OŠO-8)
- Preglednica 12: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za MH melj
- Preglednica 13: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za MH melj
- Preglednica 14: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za SC pesek
- Preglednica 15: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za SC pesek
- Preglednica 16: Materialni parametri temeljnih tal pod poskusnim nasipom
- Preglednica 17: Primerjava velikosti posedkov in časa končane konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in spodnji rob
- Preglednica 18: Primerjava časov konsolidacije pri različnih U_v računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in spodnji rob
- Preglednica 19: Primerjava velikosti posedkov in časa končane konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in neprepusten spodnji rob
- Preglednica 20: Primerjava časov konsolidacije pri različnih U_v računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in neprepusten spodnji rob

KAZALO GRAFIKONOV

- Grafikon 1: Prepustnosti k določene po Taylorju in merjene neposredno
- Grafikon 2: Količniki por v odvisnosti od napetosti
- Grafikon 3: Prostorninske teže zrn posameznih vzorcev
- Grafikon 4: Prepustnosti, merjene neposredno in določene po Taylorju
- Grafikon 5: Vodoprepustnost, določena po Taylorju, v odvisnosti od e_z in e_k ter neposredno merjena vodoprepustnost v odvisnosti od e_k
- Grafikon 6: Razvrstitev materialov na osnovi klasifikacije koherentnih zemljin
- Grafikon 7: Zrisane funkcije $k(e)$ za vrtine iz Luke Koper
- Grafikon 8: Določanje funkcije $k(e)$ s pomočjo trendne črte v Excelu
- Grafikon 9: Časovni potek konsolidacije
- Grafikon 10: Krivulja stisljivosti
- Grafikon 11: Časovni potek konsolidacije pri CH glini
- Grafikon 12: Krivulja stisljivosti pri CH glini
- Grafikon 13: Časovni potek konsolidacije pri CL glini (OŠO-8)
- Grafikon 14: Krivulja stisljivosti pri CL glini (OŠO-8)
- Grafikon 15: Časovni potek konsolidacije pri MH melju
- Grafikon 16: Krivulja stisljivosti pri MH melju
- Grafikon 17: Časovni potek konsolidacije pri SC pesku
- Grafikon 18: Krivulja stisljivosti pri SC pesku
- Grafikon 19: Primerjava časovnih potekov konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in spodnji rob
- Grafikon 20: Primerjava časovnih potekov konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in neprepusten spodnji rob

KAZALO SLIK

- Slika 1: Prikaz konsolidacije na vzmeteh (<http://www.ce.washington.edu/>)
- Slika 2: Prikaz realnega toka vode skozi zemljino na levi strani in poenostavljenega modela na desni (Reddi N. L., 2003)
- Slika 3: Prepustnost k v odvisnosti od količnika por za različne materiale (Reddi N. L., 2003)
- Slika 4: Sprememba prostornine vzorca pri obremenitvi (<http://environment.uwe.ac.uk>)
- Slika 5: Obnašanje zemljine pri stiskanju in razbremenjevanju (<http://environment.uwe.ac.uk>)
- Slika 6: Prikaz napetosti in deformacij pri enodimenzionalnem deformacijskem stanju (<http://environment.uwe.ac.uk>)
- Slika 7: Krivulja stisljivosti $p'(\epsilon_v)$ in $v(p')$ (<http://environment.uwe.ac.uk>)
- Slika 8: Krivulja specifične prostornine v v odvisnosti od logaritma glavne napetosti
- Slika 9: Prikaz prekonsolidacijskega tlaka
- Slika 10: Krivulja stisljivosti $\sigma'_z(\epsilon_v)$ in $e(\sigma'_z)$ (<http://environment.uwe.ac.uk>)
- Slika 11: Krivulja količnika por v v odvisnosti od logaritma napetosti
- Slika 12: Primerjava hiperboličnega in Cam clay modela
- Slika 13: Sestavni deli edometrične celice
- Slika 14: Piknometer (<http://en.wikipedia.org>)
- Slika 15: Princip triosne preiskave (Head K. H., 1994)
- Slika 16: Krivulja stisljivosti
- Slika 17: Diskretizacija prostora (sloja)
- Slika 18: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 25 kPa
- Slika 19: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 800 – 1600 kPa
- Slika 20: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa
- Slika 21: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 200 – 400 kPa
- Slika 22: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 50 kPa
- Slika 23: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 400 – 800 kPa
- Slika 24: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa
- Slika 25: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 200 – 400 kPa
- Slika 26: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 6,5 kPa

Slika 27: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa

Slika 28: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 12,5 – 25 kPa

Slika 29: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 25 – 50 kPa

Slika 30: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 25 kPa

Slika 31: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 200 – 400 kPa

Slika 32: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 50 – 100 kPa

Slika 33: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema in namen naloge

Vzemimo primer, da naročnik želi imeti na podaljšku veza 11 v Luki Koper obalo za generalne tovore. Da bi lahko ugodili željam in uspešno zaključili projekt, potrebujemo na tem mestu trajno uporabno površino brez prekomernih deformacij pri obremenitvi tal 80 kPa. Kaj lahko storimo, če sedanje stanje ne ustreza tem zahtevam?

Na razpolago imamo kar nekaj rešitev. Primerna in zanimiva se nam zdi predvsem možnost, da temeljna tla predobremenimo z nasipom. Višino nasipa določimo iz predvidene obremenitve tal (80 kPa) in specifične teže zemljine. Temeljna tla morajo biti z nasipom predobremenjena toliko časa, da so pod želeno obtežbo prirastki posedkov minimalni. Ko to dosežemo, nasip odstranimo in tla so pripravljena za gradnjo dotičnega objekta.

Kot vidimo, višine nasipa pri tej rešitvi ni težko določiti. Problem nastane predvsem pri določanju velikosti celotnega posedka in prav posebej pri določanju časa, v katerem prirastki posedkov postanejo minimalni. Z enostavnim načinom določanja teh parametrov smo se spoznali že na dodiplomskem študiju gradbene fakultete. Pri tem smo po globini sloja predpostavili konstantne karakteristike stisljivosti zemljine kot so količnik por e , prostorninska teža zemljine γ , modul stisljivosti E_{oed} in prepustnost k ali koeficient konsolidacije c_v . Karakteristike posameznega sloja smo izbrali tako, da veljajo za povprečno napetostno stanje (na sredini sloja) in pričakovano dodatno obremenitev.

Zemljina se pod obremenitvijo stisne. Večja kot je obremenitev, bolj izrazito se zemljina stisne. Če to apliciramo na efektivne napetosti in zraven upoštevamo tudi, da se te z globino povečujejo, hitro pridemo do zaključka, da zgoraj naveden karakteristike stisljivosti po globini ne morejo biti konstantne. Ker se efektivne napetosti in s tem obremenitev vsakega naslednjega tankega sloja, z globino povečujejo, se posledično zemljina od vrha proti dnu vedno bolj stiska, zgošča. Tako se ji z globino povečuje specifična teža in tudi zmanjšuje

količnik por. Ker se zmanjšuje količnik por, se zmanjšuje velikost por in tako velikost pretoka vode skozi zemljino. Neposredno je z velikostjo pretoka povezana vodoprepustnost zemljine. Če se zmanjša pretok, se bo zmanjšala tudi vodoprepustnost.

Tako je diplomska naloga nastala z namenom računati posedke in čas, v katerem se posedek izvrši, z napetostno odvisnimi materialnimi parametri (krajše nelinearnimi parametri). Zaradi kompleksnosti računa, je obremenitev predstavljala brezkraina obtežba. Zanimala nas je predvsem primerjava trajanja konsolidacije, računane najprej s konstantnimi in nato še z nelinearnimi materialnimi parametri.

1.2 Metoda dela

Za doseganje opredeljenega namena diplomske naloge smo uporabili naslednje metode dela:

Prvi del našega dela je omejen na opredelitev pojmov in teoretičnih spoznanj. V delu smo se opirali na strokovno in znanstveno literaturo tujih in domačih avtorjev.

V drugem delu smo se osredotočili na določanje enačb, ki smo jih potrebovali pri računu zgoraj omenjenih količin z nelinearnimi parametri. Enačbe so bile vgrajene v programsko kodo v Matlabu, razvito v okviru diplomske naloge, s pomočjo katere smo izvedli vse potrebne izračune. Poimenovali smo jo AJDA.

Vzporedno smo račune izvajali še v programu CONDES0, katerega avtorja sta Daniel T.C. Yao in Dobroslav Znidarcic z Univerze v Koloradu. CONDES0 je numerični algoritem za analizo enodimenzionalne konsolidacije z izsuševanjem mehkih, fino zrnatih zemljin z uporabo implicitne končne diferenčne metode.

Na koncu smo rezultate primerjali z rezultati edometriških preiskav in z meritvami posedkov pod nasipom.

2 KONSOLIDACIJA

2.1 Uvod

Če obremenimo zemljino, se bodo v njej zaradi obremenitve pojavile deformacije. Celotne končne vertikalne deformacije, ki so se zaradi obremenitve pojavile, imenujemo z drugo besedo tudi posedek.

Pri dimenzioniranju nas predvsem zanima, kako velik bo ta posedek in koliko časa bo potreboval, da se bo izvršil. Celotni posedek, ki se bo pod določeno obtežbo izvršil, je sestavljen iz treh komponent

$$s_t = s_i + s_c + s_s, \quad (1)$$

kjer so:

s_i ... trenutni (distorzijski) posedek. To je posedek zaradi preoblikovanja tal brez spremembe prostornine.

s_c ... konsolidacijski posedek (časovno odvisen). Ta posedek je posledica spremembe prostornine tal.

s_s ... sekundarni posedek ali viskozni posedek (časovno odvisen). Opisuje deformiranje pri konstantnem efektivnem tlaku oz. pri pornem tlaku.

Ker obravnavamo edometriške pogoje (brezkrajna obtežba), nas bo zanimal predvsem konsolidacijski posedek.

2.2 Pojem konsolidacije

Obtežba nasičene zemljine se najpogosteje v trenutku obremenitve prenese na vodo v porah, saj je voda nestisljiva v primerjavi z zemljino. Pritisk, ki se pojavi v vodi zaradi dodane obtežbe, se imenuje dodatni porni tlak. Ko voda počasi odteka iz por zemljine, se obtežba

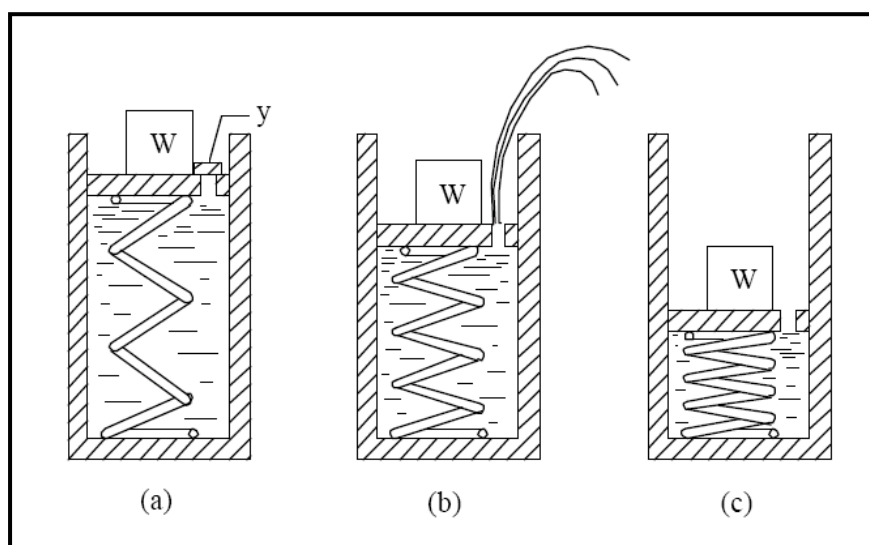
postopoma prenaša iz vode na zrnje. Zrna se prerazporedijo v bolj stabilno in gosto stanje. To povzroči zmanjšanje prostornine in posedanje površja zemljine. Sprememba prostornine tal je povezana s spremembo prostornine iztisnjene vode.

Zgoraj opisani proces se imenuje KONSOLIDACIJA.

Za lažje razumevanje lahko proces konsolidacije razložimo na primeru vzmeti, ki se nahaja v celici, napoljnjeni z vodo (slika 1).

Primer a prikazuje nasičeno zemljino, kjer vzmet predstavlja strukturo zemljine, voda v celici pa vodo v porah zemljine. Ko pri zaprtem ventilu (y), ki predstavlja velikost por, postavimo obtežbo W na naš model, skoraj celotno obtežbo prevzame voda, saj je nestisljiva v primerjavi z vzmetjo.

Ko ventil odpremo (primer b) in voda prosto odteka, bo sčasoma celotno obtežbo prevzela vzmet (primer c). Čas, v katerem se celotna obtežba iz vode prenese na vzmet, je odvisen od hitrosti odtekanja vode iz ventila.



Slika 1: Prikaz konsolidacije na vzmeteh (<http://www.ce.washington.edu/>)

Sprememba prostornine zemljine oz. konsolidacija je neposredno odvisna od vodoprepustnosti, saj je ta tista, ki kontrolira hitrost odtekanja vode iz por zemljine.

Vodoprepustnost večine peskov je zelo visoka, tako da se konsolidacija izvrši praktično takoj, ko zemljino obtežimo. Nasprotno je pri glinah, kjer je vodoprepustnost zelo majhna. Tu je predvsem prepustnost tista, ki določa čas konsolidacije.

2.3 Terzaghijeva enodimenzionalna konsolidacija

Terzaghi je obravnaval vertikalno konsolidacijo in izhajal iz obnašanja valjastega vzorca v edometru (primer brezkrajne obtežbe). Pri normalno konsolidiranih zemljinah in pri predpostavljenih konstantnih vrednostih edometriškega modula E_{oed} ter vodoprepustnosti k , se difuzijska enačba za linearno konsolidacijo glasi (Šuklje, 1984):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}, \quad (2)$$

kjer so:

u ... dodatni porni tlak

σ_{zz} ... totalne napetosti v tleh, ki so posledica obtežbe

$c_v = \frac{k \cdot E_{oed}}{\gamma_w}$... koeficient konsolidacije.

Vrednost dodatnega pornega tlaka Δu je v difuzijski enačbi zaradi preglednejšega zapisa pisana samo s črko u , brez znaka Δ .

Pri hipni obremenitvi je $\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = 0$ in enačba 2 se poenostavi v:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Enačba 3 je parcialna diferencialna enačba drugega reda. Rešimo jo ob upoštevanju robnih pogojev (na vrhu in na dnu obravnavanega sloja zemljine) in začetnih pogojev (kolikšni so porni tlaki ob ničnem času).

Pri reševanju difuzijske enačbe za vertikalno konsolidacijo zasičenih, normalno konsolidiranih zemljin in pri brezkraini obtežbi, je Terzaghi upošteval naslednje robne in začetne pogoje:

Robni pogoji

- prepusten rob ... $u = 0$ (vrednost dodatnega poregna tlaka je nič)
- neprepusten rob ... $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ (vrednost dodatnega poregna tlaka je največja)

Začetni pogoji (nična izohrona)

- $t = 0 \rightarrow u = u_0 = \Delta\sigma_{zz} = const.$

Rešitev enačbe 3 so presežni poreni tlaki kot funkcija mesta in časa $u = u(z, t)$ za določeno povečanje totalnih vertikalnih napetosti $\Delta\sigma_{zz}$ v horizontalnem sloju enakomerne debeline. Velikost obtežbe upoštevamo pri začetnih pogojih $u(t = 0) = u_0$. Rezultirajoče krivulje $u = \{u(z)\}_{t=const}$ imenujemo *izohrone*. Diagram presežnih porenih tlakov ob začetku konsolidacije $u(z, t = 0) = u_0(z)$ imenujemo nična izohrona.

Če želimo določiti le čas v katerem bo proces konsolidacije končan, je dovolj, če upoštevamo Terzaghijevo ugotovitev, da dodatni poreni tlaki upadejo na zanemarljivo vrednost, ko doseže časovni faktor konsolidacije T_v vrednost 2. Faktor T_v predstavlja brezdimenzijsko mero za čas in je odvisen od mehanskih lastnosti zemljine (k , E_{oed} , γ_w), časa ter drenažne debeline zemeljske plasti:

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{h^2} = \frac{k \cdot E_{oed} \cdot t}{\gamma_w \cdot h^2}. \quad (4)$$

3 VODOPREPUSTNOST

3.1 Darcy-jev zakon

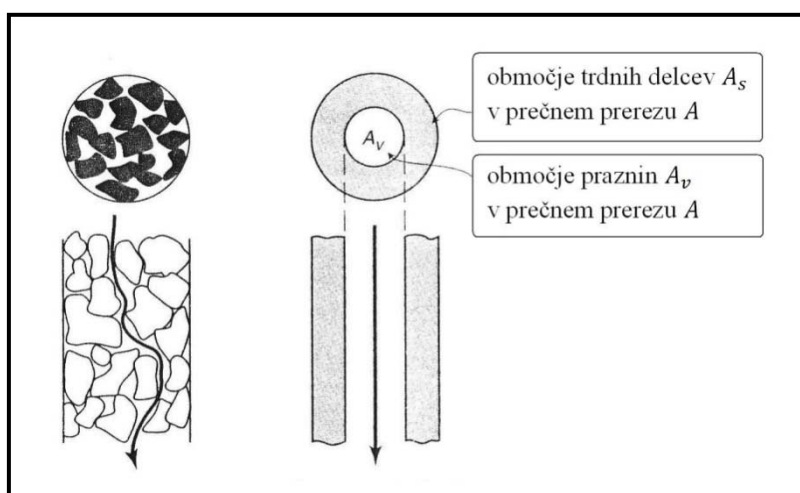
Tok vode skozi prostore med zrni zemljine je v večini primerov laminaren. To pomeni, da je hitrost v proporcionalna s hidravličnim gradientom i , ki je definiran kot izguba energije oz. hidrostatične višine h na enoto dolžine l :

$$i = \frac{h}{l} = \frac{\partial u}{\gamma_w \partial x}. \quad (5)$$

Darcyjev zakon je običajno zapisan v obliki:

$$v = \frac{q}{A} = k \cdot i = k \cdot \frac{h}{l}, \quad (6)$$

kjer je v navidezna hitrost pretoka skozi celoten prečni prerez, čeprav vemo, da voda teče le skozi pore zemljine. Koefficient k v enačbi 6 predstavlja prepustnost zemljine in ima enako enoto kot hitrost.



Slika 2: Prikaz realnega toka vode skozi zemljino na levi strani in poenostavljenega modela na desni (Reddi N. L., 2003)

3.2 Matematični modeli prepustnosti

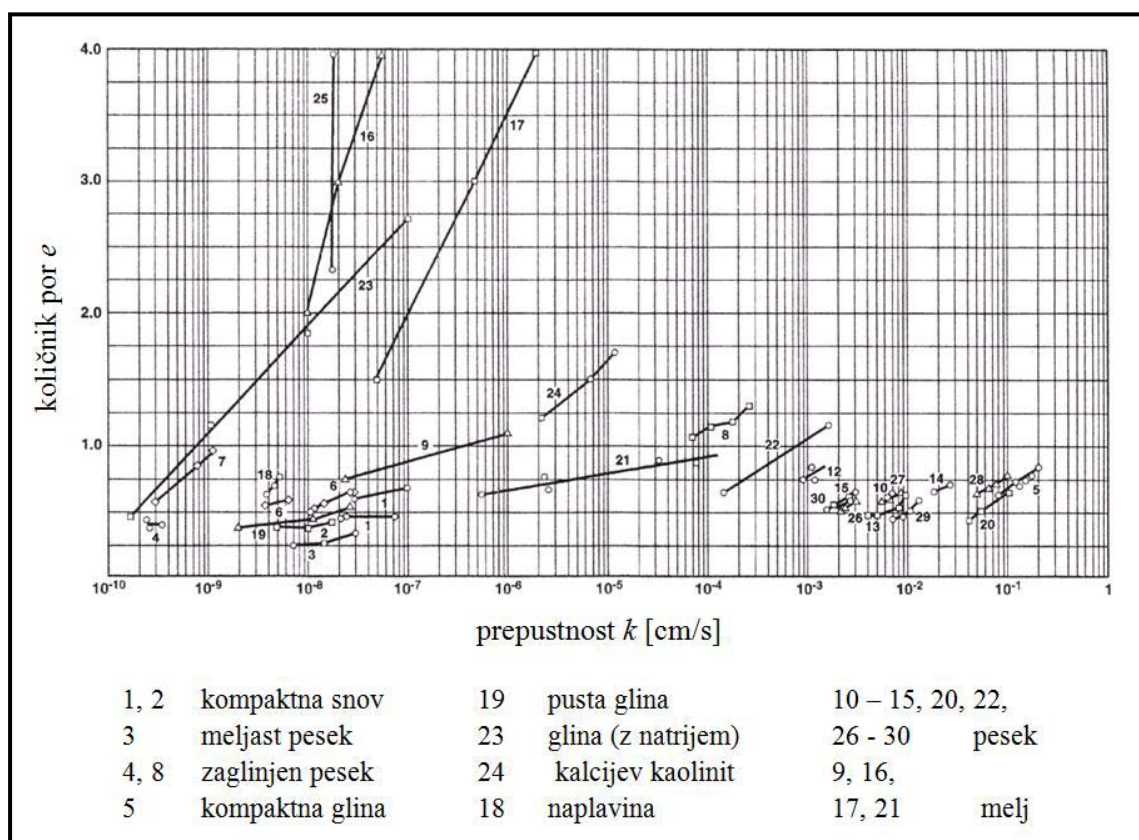
Zveza med prepustnostjo in nekaterimi parametri zemljine zanima raziskovalce že od samega začetka moderne geotehnike.

V modelih, ki simulirajo pronicanje tekočine skozi različne materiale, predstavlja prepustnost pomembno fizikalno lastnost. V geotehniki lahko te podatke uporabimo tudi za izračun časovnega poteka konsolidacije.

Zemljina se med konsolidacijo zgošča, zmanjšuje se velikosti por in posledično tudi prepustnost zemljine. To pri računu posedkov vključimo z uporabo enostavnih matematičnih modelov.

Ker pronicanje vode poteka v porah zemljine, je najbolj smiselno, da za modeliranje prepustnosti pri konsolidaciji, kot spremenljivo količino uporabimo količnik por.

Slika 3 prikazuje široko območje vrednosti k kot funkcijo količnika por za različne materiale.



Slika 3: Prepustnost k v odvisnosti od količnika por za različne materiale (Reddi N. L., 2003)

3.2.1 Model v programu AJDA

Empiričnih enačb za opisovanje prepustnosti k v odvisnosti od količnika por e je veliko. Mi smo se odločili za model, kjer je $\log k$ premosorazmeren s količnikom por e , oz. $k \propto \exp(e)$. Tako se enačba funkcije $k(e)$ glasi:

$$k = k_0 \exp(k_3 e), \quad (7)$$

kjer sta k_0 in k_3 materialna parametra zemljine in ju določimo na podlagi narejenih preizkusov.

3.2.2 Model v programu CONDES0

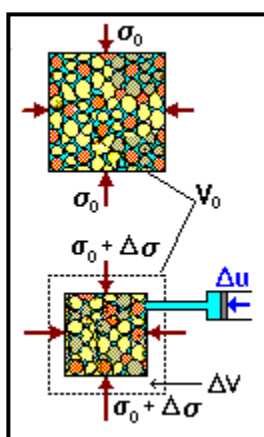
Program CONDES0 uporablja model prepustnosti, ki ga je leta 1979 predlagal Somogyi in zahteva podajanje funkcije $k = k(e)$ v obliki:

$$k = C e^D, \quad (8)$$

kjer sta C in D materialna parametra.

4 STISLJIVOST ZEMLJINE $e(\sigma)$




Zvezo med spremembo prostornine in efektivnimi napetostmi imenujemo krivulja stisljivosti, ki jo lahko razdelimo v obremenilni (kompresijski) in razbremenilni del. Prostornina zrnja ostane enaka, medtem ko se sprememba celotne prostornine zgodi na račun spremembe prostornine por, kar je pri 100% zasičenih zemljinah enako spremembi prostornine vode.



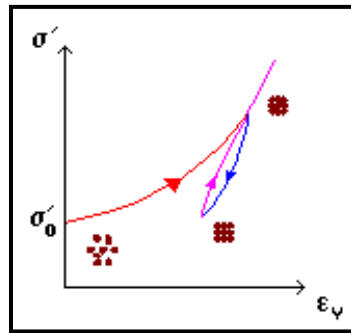
Slika 4: Sprememba prostornine vzorca pri obremenitvi (<http://environment.uwe.ac.uk>)

4.1 Mehanizmi stiskanja zrn zemljine

Zrna zemljine se lahko stisnejo na različne načine:

- prerazporeditev zrn 
- zlom in prerazporeditev zrn 
- distorzija ali prepogibanje zrn 

Sprememba prostornine bo pri prvi obremenitvi mnogo večja kot pri ponovitvah razbremenjevanja in obremenjevanja zemljine. Do tega pojava pride predvsem zato, ker se pri razbremenjevanju tako zlomljena kot tudi cela zrna ne vrnejo v prvotno stanje. Pri stiskanju je obnašanje zemljine nelinearno in večinoma neelastično.



Slika 5: Obnašanje zemljine pri stiskanju in razbremenjevanju (<http://environment.uwe.ac.uk>)

4.2 Napetostno stanje pri obremenjevanju in razbremenjevanju zemljine

Napetostno stanje zemljin je zelo kompleksno, zato pri računanju upoštevamo dve osnovni poenostavitvi.

Izotropno stanje:

Napetosti so v vseh smereh enake $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$. Sledi enačba povprečne napetosti:

$$p' = \frac{(\sigma'_a + 2\sigma'_r)}{3} = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z, \quad (9)$$

kjer sta:

$\sigma'_a \equiv \sigma_z$... osna napetost in

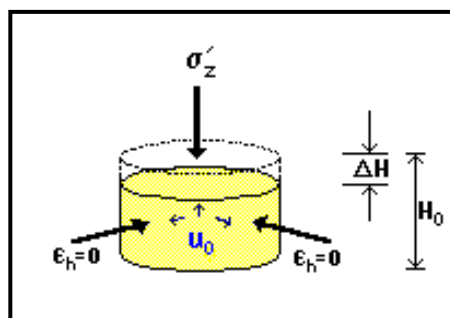
$\sigma'_r \equiv \sigma_x = \sigma_y$... radialna napetost.

Enodimenzionalno deformacijsko stanje (edometrski pogoji):

Vertikalne napetosti označimo s σ'_z . Bočne deformacije ε_h so preprečene in torej enake 0.

Posledično je prostorninska deformacija enaka linearni deformaciji:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta \varepsilon}{(1+e_0)}. \quad (10)$$



Slika 6: Prikaz napetosti in deformacij pri enodimenzionalnem deformacijskem stanju

(<http://environment.uwe.ac.uk>)

4.3 Cam clay model

Po Coulumb-u (leta 1776) in Rankine-u (leta 1857) je sledila dolga zgodovina poskusov aplikacije teorije plastičnosti v geomehaniko. Čeprav so značilnosti obnašanja zemljine skladne z elasto-plastičnim modelom, je razvoj realnih konstitutivnih modelov za zemljino močno zaostajal za razvojem ustreznih modelov pri metalnih materialih.

Prve realistične konstitutivne modele predstavlja serija Cam clay formulacij, ki so jih razvijali Roscoe in njegovi sodelavci na univerzi v Cambridge-u. Od tu tudi izraz Cam. Originalni model Cam clay sta leta 1963 predstavila Roscoe in Schofield. Kasneje sta Roscoe in Burland (1968) predstavila modificirani Cam clay model, ki je elasto-plastičen model za nelinearno analizo napetosti in deformacij koherentnih zemljin. Ker se originalni Cam clay model ne uporablja več, s tem imenom v resnici mislimo na modificirano različico.

4.3.1 Izotropno obremenjevanje in razbremenjevanje

Enačbo 10 lahko zapišemo še drugače:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta v}{v_0}, \quad (11)$$

kjer je:

$v = \frac{V}{V_s} = \frac{V_s + V_v}{V_s} = 1 + e$... ker se ta izraz v slovenski literaturi ne pojavlja, ga vzamemo iz angleške literature in ga poimenujemo specifična prostornina.

V ... prostornina zemljine

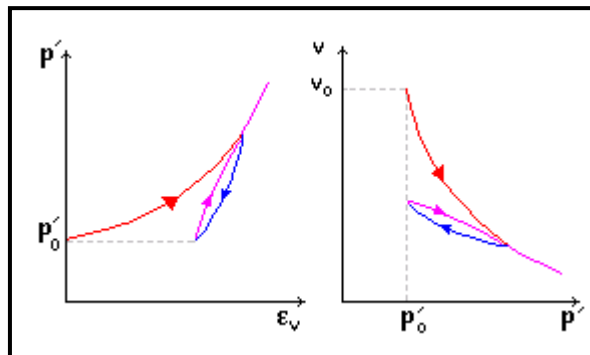
V_s ... prostornina suhe zemljine (zrn)

V_v ... prostornina praznin.

Medtem ko se glavne napetosti povečujejo in zmanjšujejo, se pojavijo spremembe tudi pri prostorninskih deformacijah in specifični prostornini.

p'_0 ... začetne povprečne napetosti

v_0 ... začetna specifična prostornina



Slika 7: Krivulja stisljivosti $p'(\epsilon_v)$ in $v(p')$ (<http://environment.uwe.ac.uk>)

4.3.1.1 Enačbe

Zveza med specifično prostornino v in glavno napetostjo p' se za izotropno obremenjevanje in razbremenjevanje glasi:

Prva obremenitev

obremenilna krivulja - OAD na sliki 8

$$v = N - \lambda \cdot \ln(p') \quad (12)$$

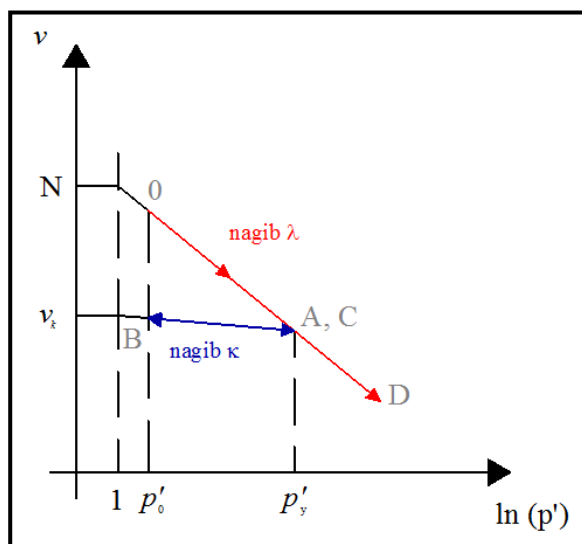
Razbremenjevanje in ponovno obremenjevanje

razbremenilna krivulja - BC na sliki 8

$$v = v_k - \kappa \cdot \ln(p') \quad (13)$$

N , λ , in κ ... materialni parametri

v_k in p'_y ... določata krivuljo stisljivosti in sta odvisna še od predhodno doseženega napetostnega stanja



Slika 8: Krivulja specifične prostornine v odvisnosti od logaritma glavne napetosti

Če poznamo trenutno napetost in zgodovino obremenjevanja/razbremenjevanja, lahko izračunamo specifično prostornino.

4.3.2 Prekonsolidacijski tlak

Prekonsolidacijski tlak σ'_p je največja napetost, pri kateri je bila zemljina že skonsolidirana. V ta namen definiramo prekonsolidacijsko razmerje OCR :

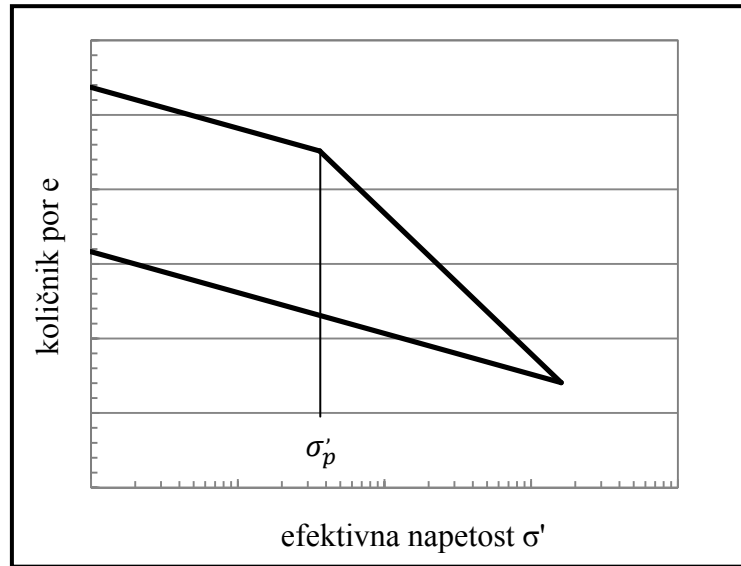
$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}, \quad (14)$$

kjer σ'_{v0} predstavlja trenutno efektivno napetost.

$OCR = 1$... zemljina je normalno konsolidirana

$OCR > 1$... zemljina je prekonsolidirana

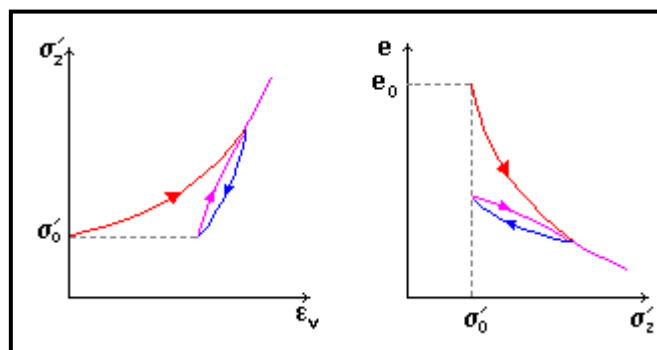
$OCR < 1$... zemljina še ni skonsolidirana pri trenutni obremenitvi



Slika 9: Prikaz prekonsolidacijskega tlaka

4.3.3 Enodimenzionalno obremenjevanje in razbremenjevanje

Primer enodimenzionalne obtežbe imamo v edometru. V naravi se pojavlja v obliki obsežnega temeljenja, nasipov in izkopov.



Slika 10: Krivulja stisljivosti $\sigma'_z(\epsilon_v)$ in $e(\sigma'_z)$ (<http://environment.uwe.ac.uk>)

Vidimo, da lahko pri enodimenzionalnem obremenjevanju in razbremenjevanju pri risanju krivulje stisljivosti namesto p' in v uporabljamo σ'_z in e :

σ'_z ... vertikalne efektivne napetosti

e ... količnik por.

Vertikalne deformacije so tu enake prostorninskim deformacijam $\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta \varepsilon}{(1+e_0)}$,

kjer so H_0 , e_0 in σ'_0 začetne vrednosti in H višina/debelina sloja.

Ko se vertikalna napetost σ'_z povečuje/zmanjšuje, se vrhnja točka vzorca spušča/dviga, oz. se sloj krči/širi.

4.3.4 *Enačbe*

Pri enodimenzionalnem stiskanju in nabrekanju je zveza med količnikom por e in logaritmom vertikalnih napetosti σ'_z enostavna.

Prva obremenitev

obremenilna krivulja - OAD na sliki 11

$$e = e_N - \lambda \cdot \ln(\sigma'_z) \quad (15)$$

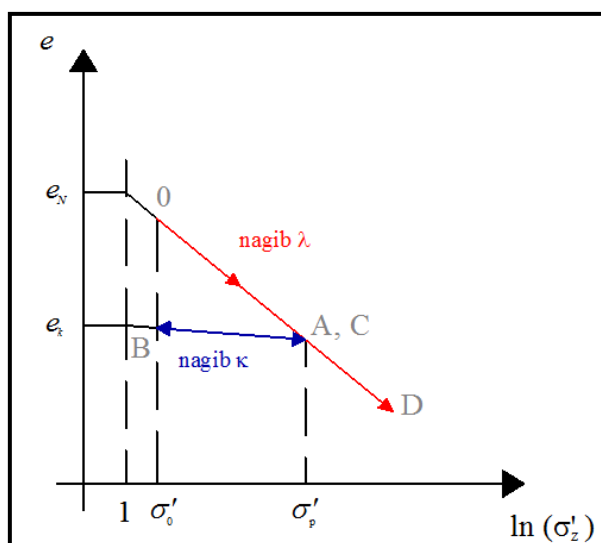
Razbremenjevanje in ponovno obremenjevanje

razbremenilna krivulja - BC na sliki 11

$$e = e_k - \kappa \cdot \ln(\sigma'_z) \quad (16)$$

e_N , λ , in κ ... materialni parametri

v_k in σ'_p ... določata krivuljo stisljivosti



Slika 11: Krivulja količnika por v odvisnosti od logaritma napetosti

Če sta znana trenutna napetost in zgodovina obremenjevanje in razbremenjevanja, lahko izračunamo količnik por.

4.4 Hiperbolični model

Lui in Znidarcic (1991) sta predlagala zvezo med parametri stisljivosti v obliki:

$$e = A(\sigma'_i + Z)^B, \quad (17)$$

kjer sta A in B materialna parametra.

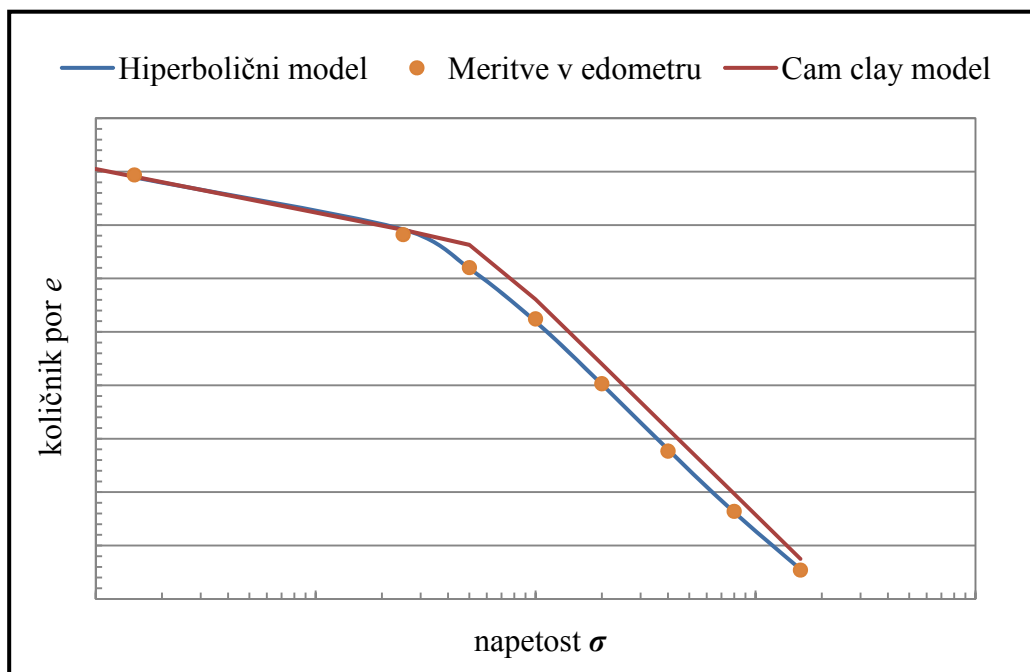
Izkazalo se je, da zveza, zapisana pod enačbo 17, dobro opiše konsolidacijske karakteristike in dobro modelira obnašanje mehkih zemljin. Poleg tega jo lahko apliciramo tudi na prekonsolidirane materiale.

4.5 Primerjava hiperboličnega in Cam clay modela

V nadaljevanju (v poglavju 6) bomo določanje parametrov obeh modelov opisali bolj natančno. Tu bo v namen primerjave modelov opis bolj skop.

Parametre hiperboličnega modela (enačba 17) iščemo tako, da se z njihovim spreminjanjem krivulja čim bolj prilega dobljenim rezultatom. Pri Cam clay modelu so parametri e_N , κ in λ dobro določeni na podlagi preiskave, težje je določiti parametra σ'_p in e_k . Posledično se krivulja stisljivosti (rdeča črta na sliki 12) ne prilega povsem dobljenim rezultatom.

Druga značilnost Cam clay modela je lom krivulje, ki ga določa prekonsolidacijski tlak. Tega v naravi ne bomo našli, saj tu vse stvari potekajo gladko. Poleg tega matematični modeli težko sledijo lomom krivulj in posledično otežujejo naše delo. Tako lahko predpostavimo, da bo hiperbolični model bolj natančno opisal obnašanje zemljine.



Slika 12: Primerjava hiperboličnega in Cam clay modela

5 PREIZKUSI IN REZULTATI

Meseca avgusta 2007 smo tudi sami naredili preiskavi v edometru in triosni celici. Uporabili smo vzorec iz Luke Koper, star približno eno leto. Pred začetkom preiskav smo ga pregnetli in uporabili tudi za ugotavljanje prostorninske teže zrn.

5.1 Edometer

5.1.1 Opis

V laboratoriju z edometrsko preiskavo preiskujemo obnašanje zemljine pri enodimenzionalnem obremenjevanju in razbremenjevanju. Opremo, ki jo pri tej preiskavi potrebujemo, sestavljajo:

- edometrsko celico (tog kovinski obroč, dve porozni ploščici)



Slika 13: Sestavni deli edometrsko celice

- okvir za obremenjevanje z merilcem vertikalnih premikov
- in naprava za merjenje časa.

Postopek:

Vzorec vstavimo v tog kovinski obroč, katerega premer je približno 75 mm in višina pet krat manjša. Med preiskavo vzorec obremenjujemo s prirastki vertikalne obtežbe, ki jo nanašamo v rednih časovnih intervalih. Vsaka obtežna stopnja je za faktor dva večja od predhodne (25, 50, 100, 200, 400 kPa, ...). Vzorec obremenjujemo do vrednosti, ki jo določajo predvidene napetosti v temeljnih tleh pred in po obremenitvi (razbremenitvi) z obtežbo, oz. do vrednosti, ki omogoča zanesljivo določitev parametrov λ in σ'_p . Med vsako bremensko stopnjo merimo vertikalne premike v odvisnosti od časa.

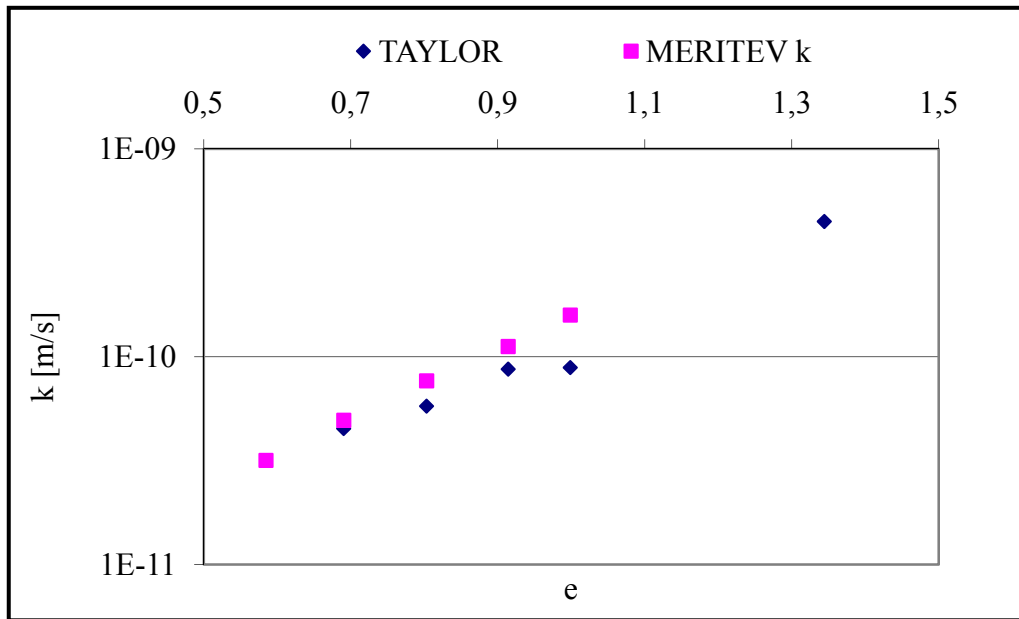
Ko je konsolidacija končana pri zadnji bremenski stopnji (največji obtežbi), začnemo z zmanjševanjem vertikalne obtežbe. To naredimo v enem ali več korakih, običajno v enakih stopnjah, kot smo obtežbo nanašali. Med vsako bremensko stopnjo zopet merimo vertikalne premike v odvisnosti od časa.

Iz sprememb višine (posedka) vzorca v odvisnosti od časa lahko za posamezno bremensko stopnjo spremljamo hitrost konsolidacije in iz rezultatov določimo tudi količnik konsolidacije c_v .

5.1.2 Rezultati

Preglednica 1: Prepustnosti k , določene po Taylorju in merjene neposredno

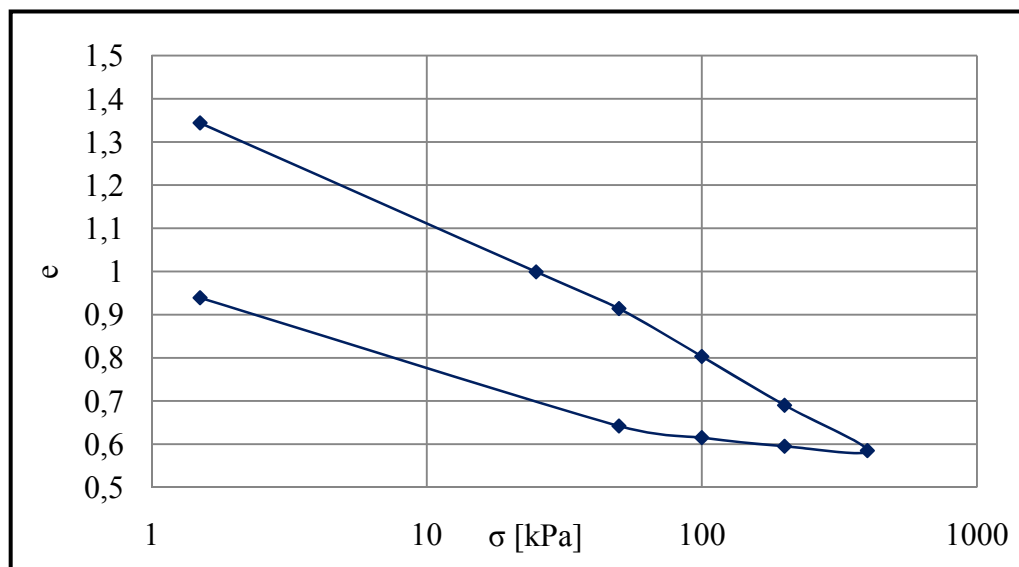
	σ [kPa]	25	50	100	200	400
TAYLOR edometer	e	1,344	0,999	0,914	0,803	0,690
	k [m/s]	4,47E-10	8,86E-11	8,71E-11	5,78E-11	4,51E-11
MERITEV k edometer	e	0,999	0,914	0,803	0,690	0,585
	k [m/s]	1,58E-10	1,12E-10	7,64E-11	4,94E-11	3,17E-11



Grafikon 1: Prepustnosti k določene po Taylorju in merjene neposredno

Preglednica 2: Količniki por v odvisnosti od napetosti

σ [kPa]	1,5	25	50	100	200	400	200	100	50	1,5
e_z	1,345	1,344	0,999	0,914	0,803	0,690	0,585	0,595	0,615	0,642
e_k	1,344	0,999	0,914	0,803	0,690	0,585	0,595	0,615	0,642	0,939



Grafikon 2: Količniki por v odvisnosti od napetosti

5.2 Ugotavljanje prostorninske teže zrn – metoda s piknometrom

5.2.1 Opis

Piknometar je steklenička različnih velikosti, ki ima tesno prilegajoči se zamašek. V zamašku je drobna luknjica, ki omogoča točnost določanja prostornine.



Slika 14: Piknometar (<http://en.wikipedia.org>)

Prostorninsko težo zrn dobimo na naslednji način:

$$\gamma_s = \frac{\text{masa zrn}}{\text{masa vode enake prostornine}} = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)}, \quad (18)$$

kjer so:

m_1 ... masa praznega piknometra,

m_2 ... masa piknometra s suhim vzorcem,

m_3 ... masa piknometra s suhim vzorcem in vodo,

m_4 ... masa piknometra z vodo.

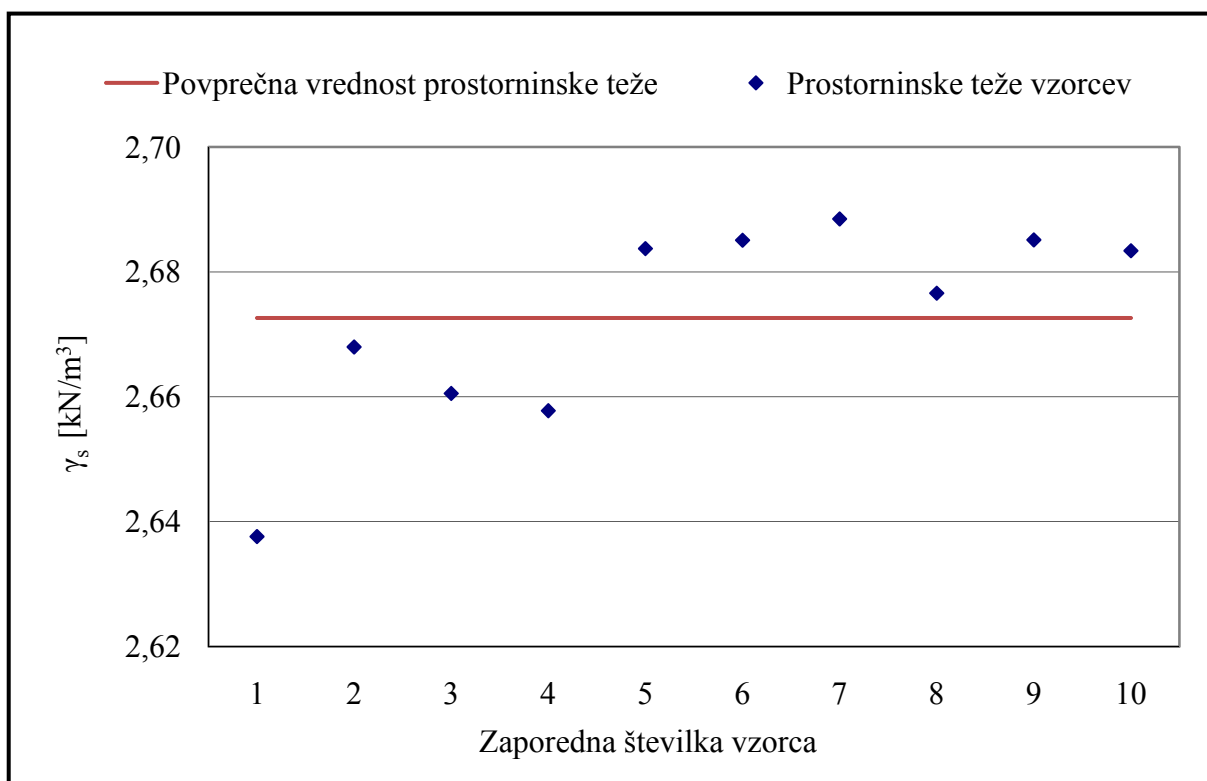
5.2.2 Rezultati

Prostorninsko težo zrn smo po enačbi 18 ugotavljali na 12 vzorcih. Od tega smo 2 zaradi prevelikega odstopanja izločili in dobili:

Preglednica 3: Prostorninske teže zrn posameznih vzorcev

zaporedna številka vzorca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
prostorninska teža [kN/m ³]	26,38	26,68	26,61	26,58	26,84	26,85	26,88	26,77	26,85	26,83

Povprečna vrednost prostorninske teže je tako $\gamma_s = 26,73 \text{ kN/m}^3$.

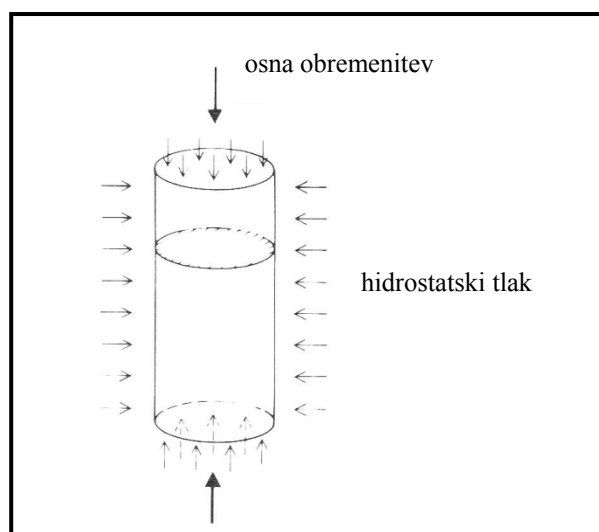


Grafikon 3: Prostorninske teže zrn posameznih vzorcev

5.3 Triosna strižna preiskava

5.3.1 Opis

Triosne strižne preiskave izvajamo v triosnih aparatih, kjer imamo pogoje osno simetričnega napetostnega in deformacijskega stanja.



Slika 15: Princip triosne preiskave (Head K. H., 1994)

Preiskujemo vzorce cilindrične oblike, ki jih vgradimo med prepustne ploščice in zaščitimo z gumijasto membrano.

Celico nato napolnimo z vodo, ki omogoča obremenitev vzorca s hidrostatskim napetostnim stanjem ($\sigma_{celični} = \sigma_2 = \sigma_3$). Dodatno obremenitev vzorca predstavlja vertikalna osna sila P , ki jo povzročimo s kontroliranim premikom okvirja za nanos obtežbe. Vertikalno totalno napetost na vzorec definira enačba $\sigma_1 = \sigma_3 + P/A^*$, (A^* je deformiran prerez vzorca), bočna ali radialna napetost σ_3 pa je enaka tlaku vode v celici.

Porušitev nastopi, ko zemljina ni več sposobna prevzeti dodatne vertikalne obremenitve – z večanjem osne deformacije ostaja vertikalna sila konstantna ali pada na rezidualno vrednost. Napetosti in deformacije v osnih smereh so enake:

$$\sigma'_x = \sigma'_y = \sigma'_r \text{ in } \varepsilon'_x = \varepsilon'_y = \varepsilon'_r.$$

Obstajajo tri vrste triosnih testov. Naša je bila konsolidirana-drenirana preiskava ali počasni test:

pri tem testu so, po začetnem zasičenju vzorca, ki omogoča merjenje pornih tlakov, drenaže ves čas odprte. Najprej se izvrši konsolidacija pri konstantni vrednosti celičnega tlaka $\sigma_1 =$

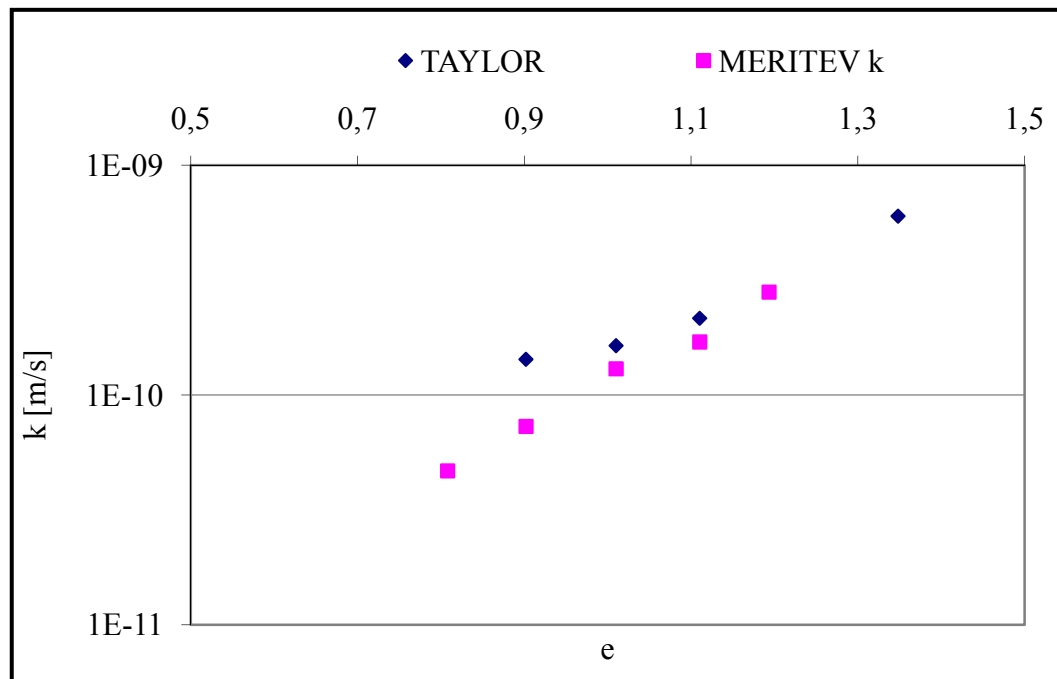
σ_3 . Ker so med konsolidacijo drenaže na vzorcu odprte, merimo spremembo volumna (količino vode iz vzorca) v odvisnosti od časa. Na podlagi teh meritev smo dobili prepustnost določeno po Taylorju.

Po končani konsolidaciji pri odprtih drenažah merimo prepustnost neposredno.

5.3.2 Rezultati

Preglednica 4: Prepustnosti, merjene neposredno in določene po Taylorju

	σ [kPa]	25	50	100	200	400
MERITEV	e	1,193	1,110	1,010	0,902	0,808
	k [m/s]	2,80E-10	1,70E-10	1,30E-10	7,30E-11	4,7E-11
TAYLOR	e	1,348	1,193	1,110	1,010	0,902
	k [m/s]	6,00E-10	4,69E-09	2,16E-10	1,64E-10	1,43E-10



Grafikon 4: Prepustnosti, merjene neposredno in določene po Taylorju

6 DOLOČANJE MATERIALNIH PARAMETROV

Funkciji $k = k(e)$ in $\sigma = \sigma(e)$ smo iskali na podlagi edometriških testov in testov v triosni celici za 13 vrtin (VC-1, VC-3, VC-4, ..., VC-14), ki se nahajajo na območju veza 7 na pomolu I v Luki Koper.

Za območje obvoznice Škofljica smo ti dve funkciji določili na podlagi vrtine OŠO-8 s pomočjo edometriških preiskav.

Pri nasipu na Ljubljanskem barju smo iskane parametre vzeli iz (Logar, 1998).

6.1 Funkcija $k(e)$

6.1.1 AJDA

6.1.1.1 Luka Koper

Razvrščanje merjenih vodoprepustnosti

Prepustnosti so se ugotavljale na 5 načinov. Neposredno so se merile v edometru in triosni celici (CD – konsolidirana drenirana preiskava), po Taylorju pa so se prepustnosti določale v triosni celici (CD in CU – konsolidirana nedrenirana preiskava) in v edometru.

1. Vodoprepustnost se je v triosni celici (neposredno in po Taylorju) merila na naslednjih vrtinah:

- VC-10 na globini 9.2-9.5 m
- VC-12 na globini 7.2-7.5 m
- VC-13 na globini 4.3-4.6 m
- VC-14 na globini 25.8-26 m.

Pripadajoči količniki por so se ugotavljali na naslednji način:

$$e_z = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dz}} - 1 \quad (19)$$

$$\text{in } e_k = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dk}} - 1, \quad (20)$$

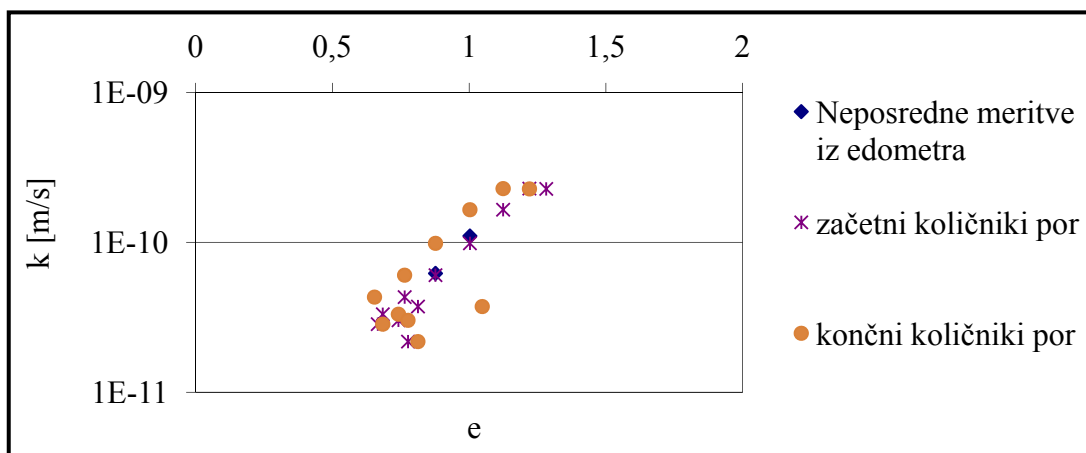
kjer so:

γ_s ... prostorninska teža zrnja, ki je bila določena na podlagi 12 piknometrov

γ_{dz} ... začetna suha prostorninska teža (merimo)

γ_{dk} ... končna suha prostorninska teža, ki jo dobimo iz $\gamma_{dk} = \frac{\gamma_{dz} \cdot V_z}{V_k}$

- neposredno merjeni vodoprepustnosti pripada e_k ,
- na podlagi izkušenj in grafikona 5 predpostavimo, da vodoprepustnosti, določeni po Taylorju, ustreza e_z .



Grafikon 5: Vodoprepustnost, določena po Taylorju, v odvisnosti od e_z in e_k ter neposredno merjena vodoprepustnost v odvisnosti od e_k

2. Neposredno se je vodoprepustnost v edometru merila na vrtnah:

- VC-4 na globini 15,7-16,0 m pri $\sigma'_v = 200$ kPa
- VC-5 na globini 4,7- 5,0 m $\sigma'_v = 200$ kPa in $\sigma'_v = 400$ kPa
- VC-5 na globini 14,7-15,0 m $\sigma'_v = 200$ kPa in $\sigma'_v = 400$ kPa.

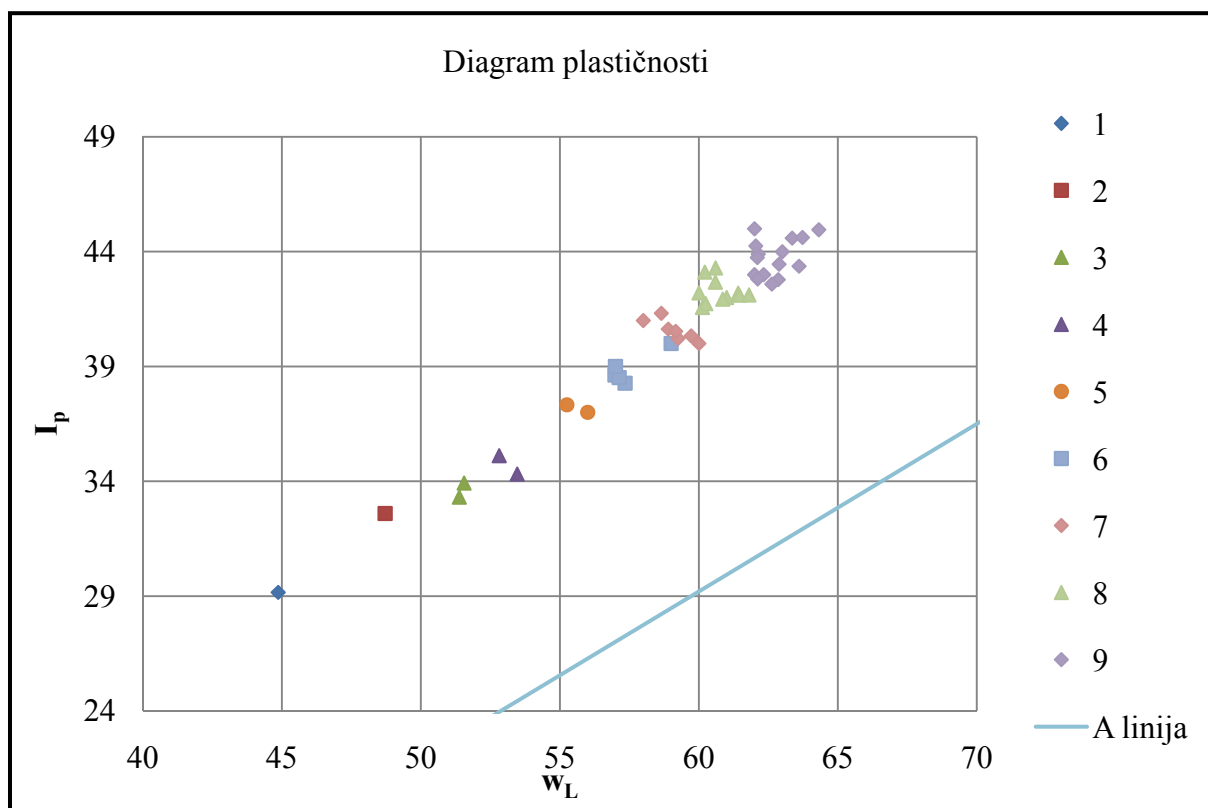
Vodoprepustnost po Taylorju se je merila v vseh vrtnah na različnih globinah, za vsako bremensko stopnjo posebej. Istočasno sta se za vsako bremensko stopnjo posebej merila tudi e_z in e_k .

e_z pripada vodoprepustnosti merjeni po Taylorju in e_k pripada neposredno merjeni vodoprepustnosti pri določeni bremenski stopnji.

3. Vodoprepustnost se je v triosni CU celici ugotavljala le po Taylorju. Pripadajoči količnik por se je določal po enačbi 19.

Razvrščanje vzorcev v skupine materialov

Začetna razvrstitev materialov je temeljila na diagramu plastičnosti za klasifikacijo koherentnih (drobnozrnatih) zemljin: meje židkosti w_L in indeksa plastičnosti I_p . Isto skupino so tvorili materiali s podobnima w_L in I_p :



Grafikon 6: Razvrstitev materialov na osnovi klasifikacije koherentnih zemljin

Nastalo je 9 skupin. Peta skupina je izpadla, ker za vrtini VC-8 na globini 9,5-9,8 m ter VC-6 na globini 20,0-20,3 m niso bile izvedene meritve vodoprepustnosti.

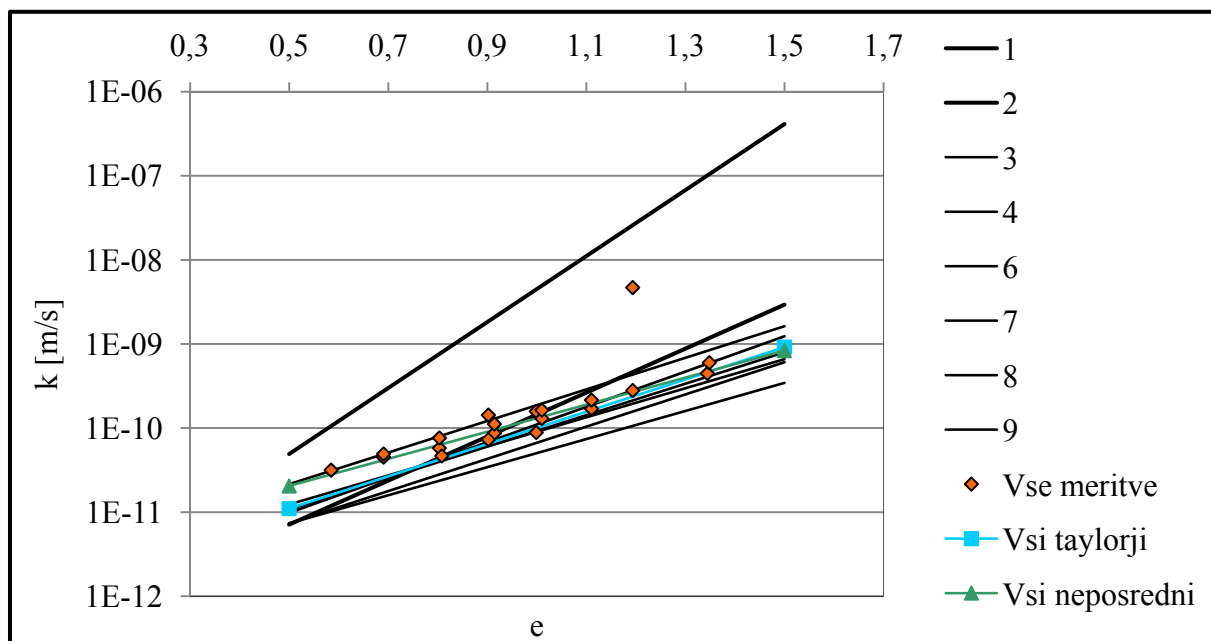
Funkcija $k = k(e)$ je bila določena na osnovi enačbe 7. Iskali smo materialna parametra k_0 in k_3 :

- za vsako skupino posebej
- za vse prepustnosti, dobljene po Taylorju, skupaj
- in za vse prepustnosti, merjene neposredno, skupaj.

Preglednica 5: Zbrane funkcije $k(e)$

	funkcije $k(e)$
1	$k = 5,4 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(9,03 \cdot e)$
2	$k = 3,5 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(6,02 \cdot e)$
3	$k = 1,1 \cdot 10^{12} \cdot \exp(3,85 \cdot e)$
4	$k = 1,7 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(3,98 \cdot e)$
6	$k = 2,5 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(4,33 \cdot e)$
7	$k = 8,1 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(4,41 \cdot e)$
8	$k = 8,8 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(4,83 \cdot e)$
9	$k = 1,3 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(4,30 \cdot e)$
vsi Taylorji	$k = 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(4,42 \cdot e)$
vsi neposredni	$k = 2,3 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(4,00 \cdot e)$

Funkcije so bile nato, skupaj z našimi meritvami narejenimi avgusta 2007, zrisane na graf:



Grafikon 7: Zrisane funkcije $k(e)$ za vrtine iz Luke Koper

Ugotovitve:

- skupini 1 in 2 zaradi odstopanja od ostalih premic izločimo
- iz grafa je razvidno, da se naše meritve najbolj ujemajo s funkcijo, ki je bila dobljena na podlagi vseh neposrednih meritev. Zato se odločimo, da za funkcijo $k = k(e)$ za vse vrtine izberemo slednjo:

$$k = 2,3 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(4,0 \cdot e). \quad (21)$$

6.1.1.2 Obvoznica Škofljica

Tu nabor podatkov ni bil tako velik kot pri Luki Koper, zato je bilo določanje parametrov funkcije $k(e)$ enostavnejše. Za vsako vrtino smo iskane količine določili s pomočjo trendnih črt v Excelu:

$$\text{CL glina (OŠO-8): } k = 6 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(6,7 \cdot e) \quad (22)$$

$$\text{MH melj (OŠO-8): } k = 4 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(3,8 \cdot e). \quad (23)$$

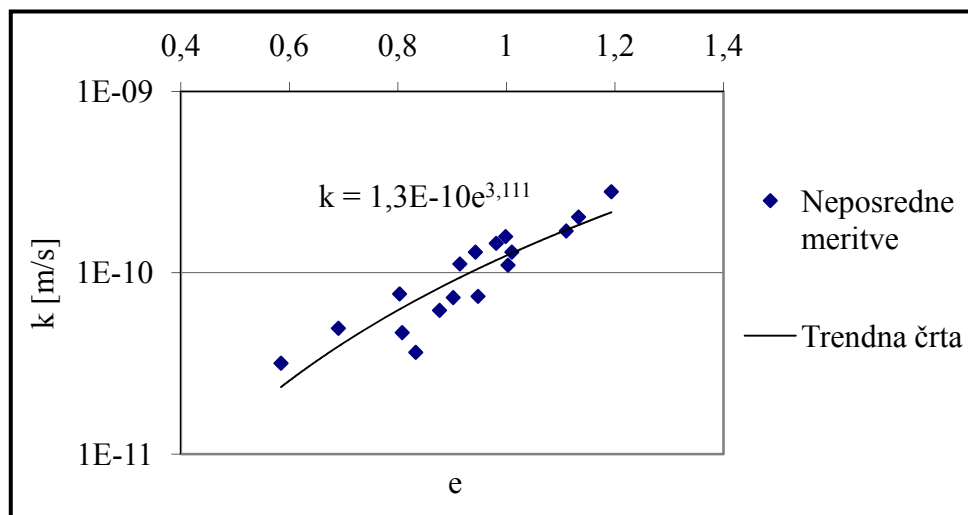
6.1.2 CONDES0

6.1.2.1 Luka Koper

Za določanje materialnih parametrov C in D vzamemo isti nabor podatkov, kot smo ga pri določanju te funkcije v poglavju 6.1.1.1. Nabor teh podatkov so vse neposredne meritve, ki jih ponovno zrišemo na graf in mu dodamo trendno črto. Enačba te črte je naša iskana funkcija:

$$k = 1,3 \cdot 10^{-10} \cdot e^{3,111}, \quad (24)$$

kjer je e količnik por.



Grafikon 8: Določanje funkcije $k(e)$ s pomočjo trendne črte v Excelu

6.1.2.2 Obvoznica Škofljica

Tu parametre funkcije določamo po istem postopku kot pod točko 6.1.1.2.:

$$\text{CL glina (OŠO-8): } k = 4 \cdot 10^{-9} \cdot e^{3,4} \quad (25)$$

$$\text{MH melj (OŠO-8): } k = 1 \cdot 10^{-10} \cdot e^{5,9}. \quad (26)$$

6.2 Funkcija $e=e(\sigma')$

6.2.1 AJDA

Pri modeliranju prepustnosti v programu AJDA uporabimo Cam clay model. Tako je bila naša naloga poiskati parametre enačbe 15 obremenilne krivulje $e = e_N - \lambda \cdot \ln(\sigma'_z)$ in parametre enačbe 16 razbremenilne krivulje $e = e_k - \kappa \cdot \ln(\sigma'_z)$.

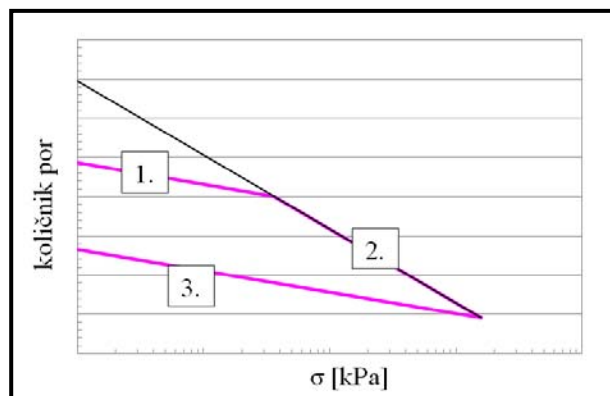
Krivulja stisljivosti, ki jo dobimo iz edometrikske preiskave, je razdeljena na tri dele, kar je razvidno iz slike 16. Enačbe razbremenilne in obremenilne krivulje v tem primeru zapišemo v obliki:

$$1. \text{ del: } e = e_0 - \kappa \cdot \ln \sigma' \quad (27)$$

$$2. \text{ del: } e = e_0^* - \lambda \cdot \ln \sigma' \quad (28)$$

$$3. \text{ del: } e = e_k - \kappa \cdot \ln \sigma'. \quad (29)$$

Količnik por e_0 pomeni začetni količnik por izmerjene krivulje stisljivosti (1. del). Količnik por e_N se zgoraj pojavi v obliki e_0^* , ki pomeni začetni količnik por deviške krivulje stisljivosti (na sliki 16 črna črta). Tretji del krivulje za nas ne pride v poštev, ker bomo simulirali le obremenjevanje, ne pa tudi razbremenjevanja.



Slika 16: Krivulja stisljivosti

Parameter, ki je narekoval po katerem delu krivulje se bo računal količnik por e , je bil prekonsolidacijski tlak σ_p .

Zgoraj navedeni parametri σ_p , e_0 , e_0^* , κ in λ so pri simulaciji edometra predstavljali izmerjene vrednosti iz edometriške preiskave.

Pri konkretnih primerih (glina iz Luke Koper in nasip na Ljubljanskem barju) so bile to povprečne vrednosti iz med seboj primerljivih preiskav.

6.2.2 CONDES0

Funkcijo $e = e(\sigma'_i)$ v programu CONDES0 podajamo v obliki enačbe 17. Pri iskanju parametrov A in B si pomagamo s pomočjo reševalca v Excelu. Tako lahko za vsako vrtno posebej poiščemo ustrezno enačbo.

Primer:

σ [kPa] in e_k dobimo iz edometriške preiskave. e izračunamo po enačbi 17. A , B in Z so tu spremenljivke, ki jih spreminjamo toliko časa, da je vsota $\Sigma(e_k - e)^2$ minimalna.

Preglednica 6: Prikaz iskanja parametrov A , B in Z s pomočjo reševalca v Excelu

		A	B	Z		
$\Sigma(e_k - e)^2$	2,0E-05	3,36	-0,22	55,06		
σ [kPa]	1,5	25	50	100	200	400
e_k	1,360	1,257	1,180	1,087	0,971	0,851
e	1,359	1,258	1,183	1,080	0,970	0,850
$(e_k - e)^2$	4,8E-07	2,4E-08	9,4E-06	6,9E-06	1,3E-06	1,5E-06

Funkcija $e(\sigma'_i)$ se v tem primeru glasi:

$$e = 3,36(\sigma'_i + 55,06)^{-0,22}. \quad (30)$$

7 RAČUN FIZIKALNIH KOLIČIN V PROCESU KONSOLIDACIJE

7.1 Konstantni materialni parametri

Totalne napetosti se zaradi obremenitve med konsolidacijo tal ne spreminjajo. Spreminjajo se vrednosti presežnih porežnih tlakov in posledično tudi efektivne napetosti.

Če poznamo vrednosti presežnih porežnih tlakov, lahko v vsakem času, ob upoštevanju načela efektivnih in totalnih napetosti $\sigma = \sigma' + u$, izračunamo dosežene efektivne napetosti v zemljini (temeljnih tleh).

Napetostno stanje v temeljnih tleh pred obremenitvijo sloja zemljine (temeljnih tal) z obtežbo q prikažemo z indeksom α :

$$\sigma_{zz\alpha}, \sigma'_{zz\alpha} = \sigma_{zz\alpha} - u_{\alpha}. \quad (31)$$

Po končanem procesu konsolidacije upadejo presežni porežni tlaki Δu , ki nastanejo v zemljini zaradi obtežbe q , na nične vrednosti. Dodatne efektivne vertikalne napetosti pa postanejo zaradi obtežbe q enake dodatnim totalnim vertikalnim napetostim. Novo napetostno stanje prikažemo z indeksom β :

$$t_{\infty} \Rightarrow \Delta u = 0, \Delta\sigma'_{zz} = \Delta\sigma_{zz}$$

$$\sigma'_{zz\beta} = \sigma'_{zz\alpha} + \Delta\sigma'_{zz}. \quad (32)$$

Modul stisljivosti izračunamo po enačbi:

$$E_{oed} = -\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta e}(1 + e_{\alpha}), \quad (33)$$

kjer so:

$$\Delta\sigma'_{zz} = \sigma'_{zz\beta} - \sigma'_{zz\alpha} \text{ in } \Delta e = e_{\beta} - e_{\alpha}$$

e_{β} in e_{α} dobimo tako, da ju odčitamo iz grafa funkcije $e(\sigma')$ pri $\sigma'_{zz\beta}$ in $\sigma'_{zz\alpha}$.

Skrček sloja izračunamo z integracijo navpične deformacije po celotni debelini sloja tal, oz. tako, da ploščino diagrama dodatnih totalnih vertikalnih napetosti delimo s povprečno vrednostjo modula stisljivosti, ki ustreza spremembi vertikalnih napetosti v sloju zemljine (temeljnih tal).

Velikost končnega konsolidacijskega posedka izračunamo po enačbi:

$$\rho_{\infty} = \int_0^h \varepsilon_1(z) dz = \frac{\int_0^h \Delta e(z) dz}{1+e_0} = \frac{\int_0^h \Delta\sigma'_{zz}(z) dz}{E_{oed}} = \frac{A_{\infty}}{E_{oed}}. \quad (34)$$

Velikost konsolidacijskega posedka, ki nastane v določenem času med konsolidacijo, lahko izračunamo, če ploščino diagrama efektivnih dodatnih vertikalnih napetosti, v tem času, delimo z modulom stisljivosti:

$$\rho_t = \frac{A_t}{E_{oed}} = \frac{\int_{z=0}^h \Delta\sigma'_{zz}(z) dz}{E_{oed}} \quad (35)$$

$$\text{oz. } \rho_t = U_v \cdot \rho_{\infty}, \quad (36)$$

kjer je $U_v = U_v(T_v)$.

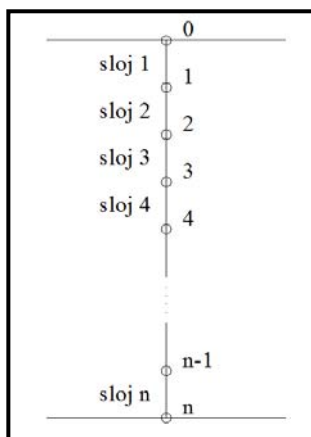
Enačba $U_v = U_v(T_v)$ se za primer brezkrayne obtežbe in prepustnega roba zgoraj ter spodaj, glasi (<http://www.coastal.ufl.edu/>):

$$\frac{U\%}{100} = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \left[1 + \left(\frac{4T_v}{\pi} \right)^{2.8} \right]^{-0.179}. \quad (37)$$

Zgornja enačba predstavlja aproksimacijo Terzaghijeve rešitve.

7.2 Nelinearni materialni parametri

Tu rešujemo parcialno diferencialno enačbo 3, ki jo numerično rešimo z diferenčno metodo. Pri numeričnem izračunu najprej diskretiziramo področje, tako da dobimo končno število točk. V našem primeru razdelimo sloj na n delov in dobimo $n + 1$ točk.



Slika 17: Diskretizacija prostora (sloja)

Ker ne moremo zapisati točnih odvodov v točki i , se zadovoljimo s približki. Difuzijsko enačbo tako zapišemo v diferenčni obliki:

$$\frac{u_i(t_2) - u_i(t_1)}{\Delta t} = c_v \frac{u_{i+1}(t_2) - 2u_i(t_2) + u_{i-1}(t_2)}{\Delta z^2}. \quad (38)$$

Enačbo 38 zapišemo za točko 2:

$$\frac{u_2 - u_2^0}{\Delta t} = \frac{c_v}{\Delta z^2} (u_3 - 2u_2 + u_1), \quad (39)$$

kjer u^0 predstavlja porni tlak pri času t_1 in je znan, ter u porni tlak pri času t_2 , ki je neznan.

Uvedemo novo spremenljivko $A = \frac{\Delta t \cdot c_v}{\Delta z^2}$, jo vstavimo v enačbo 39 in jo uredimo:

$$Au_1 + (-1 - 2A)u_2 + Au_3 = -u_2^0. \quad (40)$$

Enačbo 40 zapišemo še za ostale točke in vse skupaj ob upoštevanju robnih pogojev zapišemo v matrični obliki. Pri tem upoštevamo tudi, da se A z globino spreminja.

Robni pogoji:

- zgoraj
 $u_0 = 0$... prepusten rob
- spodaj
 $u_n = 0$... prepusten rob
 $u'_n = 0$... neprepusten rob $\rightarrow \frac{u_n - u_{n-2}}{2\Delta z} = 0 \rightarrow u_n - u_{n-2} = 0$

Sistem enačb:

- spodaj je neprepusten rob

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & -1 - 2A_1 & A_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & -1 - 2A_2 & A_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{n-2} \\ u_{n-1} \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -u_1^0 \\ \vdots \\ -u_{n-2}^0 \\ -u_{n-1}^0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (41)$$

- spodaj je prepusten rob

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & -1 - 2A_1 & A_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & -1 - 2A_2 & A_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{n-2} \\ u_{n-1} \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -u_1^0 \\ \vdots \\ -u_{n-2}^0 \\ -u_{n-1}^0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (42)$$

Ko rešimo sistem enačb 41 ali 42, dobimo vektor dodatnih pornih tlakov v trenutnem času:

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{n-2} \\ u_{n-1} \\ u_n \end{Bmatrix}$$

Ker poznamo tudi začetne efektivne napetosti σ'_i , lahko v vsaki točki izračunamo trenutne efektivne napetost $\sigma'_i(t)$. Ko poznamo $\sigma'_i(t)$, lahko izračunamo količnik por $e = e(\sigma'_i)$, prepustnost $k = k(e)$ in edometriški modul $\sigma'_i \rightarrow E_{oed}$ v vsaki točki.

Posedek ρ smo tu računali na dva načina:

a) preko količnika por e

$$\varepsilon_i = \frac{e_i(t) - e_i(t + \Delta t)}{1 + e_i(t)}, \quad (43)$$

kjer so:

ε_i ... deformacija i-tega sloja

$e_i(t)$... količnik por i-tega sloja v predhodnem času

$e_i(t + \Delta t)$... količnik por i-tega sloja v trenutnem času

$$\Delta\rho_i = \varepsilon_i \cdot \Delta z, \quad (44)$$

kjer sta:

$\Delta\rho_i$... posedek i-tega sloja

$\rho = \Sigma(\Delta\rho_i)$... celoten posedek

b) in preko dodatnih pornih tlakov u_i

Tu smo upoštevali, da je sprememba pornih tlakov Δu enaka spremembi efektivnih napetosti

$\Delta\sigma'_{zz}$. Zato lahko rečemo, da je prirastek posedka enak $\Delta\rho = \frac{\Delta\sigma'_{zz}}{E_{oed}} = \frac{\Delta u}{E_{oed}}$. Tako je:

$$\Delta\Delta\rho_i = \frac{[u_{i+1}(t) - u_{i+1}(t - \Delta t)] + [u_i(t) - u_i(t - \Delta t)]}{2 \cdot E_{oed}(t)}, \quad (45)$$

kjer so:

$\Delta\Delta\rho_i$... prirastek posedka i-tega sloja

$\Delta\rho = \Sigma(\Delta\Delta\rho_i)$... prirastek celotnega posedka v času t

$\rho(t) = \rho(t - \Delta t) + \Delta\rho$... celoten posedek v času t .

8 RAČUNSKI PRIMERI

8.1 Vhodni podatki

8.1.1 AJDA

Program je namenjen računu konsolidacije koherentnih materialov. Poleg posedkov na enem sloju lahko računa tudi posedke večih slojev. Materialni parametri, ki jih podajamo v tem programu so:

a) račun s konstantnimi materialnimi parametri

- suha prostorninska teža zemljine γ_d
- začetna višina sloja h
- obtežni vektor
- robni pogoji (prepustni / neprepustni robovi)
- začetni količnik por e_o
- konstanten količnik prepustnosti k
- in konstanten edometriški modul E_{oed} ,

b) račun z nelinearnimi materialnimi parametri

enako kot pri računu s konstantnimi materialnimi parametri, le da namesto suhe prostorninske teže γ_d podajamo prostorninsko težo zrnja γ_s , namesto konstantnega količnika prepustnosti k in konstantnega edometriškega modula E_{oed} pa podajamo parametre funkcij $e(\sigma)$ in $k(e)$:

- obremenilna konstanta λ in razbremenilna konstanta κ
- prekosolidacijski tlak σ_p
- in materialna parametra k_0 in k_3 .

8.1.2 CONDES0

Program je namenjen računu konsolidacije (CONsolidation) in izsuševanja (DESication) mehkih fosfatnih glin. Računa posedke enega sloja, kjer je razporeditev količnika por z

globino lahko linearna oz. nelinearna. Omogoča postopno dodajanje zemljine. Na malo bolj zapleten način lahko zemljino tudi postopno obremenjujemo. Vse možnosti oblikovanja vhodne datoteke so predstavljene v navodilih za uporabno programa, v nadaljevanju bo predstavljena le vhodna datoteka, ki smo jo uporabili za naše izračune. V njej podajamo naslednje parametre:

- parametre zemljine A , B , C , D in Z
- specifično težo zrnja γ_s in vode γ_w
- začetno višino sloja h
- robne pogoje na vrhu (tu tudi podamo obtežbo)
- robne pogoje na dnu
- pri večstopenjskem obremenjevanju moramo podati tudi stanje količnikov por na koncu prejšnje bremenske stopnje in spremenjeno začetno višino.

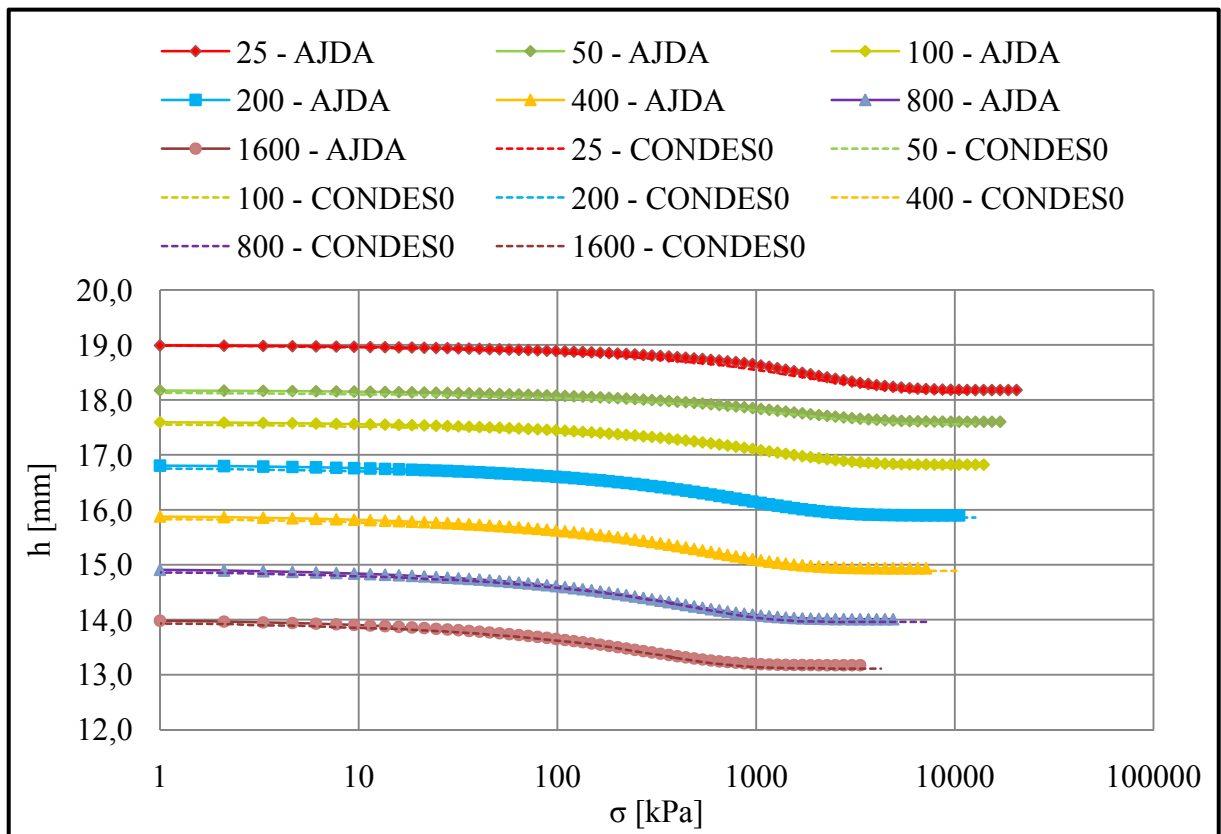
8.2 Primerjava izračunov iz programov CONDES0 in AJDA

Pravilnost računanja programa AJDA smo najprej ugotavljali tako, da smo tako pri njem kot tudi pri programu CONDES0 uporabili CONDES0-ove parametre. To pomeni, da smo v programu AJDA namesto Cam clay modela uporabili hiperbolični model in namesto eksponentne zveze $k(e)$ uporabili potenčno zvezo $k(e)$.

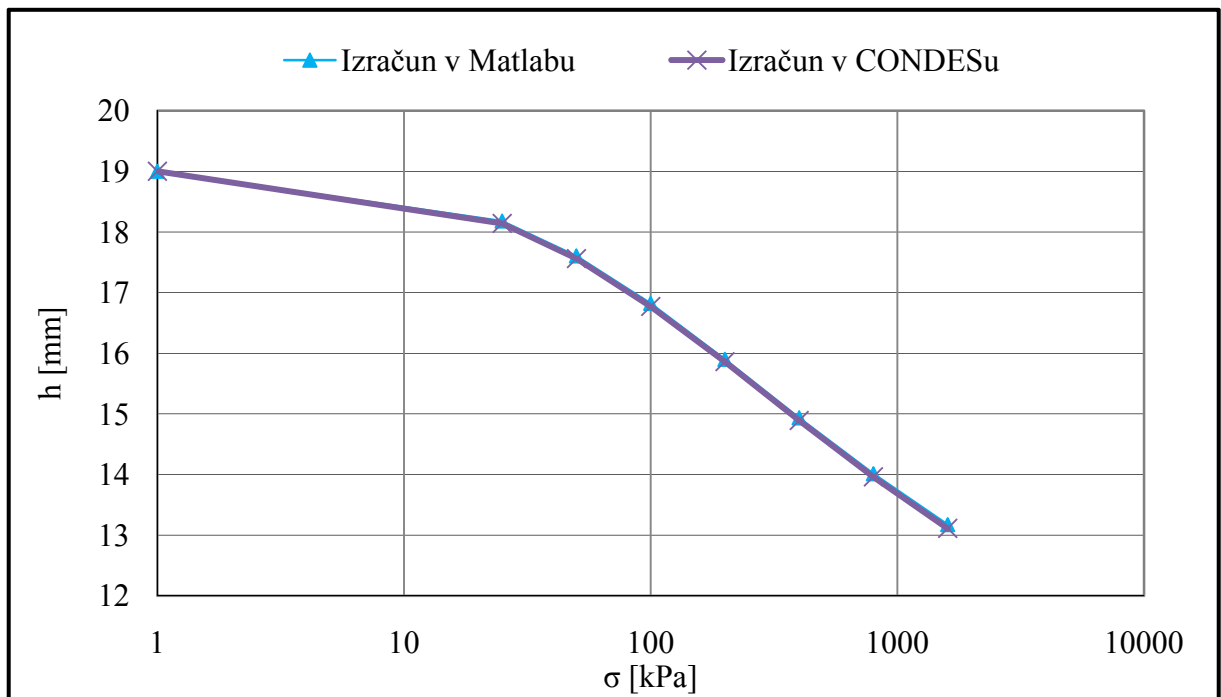
Za primerjavo smo uporabili vzorec CH gline iz vrtine VC-5 na globini 14,7-15,0 m iz Luke Koper.

Preglednica 7: Vhodni podatki programa CONDES0 za ugotavljanje pravilnosti računanja programa AJDA

Vhodni podatki za program CONDES0			
A	3,60	γ_s [kN/m ³]	26,7
B	-0,23	h [mm]	19
C	1,3E-10	robni pogoji na vrhu	prepustno
D	3,11	robni pogoji na dnu	prepustno
Z	61,46	obtežni vektor [kPa]	
		[25 50 100 200 400 800 1600]	



Grafikon 9: Časovni potek konsolidacije



Grafikon 10: Krivulja stisljivosti

Iz grafikonov 9 in 10 lahko vidimo, da se tako krivulji stisljivosti kot tudi krivulje časovnih potekov konsolidacije ustrezno prekrivajo. Na podlagi tega lahko zaključimo, da so izračuni programa AJDA primerljivi z izračuni preizkušene programa CONDES0.

8.3 Simulacija edometra

Izbrane računske modele in program AJDA smo preverili tudi s simulacijo edometriške preiskave. Tako so karakteristike, dobljene pri edometriški preiskavi λ , κ , e_o in σ_p , postale vhodni podatki za izračun posedkov. Glavni rezultat simulacije je bil časovni potek konsolidacije, ki smo ga nato primerjali s potekom, dobljenim z edometriško preiskavo.

Simulacijo smo napravili na 4 različnih tipih zemljine. Pri tem smo uporabili naslednje vzorce:

- CH glina: vzorec VC-5 na globini 14,7-15,0 m iz Luke Koper
- CL glina: vzorec OŠO-8 na globini 29,0-29,3 m iz obvoznice Škofljica
- MH melj: vzorec OŠO-8 na globini 3,3-3,6 m iz obvoznice Škofljica
- SC pesek: vzorec VC-6 na globini 27,0-27,7 m iz Luke Koper.

8.3.1 CH glina

8.3.1.1 Vhodni podatki

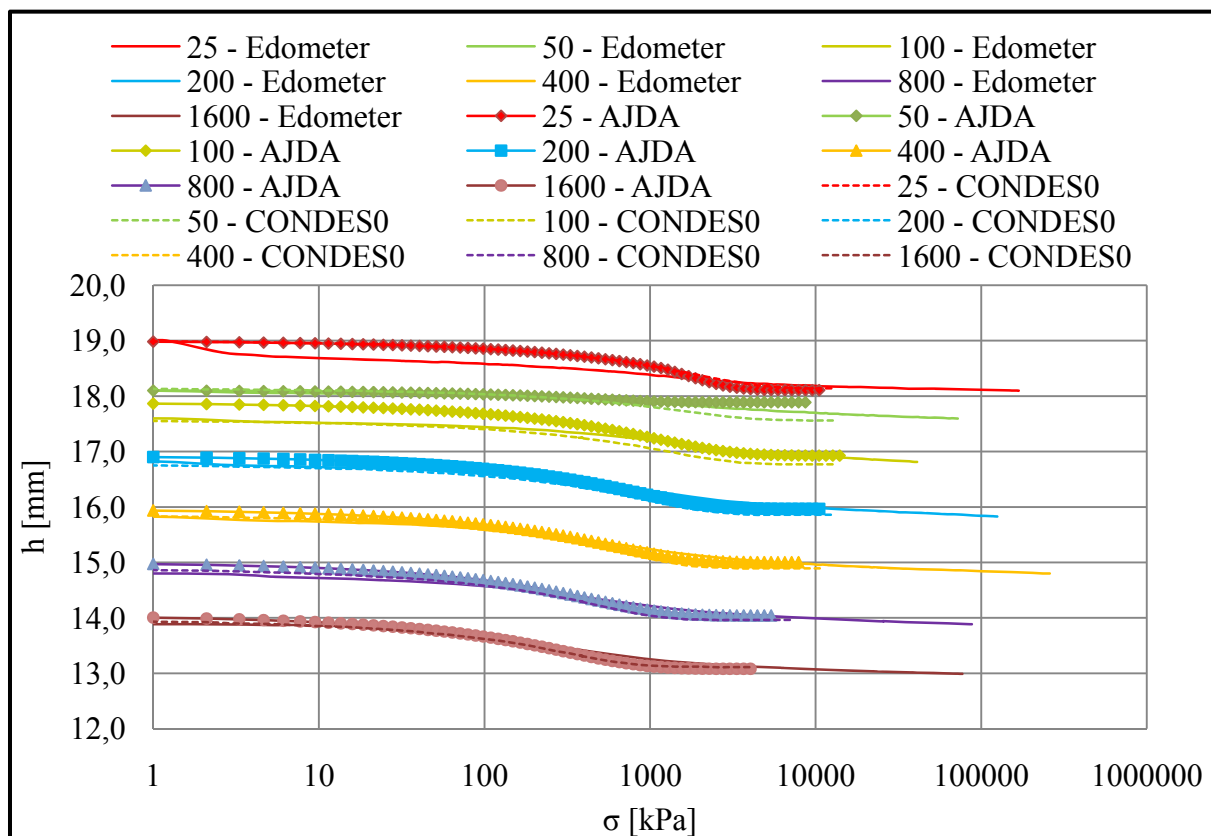
Preglednica 8: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za CH glino

AJDA		CONDES0		SKUPNO	
e_o	1,405	A	3,60	γ_s [kN/m ³]	26,7
κ	0,040	B	-0,23	h [mm]	19
λ	0,175	C	1,3E-10	robni pogoji na vrhu	prepustno
σ_p [kPa]	50	D	3,11	robni pogoji na dnu	prepustno
k_0	2,3E-12	Z	61,46	obtežni vektor [kPa]	
k_3	4,0			[25 50 100 200 400 800 1600]	

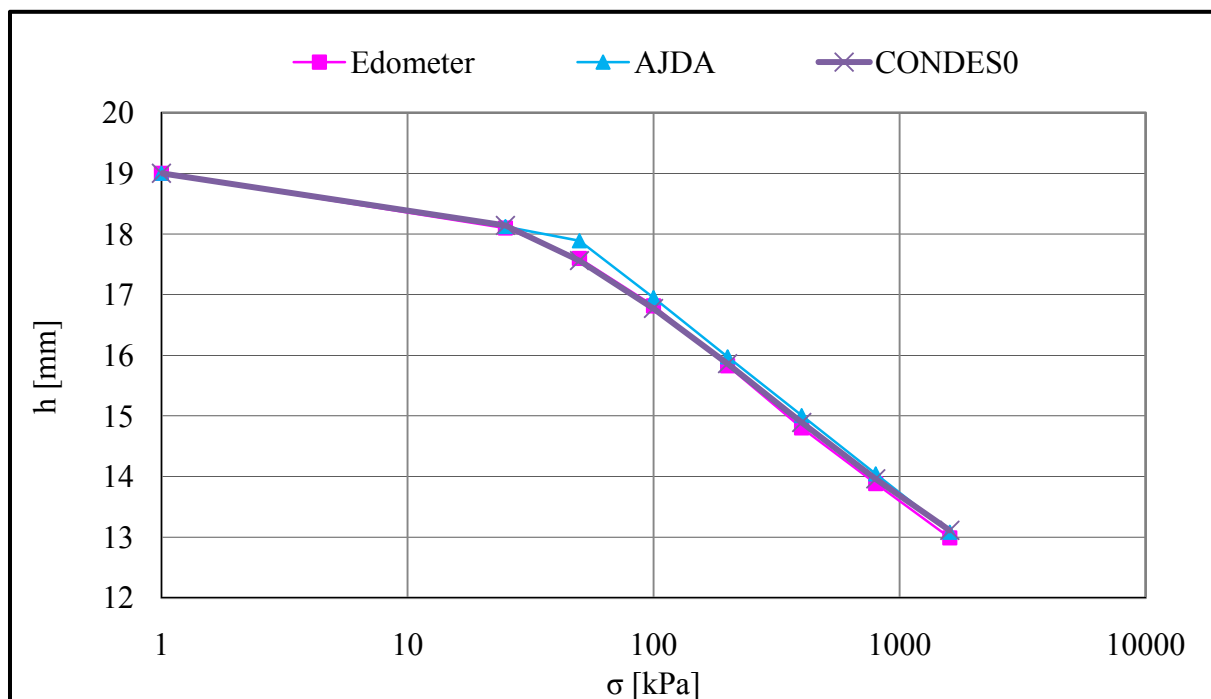
8.3.1.2 Rezultati

Preglednica 9: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za CH glino

		končna višina [mm]			končana konsolidacija [h]	
		AJDA	Meritve v edometru	CONDES0	AJDA	CONDES0
bremenska stopnja [kPa]	25	18,1	18,1	18,1	1,8	2,4
	50	17,9	17,6	17,6	0,4	2,4
	100	16,9	16,8	16,8	1,7	1,7
	200	16,0	15,8	15,9	2,2	1,2
	400	15,0	14,8	14,9	0,8	1,0
	800	14,0	13,9	14,0	0,5	0,7
	1600	13,1	13,0	13,1	1,8	0,7

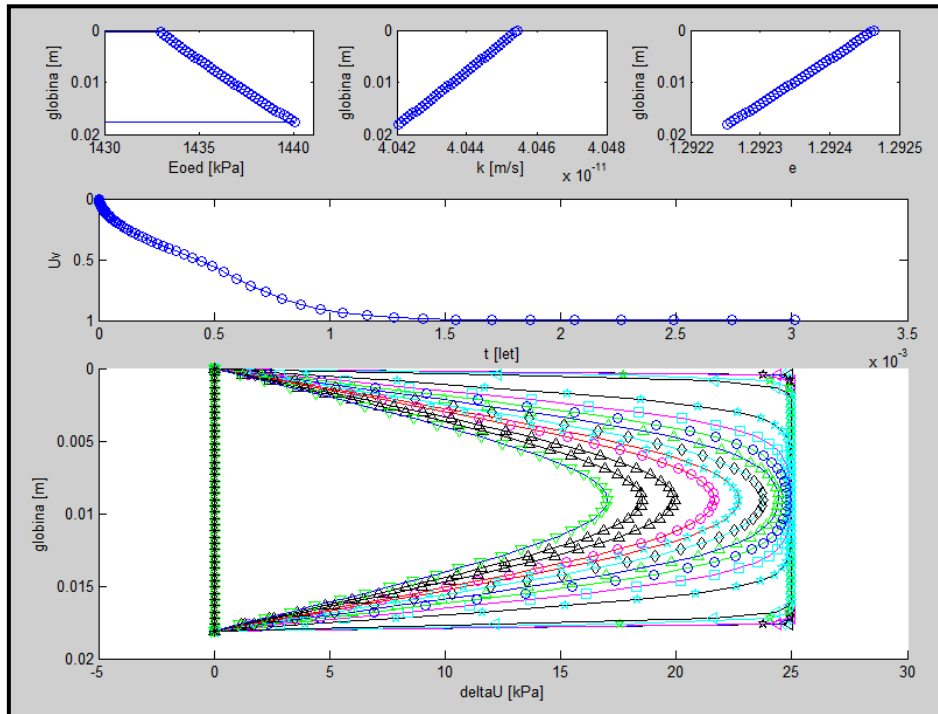


Grafikon 11: Časovni potek konsolidacije pri CH glini

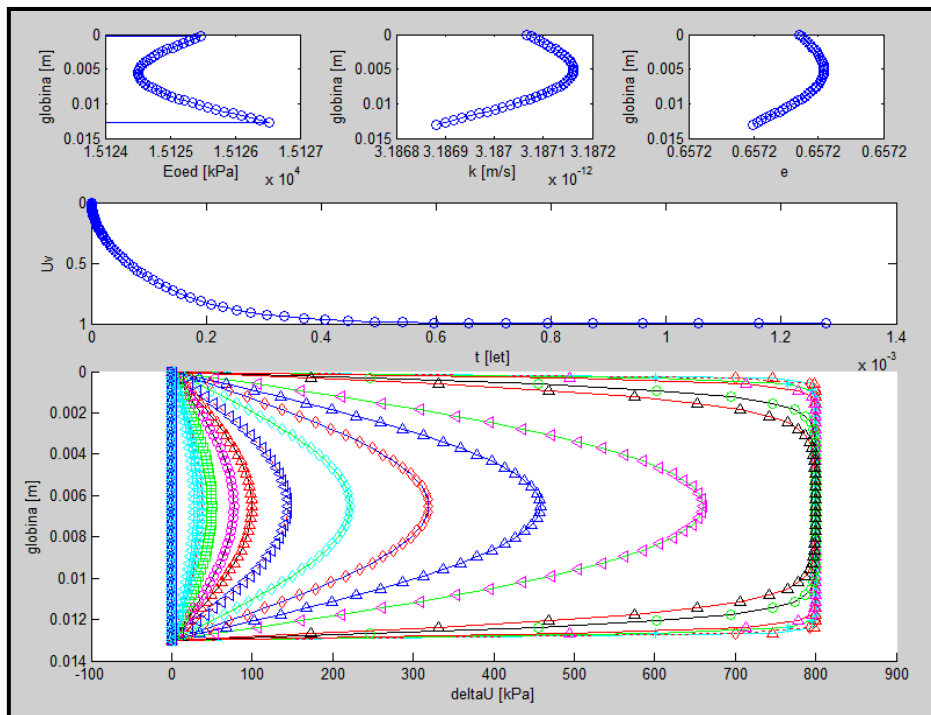


Grafikon 12: Krivulja stisljivosti pri CH glini

8.3.1.2.1 Izris grafov programa AJDA za prvo in zadnjo bremensko stopnjo

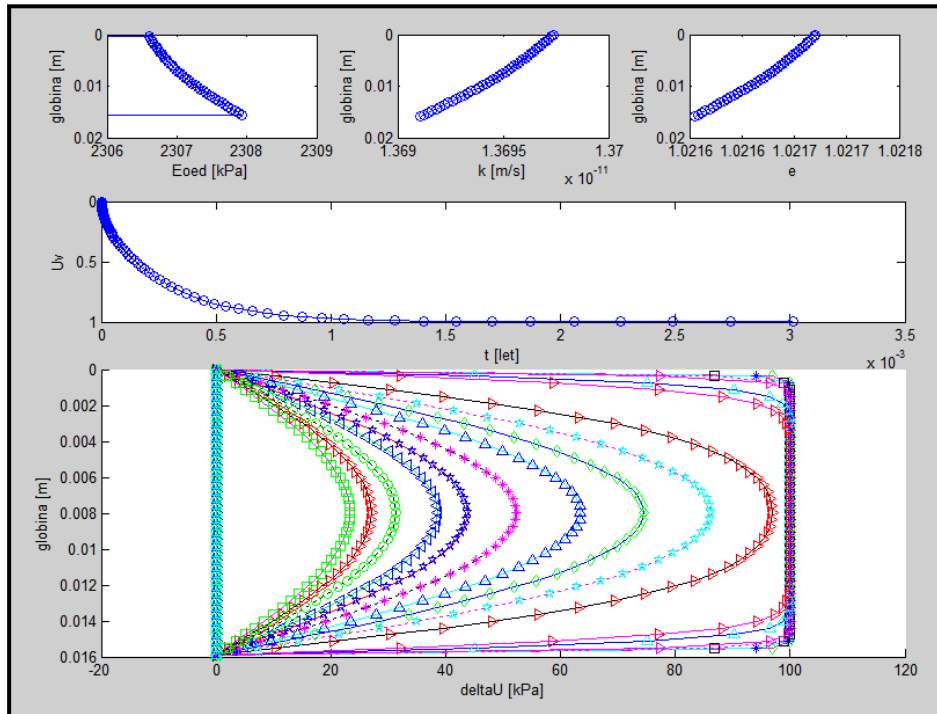


Slika 18: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 25 kPa

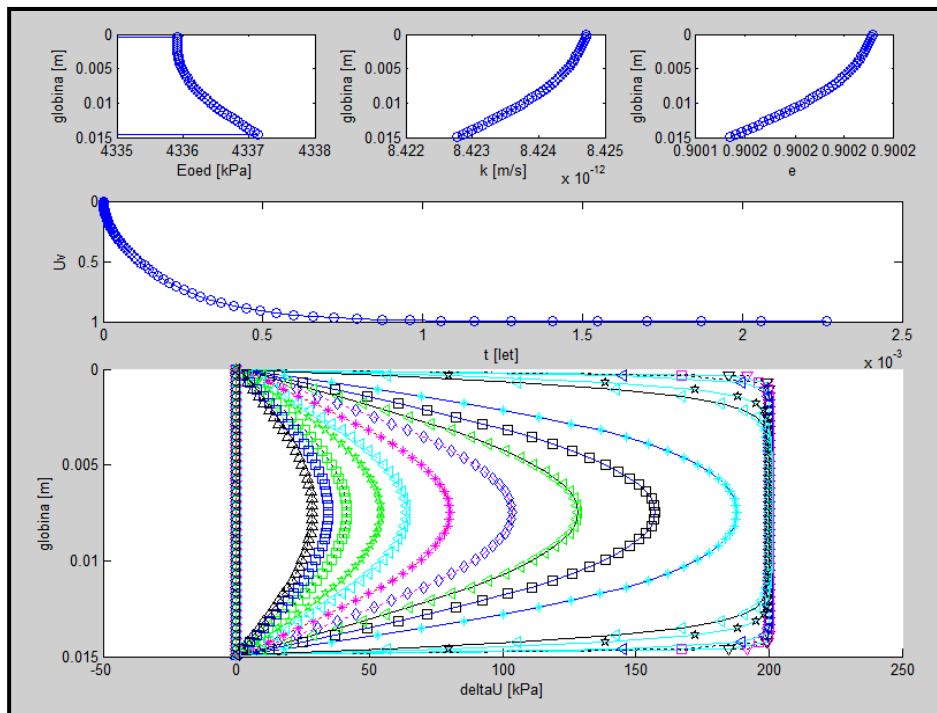


Slika 19: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 800 – 1600 kPa

8.3.1.2.2 Izris grafov programa AJDA za dve sosednji bremenski stopnji



Slika 20: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa



Slika 21: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 200 – 400 kPa

8.3.2 Primer CL gline (OŠO-8)

8.3.2.1 Vhodni podatki

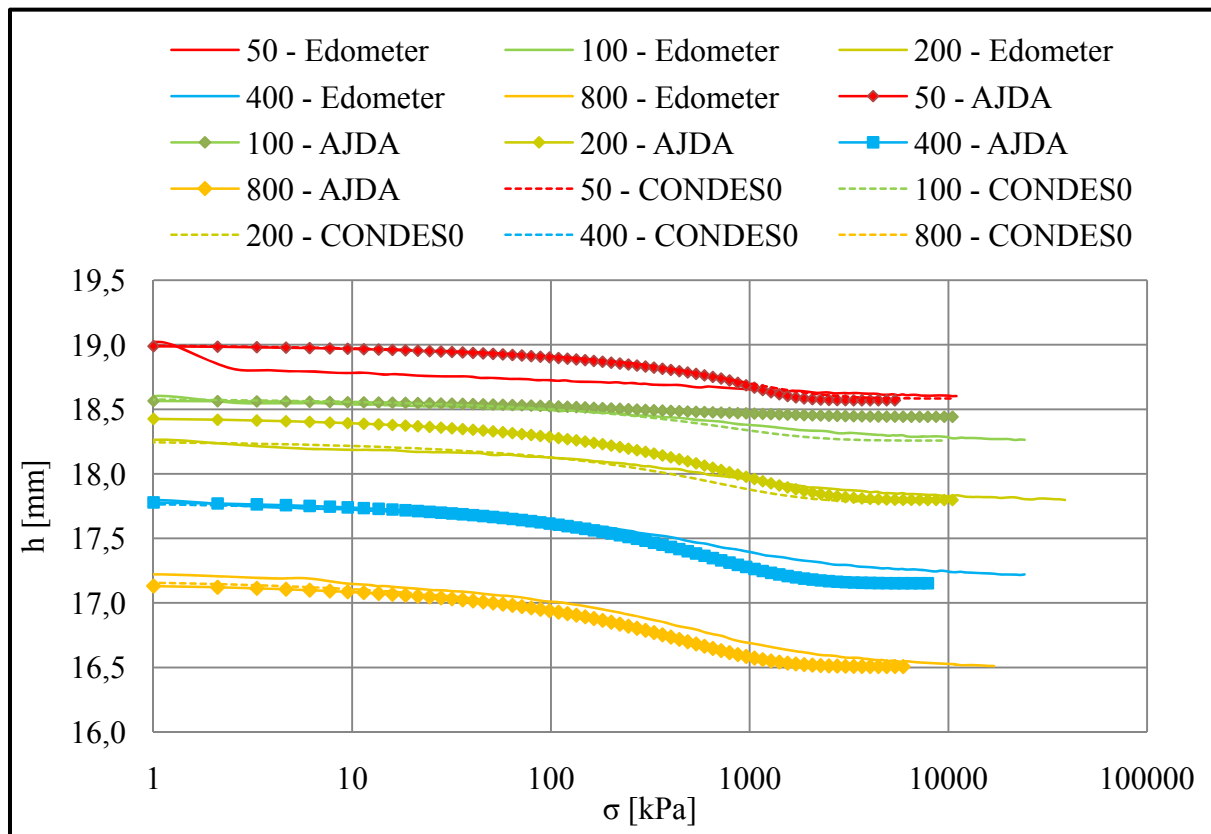
Preglednica 10: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za CL glino (OŠO-8)

AJDA		CONDES0		SKUPNO	
e_o	0,862	A	2,29	γ_s [kN/m ³]	27,5
κ	0,012	B	-0,19	h [mm]	19
λ	0,091	C	4,0E-10	robni pogoji na vrhu	prepustno
σ_p [kPa]	95	D	4,81	robni pogoji na dnu	prepustno
k_0	6E-13	Z	166,47	obtežni vektor [kPa]	
k_3	6,8			[50 100 200 400 800]	

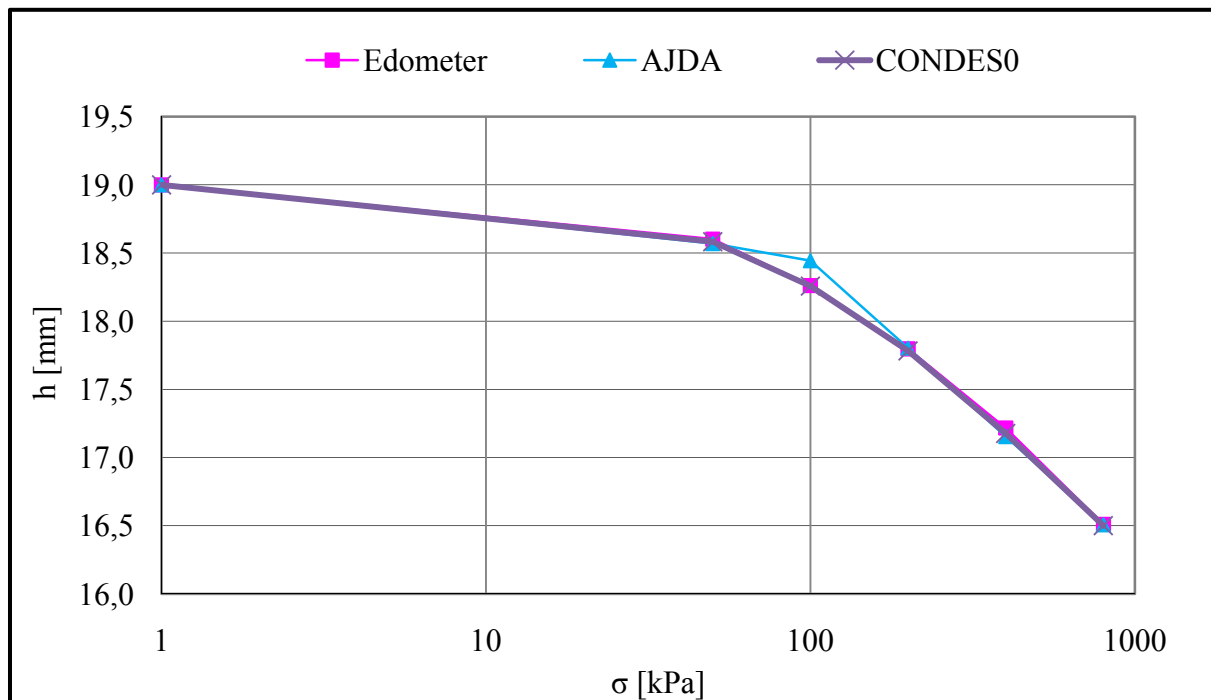
8.3.2.2 Rezultati

Preglednica 11: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za CL glino (OŠO-8)

		končna višina [mm]			končana konsolidacija [h]	
		AJDA	Meritve v edometru	CONDES0	AJDA	CONDES0
bremenska stopnja [kPa]	50	18,6	18,6	18,6	1,5	2,9
	100	18,4	18,3	18,3	2,9	2,7
	200	17,8	17,8	17,8	2,9	2,4
	400	17,2	17,2	17,2	2,2	2,0
	800	16,5	16,5	16,5	1,6	1,6

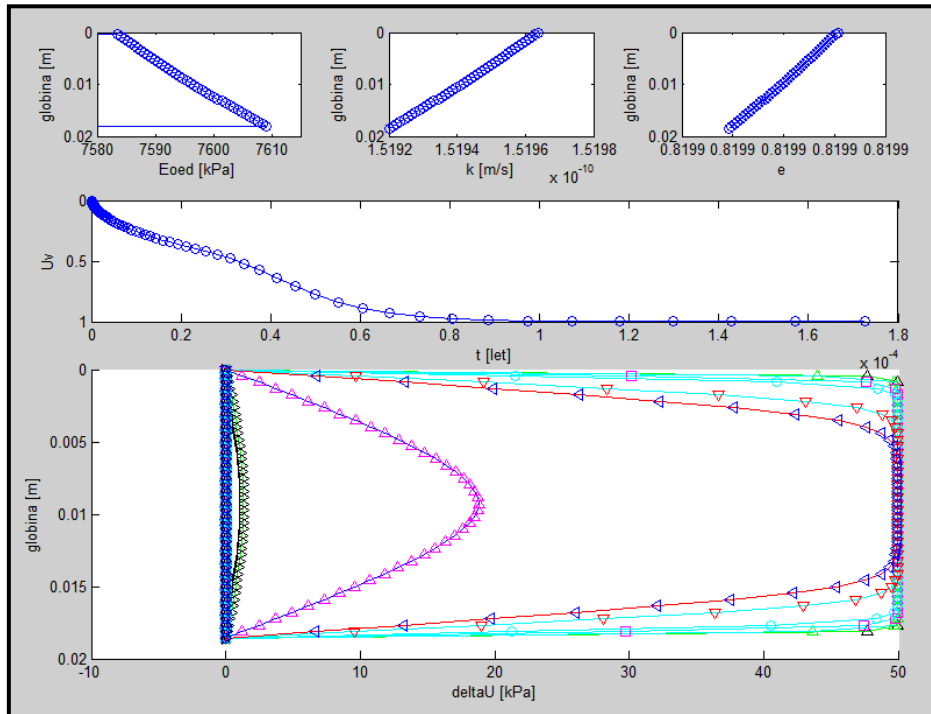


Grafikon 13: Časovni potek konsolidacije pri CL glini (OŠO-8)

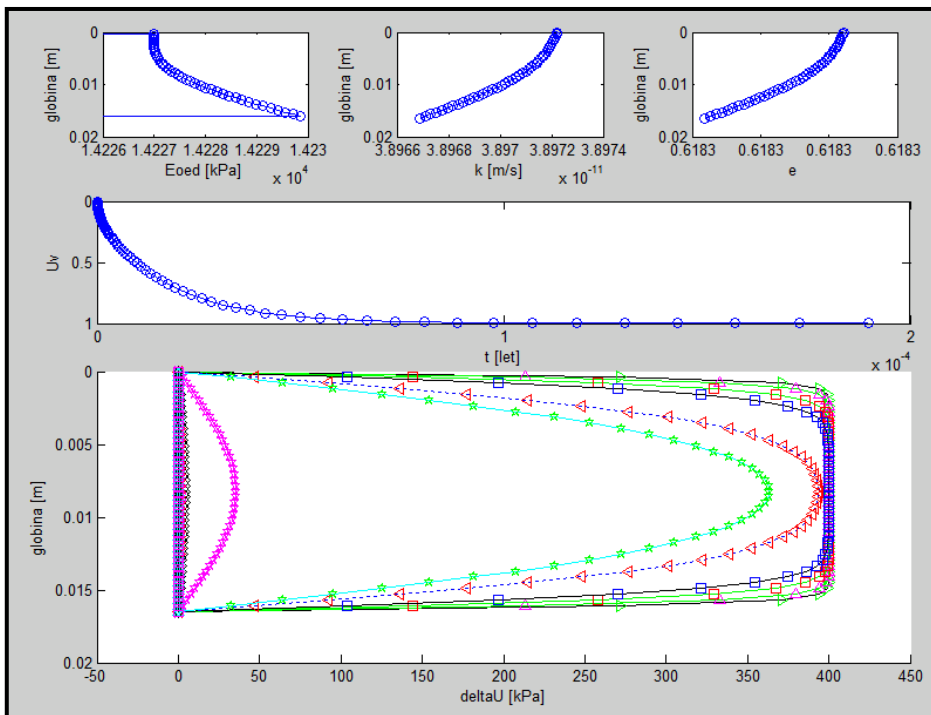


Grafikon 14: Krivulja stisljivosti pri CL glini (OŠO-8)

8.3.2.2.1 Izris grafov programa AJDA za prvo in zadnjo bremensko stopnjo

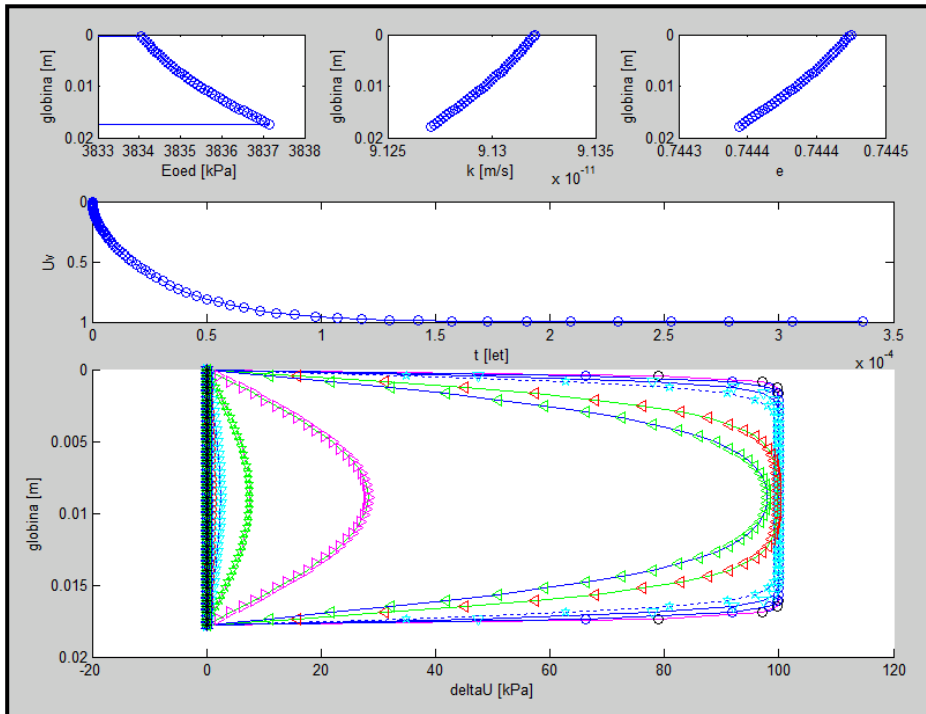


Slika 22: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 50 kPa

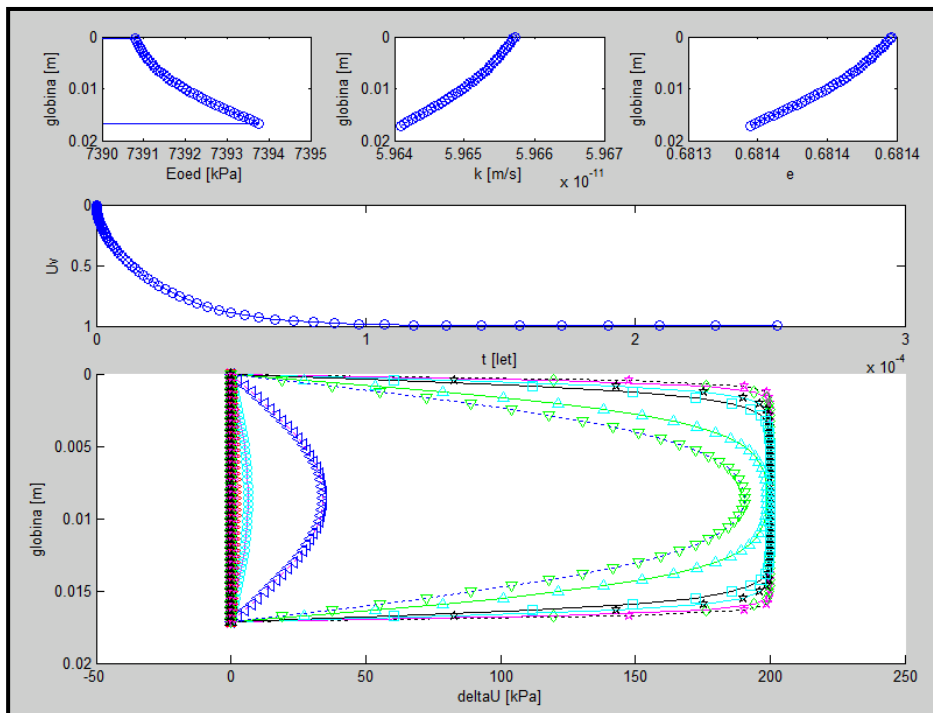


Slika 23: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 400 – 800 kPa

8.3.2.2.2 Izris grafov programa AJDA za dve sosednji bremenski stopnji



Slika 24: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa



Slika 25: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 200 – 400 kPa

8.3.3 Primer MH melja

8.3.3.1 Vhodni podatki

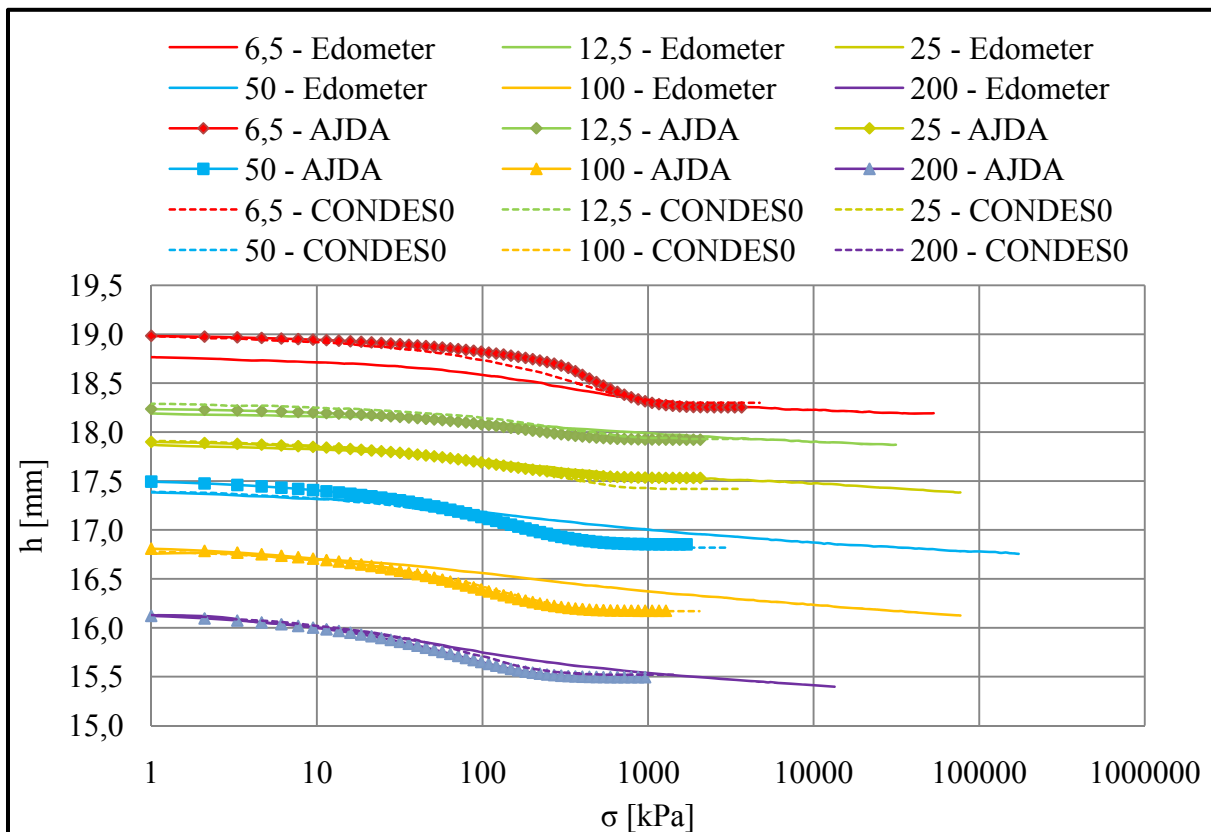
Preglednica 12: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za MH melj

AJDA		CONDES0		SKUPNO	
e_o	2,006	A	2,56	γ_s [kN/m ³]	27,5
κ	0,067	B	-0,11	h [mm]	19
λ	0,155	C	1,0E-10	robni pogoji na vrhu	prepustno
σ_p [kPa]	13	D	5,90	robni pogoji na dnu	prepustno
k_0	4,0E-12	Z	10,42	obtežni vektor [kPa]	
k_3	3,8			[6,5 12,5 25 50 100 200]	

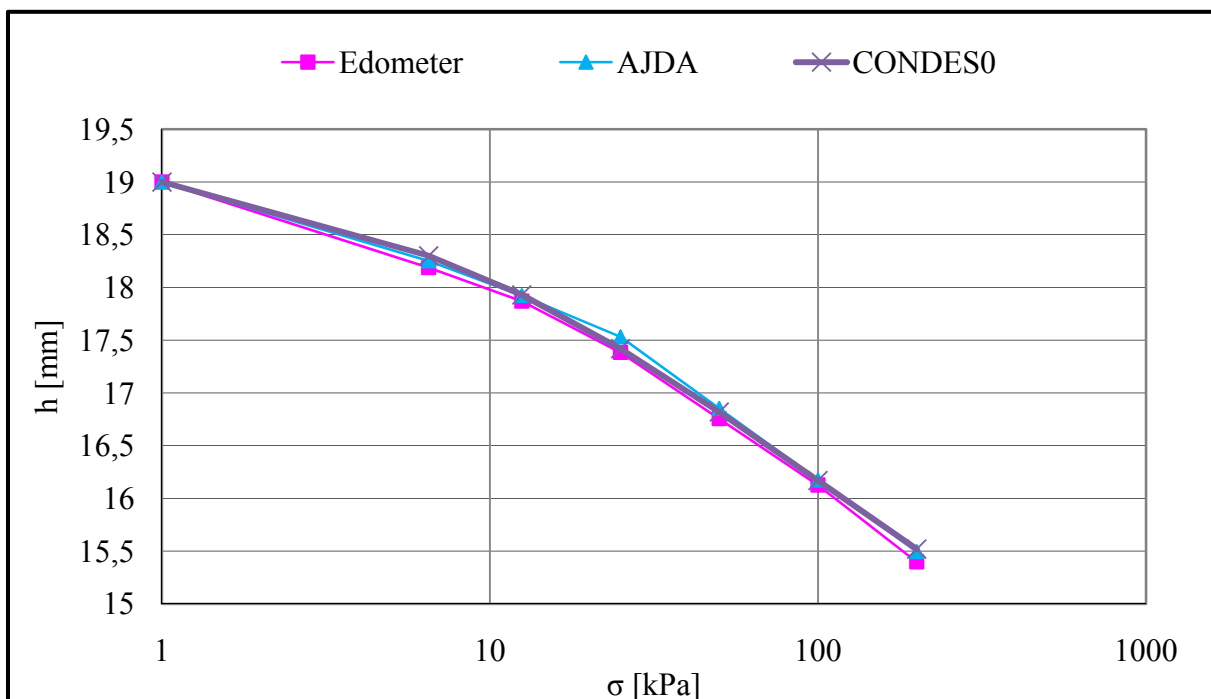
8.3.3.2 Rezultati

Preglednica 13: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za MH melj

		končna višina [mm]			končana konsolidacija [h]	
		AJDA	Meritve v edometru	CONDES0	AJDA	CONDES0
bremenska stopnja [kPa]	6,5	18,3	18,2	18,3	0,6	0,5
	12,5	17,9	17,9	17,9	0,3	0,5
	25	17,5	17,4	17,4	0,3	0,3
	50	16,9	16,8	16,8	0,3	0,2
	100	16,2	16,1	16,2	0,2	0,2
	200	15,5	15,4	15,5	0,1	0,2

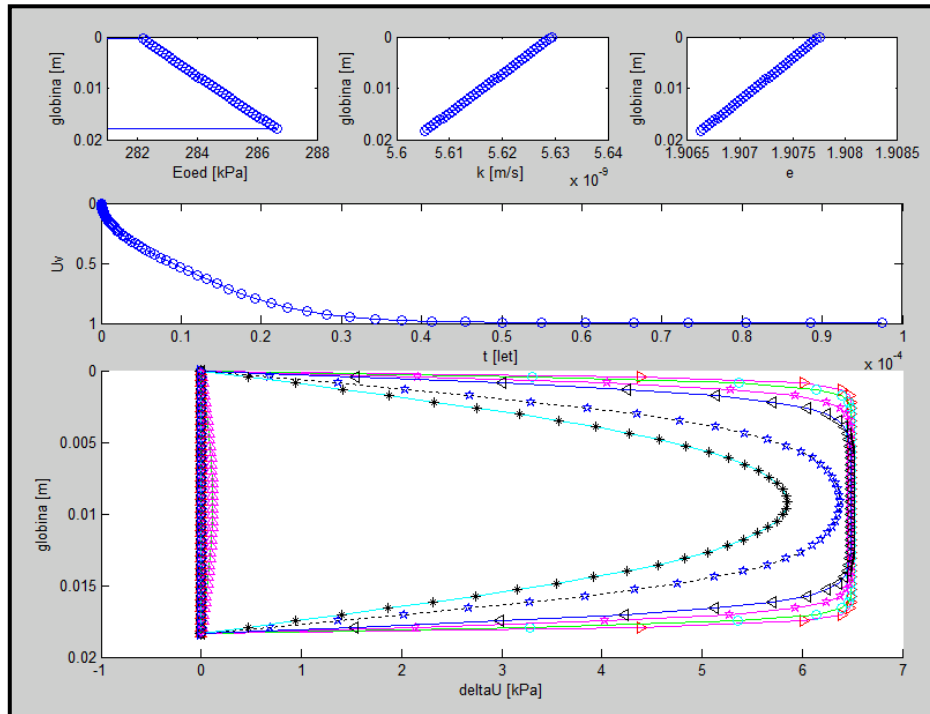


Grafikon 15: Časovni potek konsolidacije pri MH melju

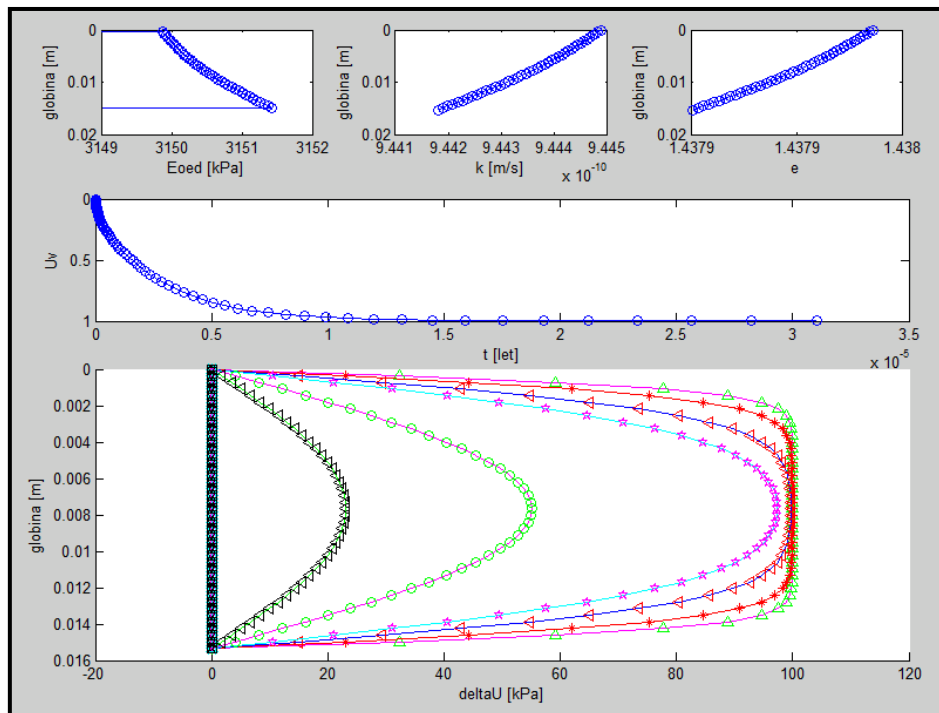


Grafikon 16: Krivulja stisljivosti pri MH melju

8.3.3.2.1 Izris grafov programa AJDA za prvo in zadnjo bremensko stopnjo

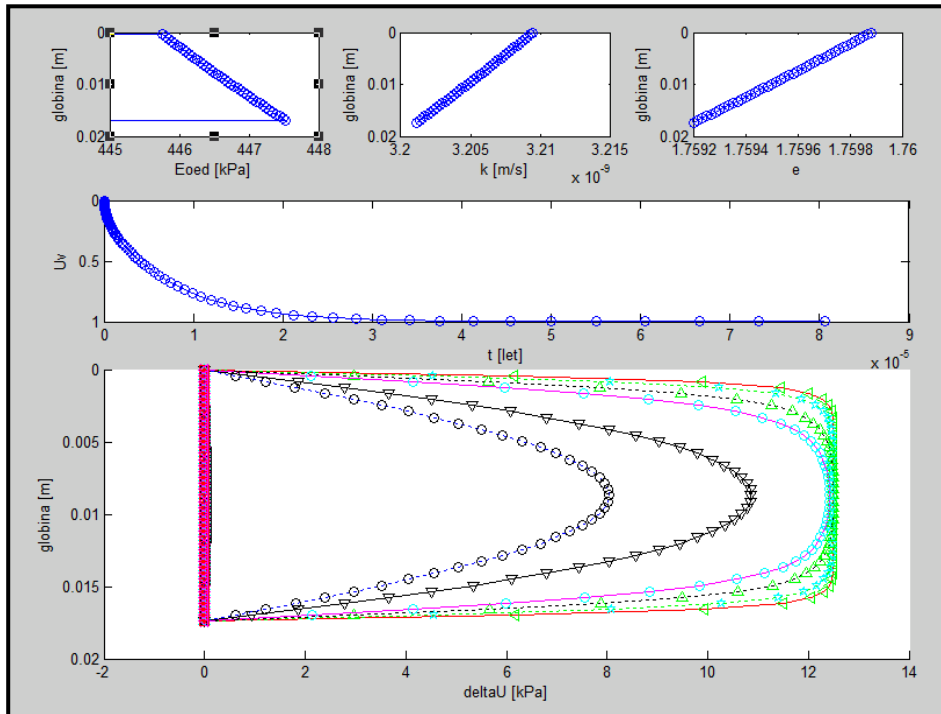


Slika 26: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 6,5 kPa

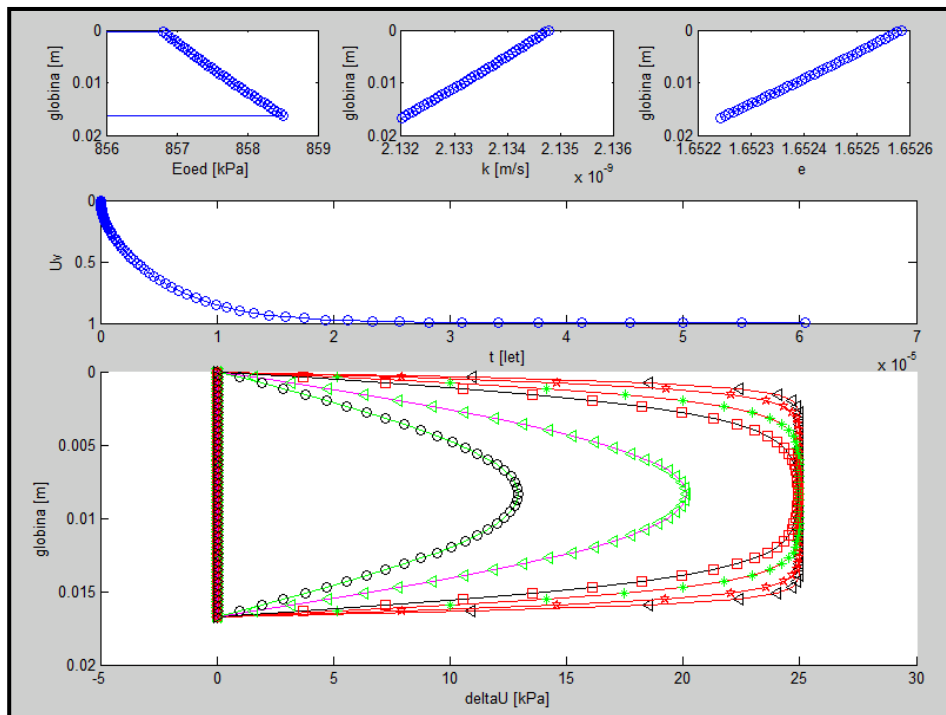


Slika 27: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa

8.3.3.2.2 Izris grafov programa AJDA za dve sosednji bremenski stopnji



Slika 28: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 12,5 – 25 kPa



Slika 29: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 25 – 50 kPa

8.3.4 Primer SC peska

8.3.4.1 Vhodni podatki

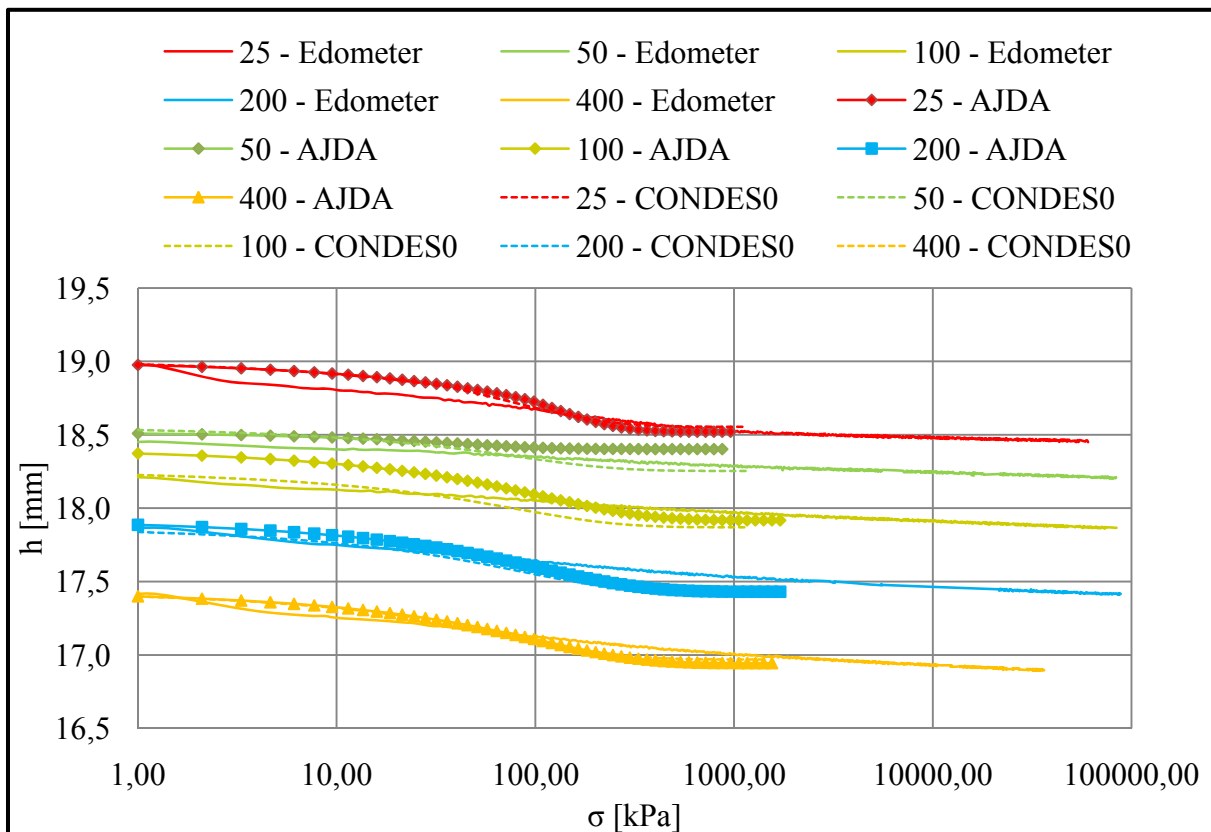
Preglednica 14: Osnovni vhodni podatki in podatki za nelinearen izračun za SC pesek

AJDA		CONDES0		SKUPNO	
e_o	0,958	<i>A</i>	1,4	γ_s [kN/m ³]	26,7
κ	0,017	<i>B</i>	-0,10	h [mm]	19
λ	0,072	<i>C</i>	9,0E-9	robni pogoji na vrhu	prepustno
σ_p [kPa]	50	<i>D</i>	12,36	robni pogoji na dnu	prepustno
k_0	1,0E-14	<i>Z</i>	35,70	obtežni vektor [kPa]	
k_3	13,4			[25 50 100 200 400]	

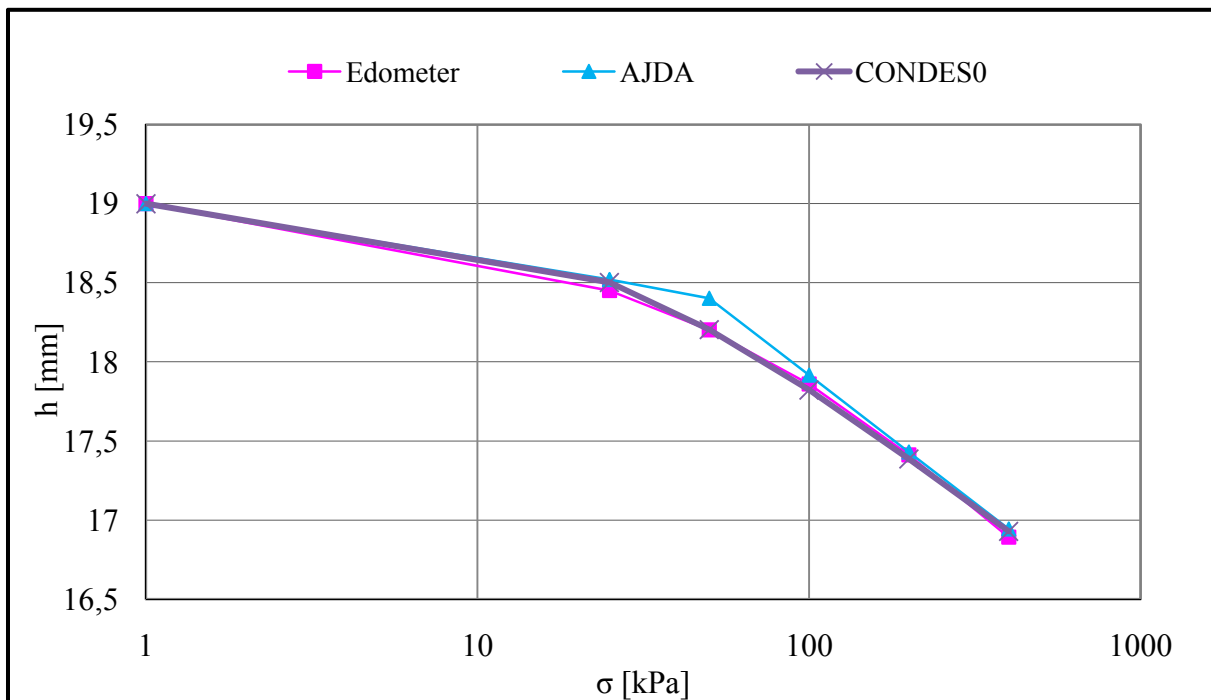
8.3.4.2 Rezultati

Preglednica 15: Prikaz končnih višin in časov končane konsolidacije za SC pesek

		končna višina [mm]			končana konsolidacija [h]	
		AJDA	Meritve v edometru	CONDES0	AJDA	CONDES0
bremenska stopnja [kPa]	25	18,5	18,5	18,5	0,3	0,3
	50	18,4	18,2	18,2	0,2	0,3
	100	17,9	17,9	17,8	0,5	0,3
	200	17,4	17,4	17,4	0,5	0,4
	400	16,9	16,9	16,9	0,4	0,4

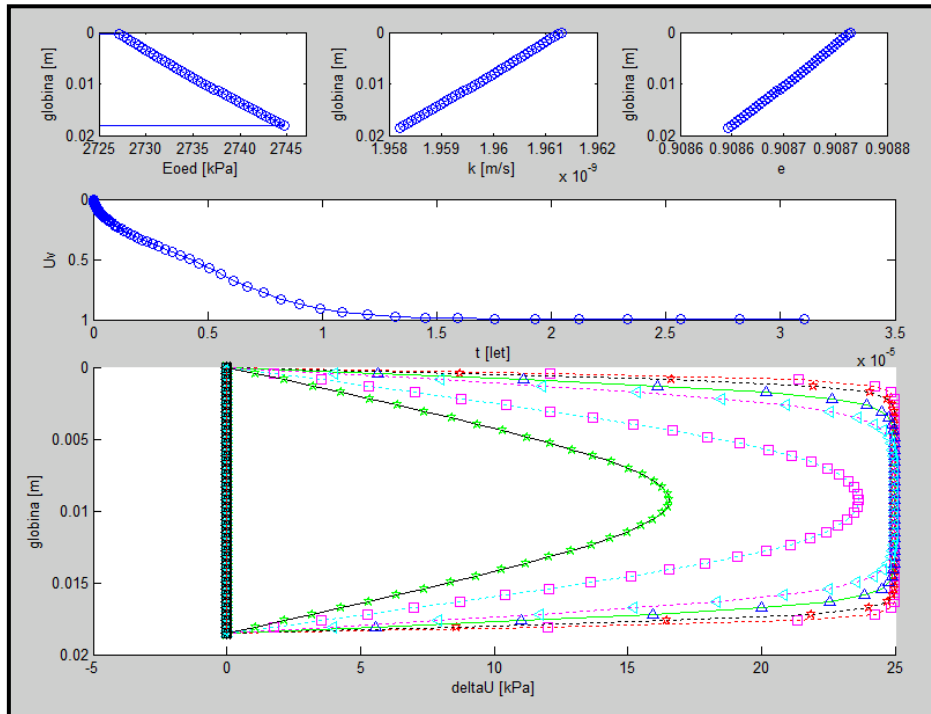


Grafikon 17: Časovni potek konsolidacije pri SC pesku

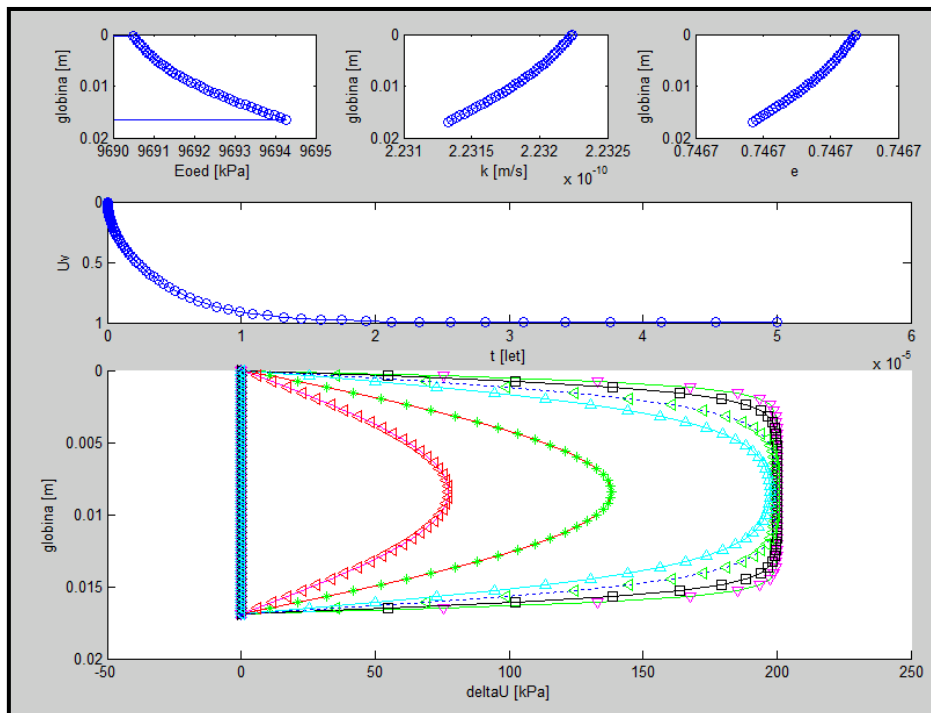


Grafikon 18: Krivulja stisljivosti pri SC pesku

8.3.4.2.1 Izris grafov programa AJDA za prvo in zadnjo bremensko stopnjo

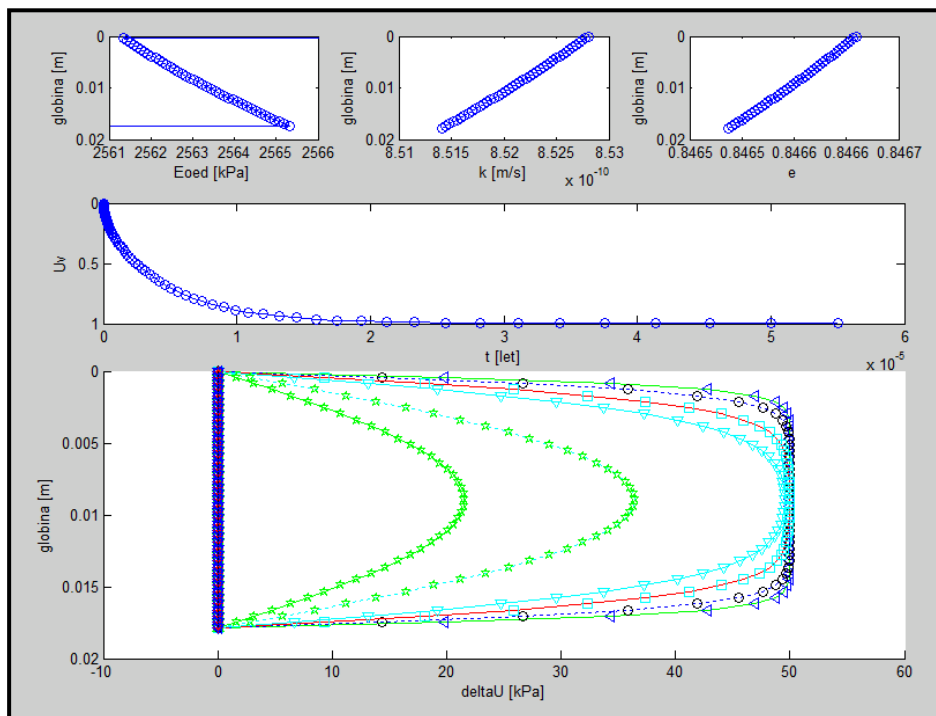


Slika 30: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 0 – 25 kPa

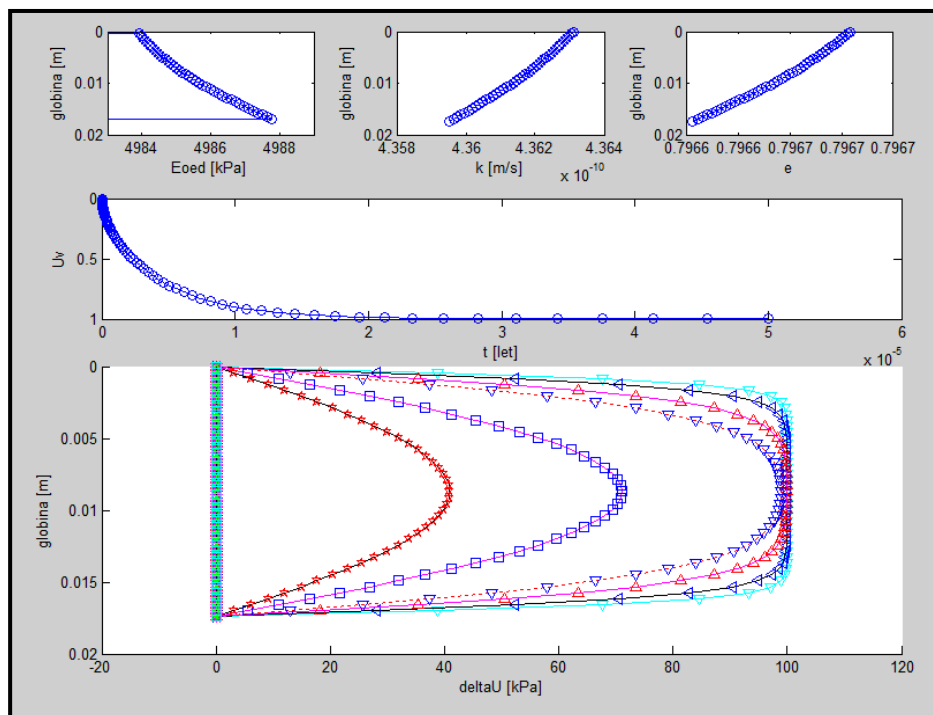


Slika 31: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 200 – 400 kPa

8.3.4.2.2 Izris grafov programa AJDA za dve sosednji bremenski stopnji



Slika 32: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 50 – 100 kPa



Slika 33: Izris grafov programa AJDA za bremensko stopnjo 100 – 200 kPa

8.3.5 Primerjava in komentar rezultatov

Za razliko od parametrov hiperboličnega modela smo parametre Cam clay modela morali kar nekajkrat spremeniti, da smo dobili želene rezultate.

Pri vseh štirih primerih smo najprej spremenili razbremenilno konstanto κ , saj se pri edometriški preiskavi določa iz 3. dela krivulje stisljivosti (slika 16). Ker razbremenjevanja nismo simulirali, smo jo določili iz 1. dela krivulje stisljivosti. Tako so se krivulje časovnih potekov konsolidacij pri obremenitvi manjši od prekonsolidacijskega tlaka skoraj popolnoma prekrile s krivuljami programa CONDES0. Obe skupini krivulj sta nekoliko odstopali od tistih dobljenih z edometriško preiskavo. To smo tudi pričakovali, saj se stanje v edometru zaradi začetnih imperfektnosti (naleganje obremenilnega mehanizma, morebitni ujeti zračni mehurčki v vzorcu, itd.) stabilizira šele pri 2. do 3. bremenski stopnji.

Spreminjali smo tudi prekonsolidacijski tlak in sicer tako dolgo, da so se krivulje časovnih potekov konsolidacije v zadnjih bremenskih stopnjah skoraj prekrile s tistimi iz programa CONDES0. Tukaj vidimo, da se te krivulje mnogo bolj ujemajo tudi s krivuljami dobljenimi z edometrom. Prav to dejstvo tudi nekoliko potrjuje teorijo o začetni imperfektnosti. Opazimo lahko, da ko zemljina doseže obremenitev enako omenjenemu tlaku, krivulje časovnega poteka konsolidacije nekoliko zaidejo iz ustaljene poti. To je posledica omenjenega loma krivulj v poglavju 4.5. Vendar lahko vidimo, da se stanje normalizira že pri naslednji bremenski stopnji.

Podobno situacijo opazimo pri krivuljah stisljivosti. Medtem ko se krivulje iz programa CONDES0 primerno pokrijejo s tistimi dobljenimi v edometru, se naše okoli prekonsolidacijskega tlaka znova odklonijo od pričakovanih vrednosti. Stanje se kasneje stabilizira.

Iz grafikonov časovnih potekov konsolidacije lahko vidimo tudi to, da se posedanje, izračunano s programoma konča prej kot dejansko v edometru. To je posledica učinka viskoznosti, ki se pri edometriški preiskavi pojavi, pri računu pa ga tako v programu AJDA kot tudi v programu CONDES0 ne upoštevamo.

Izrisi grafov iz programa AJDA potrjujejo to kar smo zapisali v uvodu. Vidimo namreč, da se edometrski modul E_{oed} z globino povečuje. Vodoprepustnost in količnik por pa se z globino zmanjšujeta, zaradi že omenjenega zgoščanja zemljine z globino.

Zaključimo lahko, da program AJDA daje dovolj dobre rezultate, če je obremenitev manjša oz. nekoliko večja od prekonsolidacijskega tlaka. Tako lahko sedaj preverimo razliko izračunanih parametrov, če predpostavimo konstanten oz. nelinearen potek karakteristik stisljivosti zemljine po globini, za poljuben sloj koherentne zemljine.

8.4 Posedanje pod poskusnim nasipom na Ljubljanskem barju

Rezultate izračunov s programa AJDA smo preverili še na realnem primeru. Vzeli smo primer poskusnega nasipa na temeljnih tleh tipične barjanske sestave.

Pod površinskim slojem humusa leži 4 do 7 m debel sloj meljne gline MH, imenovane polžarica. Sledi mu sloj glinastega melja MH-CH do globine 14 – 15 m in nato prod. Vrednosti materialnih parametrov smo vzeli iz (Logar, 1998).

Preglednica 16: Materialni parametri temeljnih tal pod poskusnim nasipom

MH sloj		MH-CH sloj			
e_o	2,730	e_o	1,590	γ_s [kN/m ³]	26,0
κ	0,031	κ	0,016	h MH sloja [m]	6,3
λ	0,341	λ	0,198	h MH-CH sloja [m]	8,0
σ_p [kPa]	11	σ_p [kPa]	25	obtežba [kPa]	61
k_0	3,0E-9	k_0	2,0E-12	robni pogoji na vrhu	prepustno
k_3	0	k_3	4,24	robni pogoji na dnu	prepustno

Pod nasipom so bile vgrajene vertikalne drenaže. Tako izmerjen časovni potek konsolidacije za nas ni prišel v poštev. Tu smo lahko primerjali le velikost končnega posedka.

$\rho_m = 150$ cm ... posedek dobljen z meritvami

$\rho_i = 146$ cm ... posedek izračunan z programom AJDA

Razlika posedkov tako znaša $\Delta\rho = 4$ cm, kar je v primerjavi s posedkom, dobljenim iz meritev, 2,7 %. Na podlagi tega zaključimo, da je izračun posedkov s programom AJDA primerljiv z meritvami.

8.5 Primerjava računov posedkov s konstantnimi in nelinearnimi parametri

Primerjavo med posedki računanimi s konstantnimi parametri in posedki računanimi z nelinearnimi parametri smo naredili na primeru gline iz Luke Koper, za dve različni debelini sloja. Posedke smo s konstantnimi parametri računali na tri načine, preko programa AJDA, "peš" in s programom VKONS (Majes, 1998).

Materialne parametre za nelinearno analizo smo dobili na podlagi poročil o geomehanskih laboratorijskih preiskavah. Za vrednosti λ , κ , e_o in σ_p smo vzeli povprečne vrednosti vseh primerljivih preiskav: $\lambda = 0,164$, $\kappa = 0,048$, $e_o = 1,383$ in $\sigma_p = 36,2$ kPa. Za funkcijo $k(e)$ smo vzeli enačbo 21.

8.5.1 Račun posedkov s konstantnimi parametri s "peš" računom

8.5.1.1 Spodnji in zgornji rob sta prepustna

Debelini slojev sta 12 m in 20 m:

Vrednosti k in E_{oed} smo računali na sredini stisljivega sloja. γ smo odčitali iz tabele v poročilu na približno 6 m in 10 m:

$$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3.$$

Začetne efektivne napetosti so:

$$12 \text{ m: } \sigma'_{z\alpha} = 6 \text{ m} \cdot 17 \text{ kN/m}^3 - 6 \text{ m} \cdot 10 \text{ kN/m}^3 = 42 \text{ kN/m}^2 \text{ (kPa)}$$

$$20 \text{ m: } \sigma'_{z\alpha} = 70 \text{ kN/m}^2 \text{ (kPa)}.$$

Po obremenitvi temeljnih tal z obtežbo $\Delta\sigma'_{zz} = \Delta\sigma_{zz} = 80$ kPa in končani konsolidaciji bodo efektivne napetosti enake:

$$12 \text{ m: } \sigma'_{zz\beta} = \sigma'_{zz\alpha} + \Delta\sigma'_{zz} = 122 \text{ kPa}$$

$$20 \text{ m: } \sigma'_{zz\beta} = 150 \text{ kPa.}$$

Izračunamo k:

Vzamemo enačbi $e = e(\sigma'_i) \rightarrow e \rightarrow k = k(e)$, ki smo ju določili na podlagi eksperimentov.

$$12 \text{ m: } k = 2,3 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(4,0 \cdot (-0,164 \cdot \ln 122 + 1,792)) = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

$$20 \text{ m: } k = 1,11 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$$

Izračunamo E_{oed} :

$$12 \text{ m: } e_{\beta} = -0,164 \cdot \ln 122 + 1,792 = 1,004$$

$$e_{\alpha} = -0,164 \cdot \ln 42 + 1,792 = 1,179$$

$$\Delta e = e_{\beta} - e_{\alpha} = -0,175$$

$$E_{oed} = -\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta e} (1 + e_{\alpha}) = 996 \text{ kPa}$$

$$20 \text{ m: } e_{\beta} = 0,970$$

$$e_{\alpha} = 1,095$$

$$\Delta e = -0,125$$

$$E_{oed} = -\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta e} (1 + e_{\alpha}) = 1340,8 \text{ kPa}$$

Račun končnega posedka:

$$12 \text{ m: } \rho_{\infty} = \frac{A_{\infty}}{E_{oed}} = \frac{80 \text{ kPa} \cdot 12 \text{ m}}{996 \text{ kPa}} = 0,96 \text{ m}$$

$$20 \text{ m: } \rho_{\infty} = 1,19 \text{ m}$$

Račun časa končane konsolidacije:

$$12 \text{ m: } T_v = \frac{k \cdot E_{oed} \cdot t}{\gamma_w \cdot h^2} = 2 \rightarrow t_{\infty} = \frac{2 \cdot \gamma_w \cdot h^2}{k \cdot E_{oed}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 6^2}{1,3 \cdot 10^{-10} \cdot 996} = 176,33 \text{ let}$$

$$20 \text{ m: } t_{\infty} = 426,12 \text{ let}$$

8.5.1.2 Spodnji rob je neprepusten in zgornji prepusten

Račun vseh karakteristik je identičen zgornjemu računu, le čas končane konsolidacije se določi drugače:

$$12 \text{ m: } t_{\infty} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 12^2}{1,3 \cdot 10^{-10} \cdot 996} = 705,32 \text{ let}$$

$$20 \text{ m: } t_{\infty} = 1704,49 \text{ let.}$$

8.5.2 Rezultati

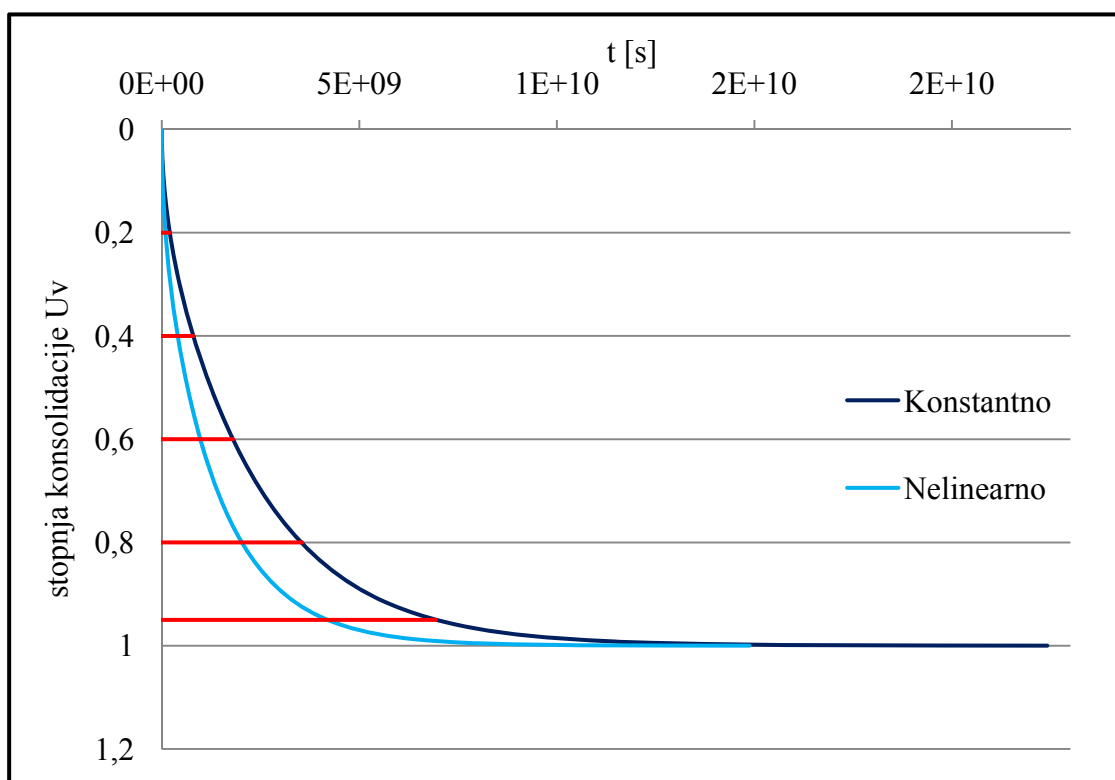
8.5.2.1 Spodnji in zgornji rob sta prepustna

Preglednica 17: Primerjava velikosti posedkov in časa končane konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in spodnji rob

		posedek ρ [m]	čas dosežene 99,42% konsolidacije [let]	povprečni k [m/s]	povprečni E_{oed} [kPa]
12 m	konst. preko faktorja T_v	0,96	176,33	1,30E-10	996
	AJDA – konst.	0,92	152,25	1,30E-10	996
	VKONS	0,96	$\approx 285,4$	1,30E-10	996
	AJDA – neline.	0,90	95,89	1,43E-10	1545
20 m	konst. preko faktorja T_v	1,19	426,12	1,11E-10	1341
	AJDA – konst.	1,15	386,97	1,11E-10	1341
	VKONS	1,18	$\approx 742,0$	1,11E-10	1341
	AJDA – neline.	1,22	258,41	1,26E-10	1916

Preglednica 18: Primerjava časov konsolidacije pri različnih U_v , računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in spodnji rob

		20 m slo, zgoraj in spodaj prepustno					
		U_v	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
konst.	t [s]		2,04E+08	8,00E+08	1,80E+09	3,56E+09	6,94E+09
	normiran t		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
neline.	t [s]		9,40E+07	4,06E+08	9,85E+08	2,04E+09	4,23E+09
	normiran t		0,46	0,51	0,55	0,57	0,61



Grafikon 19: Primerjava časovnih potekov konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in spodnji rob

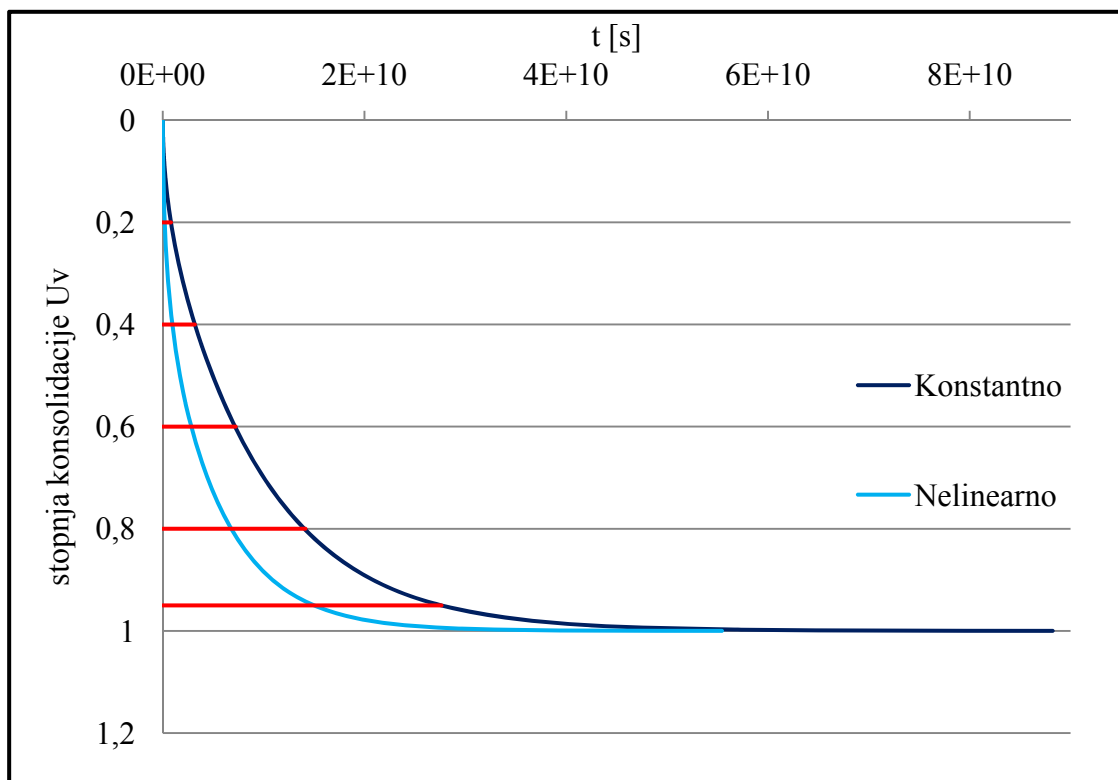
8.5.2.2 Spodnji rob je neprepusten in zgornji prepusten

Preglednica 19: Primerjava velikosti posedkov in časa končane konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in neprepusten spodnji rob

		posedek ρ [m]	čas dosežene 99,42% konsolidacije [let]	povprečni k [m/s]	povprečni E_{oed} [kPa]
12 m	konst. preko faktorja T_v	0,96	705,32	1,30E-10	996
	AJDA – konst.	0,92	605,48	1,30E-10	996
	VKONS	0,96	$\approx 1522,1$	1,30E-10	996
	AJDA – neline.	0,91	363,56	1,43E-10	1546
20 m	konst. preko faktorja T_v	1,19	1704,49	1,11E-10	1341
	AJDA – konst.	1,15	1536,29	1,11E-10	1341
	VKONS	1,18	$\approx 9195,8$	1,11E-10	1341
	AJDA – neline.	1,22	978,19	1,26E-10	1919

Preglednica 20: Primerjava časov konsolidacije pri različnih U_v računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in neprepusten spodnji rob

		20 m slo, zgoraj prepustno, spodaj neprepustno					
		U_v	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
konst.	t [s]	8,09E+08	3,18E+09	7,22E+09	1,41E+10	2,76E+10	
	normiran t	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
neline.	t [s]	1,85E+08	9,43E+08	2,84E+09	6,80E+09	1,50E+10	
	normiran t	0,23	0,30	0,39	0,48	0,54	



Grafikon 20: Primerjava časovnih potekov konsolidacije računanih s konstantnimi in nelinearnimi parametri za prepusten zgornji in neprepusten spodnji rob

8.5.3 Komentar

Posedek se z uporabo različnih metod računanja s konstantnimi parametri nekoliko spreminja. To je predvsem posledica geometrijske nelinearnosti, saj se sloj med konsolidacijo krči, kar pri računu s programom AJDA upoštevamo, pri "peš" računu pa ne.

Tudi posedki, računani z nelinearnimi parametri, nekoliko odstopajo od tistih, računanih s konstantnimi parametri, vendar smo to pričakovali, saj gre za dve različni metodi računanja.

Drugače je pri času končne konsolidacije. Tu so razlike kar velike. V povprečju je čas konsolidacije izračunan z nelinearnimi parametri za polovico manjši od tistega izračunanega s konstantnimi parametri. To je posledica večjega povprečnega edometrijskega modula pri računu z nelinearnimi parametri v programu AJDA, ki sledi spreminjanju efektivnih napetosti in količnika por po globini.

ZAKLJUČEK

Pravilnost računanja programa AJDA smo najprej potrdili s primerjavo rezultatov programov CONDES0 in AJDA, tako da smo pri obeh računali s hiperboličnim modelom in potenčno zvezo $k(e)$.

Nato smo pri simulaciji edometra ugotovili, da se krivulje stisljivosti, dobljene s programom AJDA, z ustreznim prekonsolidacijskim tlakom in ustreznim določanjem razbremenilne konstante κ , skoraj popolnoma prekrijejo s krivuljami dobljenimi v programu CONDES0. Po pričakovanjih obe skupini krivulj pri prvi bremenski stopnji nekoliko odstopata od krivulj, ki jih dobimo z edometriško preiskavo. Pri višjih bremenskih stopnjah se vse krivulje ponovno ujamejo. To dejstvo tudi nekoliko potrди teorijo o začetni imperfektnosti pri edometriški preiskavi.

Pri primerjavi rezultatov programa AJDA z meritvami pod poskusnim nasipom na Ljubljanskem barju, smo na podlagi 2,7 % medsebojnega odstopanja posedkov prišli do zaključka, da je izračun posedkov s programom AJDA primerljiv z meritvami.

Iz zgoraj navedenih ugotovitev smo zaključili, da nam program AJDA daje dovolj dobre rezultate, da z njimi preverimo razlike izračunanih parametrov, če predpostavimo konstanten oz. nelinearen potek karakteristik stisljivosti zemljine po globini, kar je tudi namen te diplomske naloge.

Ugotovili smo, da se posedek z uporabo različnih metod računanja (s konstantnimi in nelinearnimi parametri) ne spreminja veliko. Spreminja se predvsem čas končane konsolidacije. V povprečju je ta izračunan z nelinearnimi parametri za kar polovico manjši od konsolidacijskega časa izračunanega s konstantnimi parametri. Zaključili smo, da je takšen rezultat posledica večjega povprečnega edometriškega modula pri računu z nelinearnimi parametri v Matlabu, ki sledi spreminjanju efektivnih napetosti in količniku por po globini.

VIRI

Atkinson, J. 2007. The mechanics of soils and foundations, Second edition. New York, Taylor & Francis: 442 str.

Davison, L. 2001. Compression and swelling. Bristol, University of the West of England. <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/> (20.12.2007)

Davison, L. 2001. Soil description and classification. Bristol, University of the West of England.

<http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/> (20.12.2007)

Head, K., H. 1994. Manual of soil laboratory testing, Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, Second Edition. New York, John Wiley & Sons, Inc.: str. 268-332.

Holtz, R., Kovacs, W. 1981. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall: 733 str.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pycnometer> (31.1.2008)

Laboratorijske vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <http://www.fgg.uni-lj.si/KMTal/GR-UNI/MT/MT-vaje.htm> (21.7.2007)

Laboratory Exercise 6-7: Consolidation Test. Department of Civil Engineering, Soil Mechanics Laboratory, University of Washington.

<http://www.ce.washington.edu/~geotech/courses/cee366/arduino/cee366.html> (16.9.2007)

Logar, J. 1998. Uporabnost različnih konstitutivnih modelov v analizi konsolidacije tal. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 263 str.

Maček, M., Merc, M., Selan, V., Petkovšek, A., Majes, B. 2007. 1. delno poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah zemljin z lokacije Luka Koper-Pomol 2, Številka poročila L-01-07. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Maček, M., Merc, M., Selan, V., Petkovšek, A., Majes, B. 2007. 2. delno poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah zemljin z lokacije Luka Koper-Pomol 2, Številka poročila L-01-07. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Majes, B. Skripta pri predmetu Mehanika tal. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

<http://www.fgg.uni-lj.si/KMTal/GR-UNI/MT/MTAL%20-%20skripta.htm> (21.7.2007)

Majes, B. Program VKONS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Program Matlab.

Petkovšek, A., Maček, M., Merc, M., Majes, B. 2007. Poročilo o laboratorijskih raziskavah zemljin iz vrtin na lokaciji »Obvoznica Škofljica, Številka poročila: L-35-07. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Reddi, N., L. 2003. Seepage in soils, principles and applications. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.: str. 11-58.

Sheppard, D., M. Consolidation and Settlement in Clay. Civil and Coastal Engineering Department, Coastal Engineering Program, University of Florida.

<http://users.coastal.ufl.edu/~sheppard/eoc6430.htm> (16.9.2007)

Šuklje, L. 1984. Mehanika tal. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 359 str.

Yao, T., Znidarcic, D. 1997. Computer Program CONDES0. Boulder, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado.

Yao, T., Znidarcic, D. 1997. User's Manual for Computer Program CONDES0. University of Colorado, Boulder, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering. 115 str.