

# Utjecaj bubrenja bentonitne gline na njezina mehanička svojstva

---

**Domitrović, Dubravko**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2012**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:033393>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Dubravko Domitrović

**UTJECAJ BUBRENJA BENTONITNE  
GLINE NA NJEZINA MEHANIČKA  
SVOJSTVA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012.



UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF MINING, GEOLOGY  
AND PETROLEUM ENGINEERING

Dubravko Domitrović

**THE IMPACT OF SWELLING  
BEHAVIOUR OF BENTONITE ON ITS  
MECHANICAL PROPERTIES**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2012



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Dubravko Domitrović

**UTJECAJ BUBRENJA BENTONITNE  
GLINE NA NJEZINA MEHANIČKA  
SVOJSTVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

Zagreb, 2012.

*Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.*

*Mentorica: prof.dr.sc. Biljana Kovačević Zelić*

*U sklopu znanstvenog projekta:*

*„Ispitivanje trajnosti mineralnih brtvenih barijera“, uz potporu Ministarstva, znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske,*

*projekt br. 195-0831529-1847, voditeljica projekta: prof. dr. sc. Biljana Kovačević-Zelić.*

Doktorski rad sadrži: 148 stranica teksta, 92 slike i 32 tablice.

## *Zahvale*

*Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Biljani Kovačević Zelić na pomoći i brojnim sugestijama koje su znatno doprinijele poboljšanju ovog rada. Najljepša hvala na podršci i potpori tijekom svih ovih godina.*

*Članovima povjerenstva, profesoru Predragu Kvasnički, profesoru Goranu Durnu, profesorici Tatjani Rukavini i naslovnom docentu Borisu Kavuru najljepše zahvaljujem na uloženom vremenu i trudu te korisnim dopunama i savjetima.*

*Osobitu zahvalnost dugujem dragim kolegama i prijateljima Robertu Belanu, dipl. ing. rud., doc. dr. sc. Želimiru Veinoviću, Heleni Strgar, dipl. ing. rud., Karolini Gradiški, mag. ing. rud. i Danijeli Kosić, dipl. ing. rud. Hvala na prijateljstvu, pomoći, potpori.*

*Kolegi Tomislavu Ciglenečkom, mag. ing. rud. zahvaljujem na tehničkoj pomoći pruženoj tijekom izrade rada.*

*Tvrtki Dracomerx zahvaljujem na doniranim uzorcima bentonitne gline bez kojih ovo istraživanje ne bi moglo biti obavljeno. Firmi Geokon-Zagreb zahvaljujem na provedenim ispitivanjima. Hvala prof. dr. sc. Darku Tibljašu na provedenoj analizi mineralnog sastava bentonitne gline kao i dr. sc. Michaeli Hruškovej na pruženoj pomoći tijekom ispitivanja bentonitne gline.*

*Hvala kolegama i članovima Zavoda za rudarstvo i geotehniku koji su mi pomagali i podržavali me tijekom svih ovih godina.*

*I na kraju hvala obitelji, posebno majci, na pokazanom beskrajnom strpljenju.*

## SAŽETAK

Glinene geosintetičke barijere su tvornički proizvedene hidrauličke barijere, koje se sastoje od mineralne i geosintetičke komponente. Mineralna komponenta najčešće je bentonitna glina, koja pripada skupini bubrivih tala. Tijekom procesa bubrenja dolazi do promjene njenih mehaničkih svojstava.

Svrha je ovog istraživanja utvrditi utjecaj bubrenja na mehanička svojstva bentonitne gline. Za istraživanja je odabrana Volclay bentonitna glina u granulama, mineraloškog sastava: montmorillonit 80-85%, kristobalit oko 5%, kvarc oko 5%, plagioklasi 5%. Indeksni pokazatelji bentonitne gline iznosili su: granica tečenja 437,0%, granica plastičnosti 52,86%, specifična površina 700 m<sup>2</sup>/g i kapacitet ionske izmjene 88,63+/-6,51 meq/100g. Povezanost bubrenja i promjene vlažnosti s promjenama posmične čvrstoće i parametara posmične čvrstoće istraživana je u uređaju za izravni posmik. Pri tome su u serijama ispitivanja, kod različitih normalnih napreznja (50, 100 i 200 kPa) mijenjana vremena hidratacije (7, 14 i 21 dan) simulirajući različite stupnjeve bubrenja bentonitne gline. Dugotrajnim pokusima bubrenja u edometru pri različitim normalnim napreznjima (50, 100 i 200 kPa) definirana je krivulja bubrenja bentonitne gline. Povezanost bubrenja s konsolidacijskim i hidrauličkim svojstvima istraživana je u edometru i troosnom uređaju. Za usporedbu konsolidacijskog ponašanja bentonitne gline pri različitim vrstama opterećenja, osim u edometru, konsolidacijska svojstva ispitana su i u uređaju za troosni posmik pri izotropnoj kompresiji. Ispitivanja hidrauličkih svojstava provedena su u troosnom uređaju pri različitim srednjim vrijednostima efektivnih napreznja (42,5; 92,5; 193,6 i 291,0 kPa) u uvjetima potpune zasićenosti uzorka.

Pokusi bubrenja pokazali su da je bubrenje bentonitne gline dugotrajan proces. Završetak primarnog bubrenja postiže se nakon 31 dana neovisno o intenzitetu normalnog napreznja. Nakon završetka primarnog bubrenja nastupila je faza sekundarne kompresije. Ispitivanja čvrstoće pokazuju da dolazi do smanjenja kohezije s produljenjem hidratacije bentonitne gline. Kut trenja se hidratacijom (od 7 do 14 dana) povećava. Produljenjem hidratacije nakon 14 dana nema značajnije promjene vrijednosti kuta trenja. Na krivulji odnosa završne vlažnosti i posmične čvrstoće vidljiva je promjena nagiba krivulje kod raspona završnih vlažnosti od 60 do 90%. Navedeno odgovara postojećim spoznajama o promjeni nagiba karakteristične krivulje retencije vode kod usisnih napreznja od 0,4 do 1 MPa. Navedeni odnosi prezentirani su u svjetlu pretpostavljenih promjena u mikrostrukturi bentonitne gline tijekom bubrenja odnosno pojavom dvostrukih difuznih slojeva.

**Ključne riječi:** Bentonitne glina, bubrenje, posmična čvrstoća, koeficijent hidrauličke propusnosti, koeficijent konsolidacije



## SUMMARY

Clay geosynthetic barriers are manufactured hydraulic barriers consisting of mineral and geosynthetic components. The mineral component is usually bentonite clay which belongs to the group of swelling soils. During the swelling process properties of clay are changing.

The purpose of this study is to determine correlation between mechanical properties of the bentonite clay and its swelling behavior. The research was conducted on the granular bentonite clay Volclay. X-ray powder diffraction showed that the bentonite clay contains 80-85% of montmorillonite, ~5% of cristobalite, ~5% of quartz and ~5% of plagioclase. Bentonite clay properties were as follows: liquid limit 437.0%, plastic limit 52.86%, specific surface area 700 m<sup>2</sup>/g and CEC 88.63+/-6.51 meq/100g. The influence of swelling on the bentonite clay shear strength was studied in the direct shear device. During this process, hydration times were changed in a series of tests at different normal stresses (50, 100 and 200 kPa; 7, 14 and 21 days) simulating bentonite clay swelling. The swelling curves of bentonite clay were defined by the long-term oedometer tests at different normal stresses (50, 100 and 200 kPa). The impact of swelling on the bentonite clay consolidation and hydraulic properties were studied in oedometer device and triaxial device under isotropic compression conditions. Bentonite clay hydraulic properties were studied in triaxial device under different mean values of effective stress (42.5; 92.5; 193.6 and 291.0 kPa) in saturated conditions. Demineralized water was used as the test fluid.

Swelling tests showed that the bentonite clay swelling is a long-term process. Completion of the primary swelling phase is reached after 31 days regardless of the intensity of the normal stress. After completion of the primary phase, secondary compression phase started. Shear tests show a significant reduction in cohesion with the extension of the hydration of bentonite clay. Friction angle with hydration (from 7 to 14 days) increases. There is no significant change in the value of the friction angle by extending hydration after 14 days. On the final water content-shear strength curves in the semi-log diagram, the inclination of the curves decreases with final water content decrease. Change in curve inclination is noticeable in the final water content decrease range from 60 to 90%. This corresponds to the bentonite clay water retention characteristic curves inclination changes under suction stresses from 0.4 to 1 MPa. The shear strength properties during swelling process are linked to the bentonite clay microstructure features, and diffuse double-layer appearance.

**Keywords:** Bentonite clay, swelling, shear strength, coefficient of permeability, coefficient of consolidation

## SADRŽAJ

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
1.1	Cilj istraživanja .....	3
1.2	Struktura rada .....	4
<b>2</b>	<b>Bentonitna glina.....</b>	<b>6</b>
2.1	Općenito o bentonitnim glinama .....	6
2.1.1	Minerali glina .....	6
2.1.2	Montmorillonit .....	9
2.1.3	Pojavnost bubrenja .....	13
2.2	Primjena bentonitnih glina .....	18
2.3	Mehanička svojstva bentonitnih glina.....	22
2.3.1	Posmična čvrstoća glinenih geosintetičkih barijera .....	22
2.3.1.1	Utjecaj normalnih naprezanja na rezultate ispitivanja.....	28
2.3.1.2	Utjecaj armature glinene geosintetičke barijere na rezultate ispitivanja 31	
2.3.1.3	Utjecaj brzine posmika na posmičnu čvrstoću glinenih geosintetičkih barijera	33
2.3.1.4	Utjecaj uvjeta hidratacije i vrste ispitne tekućine na posmičnu čvrstoću glinenih geosintetičkih barijera .....	34
2.3.2	Hidraulička provodljivost i kompatibilnost bentonitnih glina .....	38
2.3.3	Konsolidacijske karakteristike bentonitne gline .....	54
<b>3</b>	<b>Karakterizacija bentonitne gline .....</b>	<b>73</b>
3.1	Mineraloška svojstva bentonitne gline .....	73
3.1.1	Mineraloški sastav .....	73
3.1.1.1	Pregled literature o ispitivanjima mineraloškog sastava Wyoming bentonitne gline .....	73

---

3.1.1.2 Ispitivanja mineraloškog sastava provedena na uzorcima bentonitne gline	74
3.1.2 Kemijski sastav bentonitne gline.....	76
3.1.2.1 Pregled literature o ispitivanjima kemijskog sastava Wyoming bentonitne gline .....	76
3.1.2.2 Ispitivanja kemijskog sastava provedena na uzorcima bentonitne gline	77
3.1.3 Sposobnost ionske izmjene i ukupne površine bentonitne gline.....	79
3.2 Fizikalna svojstva bentonitne gline .....	80
3.2.1 Granulometrijski sastav granula.....	80
3.2.2 Gustoća čvrstih čestica .....	81
3.3 Indeksna svojstva bentonitne gline .....	83
3.3.1 Granica plastičnosti i granica tečenja.....	83
3.3.2 Indeks slobodnog bubrenja.....	86
3.3.3 Sposobnost upijanja vode.....	86
3.3.4 Indeks gubitka fluida.....	88
3.4 Zaključak.....	89
<b>4 Mjerenje hidrauličke provodljivosti bentonitne gline u troosnoj ćeliji.....</b>	<b>90</b>
4.1 Program ispitivanja .....	90
4.2 Koeficijent izotropne konsolidacije .....	94
4.3 Mjerenje koeficijenta hidrauličke provodljivosti .....	97
<b>5 1D konsolidacija i bubrenje bentonitne gline .....</b>	<b>101</b>
5.1 Program ispitivanja .....	101
5.2 Ispitivanja bubrivosti.....	103
5.3 Ispitivanja 1-D konsolidacije .....	107
<b>6 Mjerenje posmične čvrstoće bentonitne gline.....</b>	<b>117</b>
6.1 Program ispitivanja .....	118

6.2	Odnosi naprezanja i deformacija.....	120
6.3	Ovisnost čvrstoće o postupku hidratacije.....	129
<b>7</b>	<b>Diskusija rezultata.....</b>	<b>136</b>
<b>8</b>	<b>Zaključci.....</b>	<b>145</b>
<b>9</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>149</b>

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

KAZALO OZNAKA

KAZALO KRATICA

ŽIVOTOPIS

## 1 UVOD

Upotreba proizvoda od sintetičkih materijala izazvala je veliku revoluciju u graditeljstvu. Danas se glinene geosintetičke barijere (eng.: *Clay Geosynthetic Barrier*, skraćeno *GBR-C* ili *Geosynthetic Clay Liner*, skraćeno *GCL*) kao dio obitelji sintetičkih materijala intenzivno upotrebljavaju kao brtvene barijere ili komponente brtvenih barijera u širokoj lepezi inženjerskih aplikacija uključujući hidrotehničko i geotehničko inženjerstvo okoliša, transportno inženjerstvo i geotehnologiju zaštite okoliša (Guyonnet et al. 2009; Kang i Shackelford 2010; Rosin-Paumier et al. 2010; Shackelford et al. 2010). Dobro su prepoznat proizvod zbog prednosti nad klasičnom izvedbom glinovitih brtvenih sustava. Proizvodnja u kontroliranim uvjetima, manja osjetljivost na slijeganja i deformacije, dostupnost, jednostavnija ugradnja čine projektna rješenja jednakovrijednim ili boljim.

Glinene geosintetičke barijere su umjetno proizvedene hidrauličke barijere. Sastoje se od približno 5 mm tankog sloja bentonitne gline koja se nalazi između dva sloja geotekstila a u nekim slučajevima uz geotekstil dolazi i polimerna geosintetička barijera (eng.: *Polymeric Geosynthetic Barrier*, skraćeno *GBR-P*). Pri tome je bentonitna glina nepropusna komponenta (Koerner 1996, Shackelford et al. 2000, Bouazza 2002, Katsumi et al. 2008) dok su slojevi geotekstila nosiva komponenta (osim u slučaju kombinacije s polimernom geosintetičkom barijerom). Slojevi geotekstila se najčešće armiraju prošivenim ili protkanim tekstilnim nitima a upotrebljavaju se još i nearmirane glinene geosintetičke barijere međutim njihova upotreba je ograničena na ravne podloge i kosine manjih nagiba. Kao takve predstavljaju slabopropusnu barijeru niske hidrauličke provodljivosti i jednostavne ugradnje s mnoštvom različitih primjena.

Bentonitna glina kao mineralna komponenta glinene geosintetičke barijere osigurava nisku hidrauličku provodljivost. Glavni mehanizam kojim se osigurava vrlo niska hidraulička i plinska provodljivost odnosno uloga brtvene komponente je svojstvo bubrenja. Bentonitne gline pripadaju skupini bubrivih tala. Uzrok bubrivosti leži u činjenici da su glavni sastojak bentonitnih gline minerali glina smektitne skupine pri čemu se dominantno pojavljuje mineral montmorillonit. Jedinični naboj i koloidalna veličina čestica imaju za posljedicu da ova skupina minerala ima veliki afinitet prema molekulama vode. Rado ih vežu pa tako mogu i višestruko povećati svoj volumen što ima značajnu ulogu na mehanička svojstva uključujući čvrstoću, deformabilnost i hidrauličku provodljivost bentonitnih gline. Niskoj hidrauličkoj provodljivosti bentonitne gline doprinosi povećanje sadržaja montmorillonita, specifične

površine (smanjenje veličine čestica), deficita površinskog naboja, te sadržaj natrija ( $\text{Na}^+$ ) u sustavu izmjene (Guyonnet et al. 2009). Utjecaji ovih faktora na kvalitetu bentonitne gline uglavnom su uočljivi makroskopski kroz povećanje kapaciteta ionske izmjene, povećanje plastičnosti, povećanje kapaciteta bubrenja u prisustvu tekućine i smanjenju hidrauličke provodljivosti. Ovdje treba istaknuti natrijske bentonitne gline zbog vrlo male hidrauličke provodljivosti i velikog kapaciteta bubrenja.

Upotreba glinene geosintetičke barijere u širokoj lepezi različitih inženjerskih aplikacija ima za posljedicu i različite uvijete upotrebe. Pri tome se mijenjaju parametri koji utječu na samo funkcioniranje glinene geosintetičke barijere. Preporuke GRI-GCL5 (2011) navode dva važna parametra (veličinu normalnih napreznja i vrijednost hidrauličkih gradijenta) pri različitim inženjerskim aplikacijama. Veličina normalnih napreznja uobičajeno se kreću od 10 kPa prilikom ugradnje glinene geosintetičke barijere u pokrovne brtvene slojeve odlagališta otpada pa i do 1000 kPa u temeljnim brtvenim slojevima odlagališta otpada. Pretpostavljeni hidraulički gradijenti najčešće su manji od 50 prilikom ugradnje u pokrovne brtvene slojeve odlagališta otpada, u brtvene slojeve cesta željezničkih pruga, zrakoplovnih luka te u brtvene slojeve odlagališta pepela i jalovišta. Ekstremne vrijednosti hidrauličkih gradijenata ( $> 1000$ ) mogu se pojaviti prilikom upotrebe u brtvenim slojevima taložnih bazena, akumulacija a ponekad i u slučaju ugradnje u temeljne brtvene slojeve odlagališta otpada.

Kod odabira najpovoljnijeg projektnog rješenja brtvenih sustava, jedan od važnih segmenata je i pitanje stabilnosti. Pri procjeni stabilnosti od presudnog je značaja poznavanje posmične čvrstoće kako pojedinih komponenti zaštitnog sustava slojeva tako i njihovog međusobnog kontakta. Prilikom upotrebe glinenih geosintetičkih barijera sa stajališta njihove čvrstoće potrebno je obratiti pažnju na kontaktnu i unutarnju posmičnu čvrstoću. Pod pojmom kontaktne posmične čvrstoće smatra se čvrstoća koja se ostvaruje na kontaktu glinene geosintetičke barijere s drugim susjednim materijalima, bilo da je riječ o tlama ili drugim geosinteticima. Unutarnja posmična čvrstoća razlikuje se kod armiranih i nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera. Unutarnja posmična čvrstoća armiranih glinenih geosintetičkih barijera ovisi o čvrstoći komponenata: vlačnoj čvrstoći armaturnih niti i posmičnoj čvrstoći bentonitne gline. Hidratizirana bentonitna glina ima vrlo male vrijednosti posmične čvrstoće te će u tom slučaju njezin utjecaj na unutarnju posmičnu čvrstoću biti umanjen. Unutarnja posmična čvrstoća nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera može se poistovjetiti s posmičnom čvrstoćom bentonitne gline (Gilbert et al. 1996).

## 1.1 Cilj istraživanja

Pregledom literaturnih podataka utvrđeno je da mehanička svojstva glinene geosintetičke barijere kao kompozita mineralne i geosintetičke komponente ovise o svojstvima tih komponenti, no doprinos svake od njih nije detaljno razjašnjen. Glinene geosintetičke barijere koriste se kao hidrauličke barijere u raznim inženjerskim zahvatima, pri čemu je za njih najvažnije svojstvo vodonepropusnosti, koju osigurava uglavnom mineralna komponenta odnosno bentonitna glina. Bentonitna glina kao brtvena komponenta glinene geosintetičke barijere nalazi se u obliku granula ili praha, te je prilikom ugradnje uglavnom tvorničke vlažnosti (oko 12%). Da bi se osigurala nepropusnost bentonitne gline poželjno je da ona barem djelomično hidratizira nakon ugradnje. Kod ugradnje glinenih geosintetičkih barijera primjerice u odlagališta otpada hidratacija je obično posljedica kontakta s vlagom podinskih i krovinskih slojeva te djelovanja vlage iz atmosfere pri čemu sam proces hidratacije odnosno bubrenja značajno utječe na njena svojstva.

Predloženim istraživanjem željelo se kvantificirati djelovanje bentonitne gline unutar glinene geosintetičke barijere. Cilj ovog istraživanja bio je povezati bubrivost, čvrstoću, konsolidacijska i hidraulička svojstva bentonitne gline. Naime, na temelju hipoteze da dosadašnja istraživanja ukazuju na mogućnost međusobne korelacije pojedinih fizikalno-mehaničkih svojstava bentonitne gline i mineraloško-kemijskog sastava pretpostavilo se da je moguće multidisciplinarnim istraživanjem bentonitne gline definirati povezanost mehaničkih svojstava o pojavi bubrenja za jednu vrstu bentonitne gline. Na temelju dobivenih rezultata izvedeni su zaključci o ponašanju bentonitne gline tijekom promjena vlažnosti u različitim uvjetima opterećenja.

Da bi se kvantificiralo djelovanje bentonitne gline unutar glinene geosintetičke barijere provedena su detaljna laboratorijska istraživanja na uzorcima granulirane bentonitne gline. Povezanost bubrenja i promjene vlažnosti s promjenama posmične čvrstoće i parametara posmične čvrstoće istraživana je u uređaju za izravni posmik. Pri tome su u serijama ispitivanja, kod različitih efektivnih naprezanja, mijenjana vremena hidratacije ovisno o rezultatima edometarskih pokusa simulirajući različite stupnjeve bubrenja bentonitne gline.

Dugotrajnim pokusima bubrenja bentonitne gline u edometru pri različitim efektivnim naprezanjima definirana je krivulja bubrenja bentonitne gline. Povezanost bubrenja s konsolidacijskim i hidrauličkim svojstvima bentonitne gline istraživana je u edometru i troosnom uređaju. Za usporedbu konsolidacijskog ponašanja bentonitne gline pri različitim



vrstama opterećenja, osim u edometru, konsolidacijska svojstva bentonitne gline ispitana su i u uređaju za troosni posmik pri izotropnoj kompresiji. Ispitivanja hidrauličkih svojstava bentonitne gline provedena su u uvjetima potpune zasićenosti uzorka.

Predloženo istraživanje provedeno je samo na jednoj vrsti materijala korištenjem demineralizirane vode kao ispitne tekućine. Posmična čvrstoća kao i ostala mehanička i fizikalna svojstva ovise o udjelu smektita kao bubrivog minerala. Zbog toga je provedena detaljna karakterizacija bentonitne gline određivanjem mineraloškog sastava rendgenskom difrakcijom na prahu, kemijskog sastava, sposobnosti ionske izmjene, granulometrijskog sastava granula, gustoće čvrstih čestica, granica plastičnosti, indeksa slobodnog bubrenja, sposobnosti adsorpcije vode i indeksa gubitka fluida.

Kako bi se opisao utjecaj bubrenja na posmičnu čvrstoću rezultati su analizirani i prezentirani pomoću nekoliko korelacijskih veza kao što su odnos vlažnosti bentonitne gline i posmične čvrstoće, odnos koeficijenta pora i posmične čvrstoće, odnos parametara posmične čvrstoće i duljine hidratacije, te vezom navedenih veličina s poznatom krivuljom usisnih naprezanja ovog tipa bentonitne gline. Navedeni odnosi prezentirani su u svjetlu pretpostavljenih promjena u mikrostrukтури bentonitne gline tijekom bubrenja. Dodatno su prikazani rezultati ispitivanja konsolidacijskih i hidrauličkih karakteristika bentonitne gline kroz odnos koeficijenta pora i koeficijenta konsolidacije te odnos koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti.

## 1.2 Struktura rada

Disertacija je podijeljena u osam poglavlja. U prvom poglavlju ukazuje se na problem bubrenja bentonitne gline kao komponente glinene geosintetičke barijere. Postavljena je temeljna hipoteza, definirana svrha i ciljevi istraživanja te opisana struktura doktorskog rada.

U drugom poglavlju opisana je temeljna struktura minerala glina, te struktura i svojstva montmorillonita, najčešćeg člana podgrupe dioktaedrijskih smektita. Navedeni su mogući mehanizmi međusobne interakcije čestica gline i vode te je istaknuto da zamjenjivi međuslojni kationi imaju najvažniju ulogu kod interakcije gline i vode. Bentonitne gline kao prirodni materijali neškodljivi za okoliš imaju široku primjenu pri čemu se sa stajališta upotrebe u svojstvu brtvenih barijera u različitim inženjerskim zahvatima posebno ističe upotreba u sklopu glinenih geosintetičkih barijera. Ukratko su opisana mehanička svojstva bentonitne gline kao komponente glinenih geosintetičkih barijera te prikazani literaturni

podaci o mjerenjima posmične čvrstoće, hidrauličkih i konsolidacijske svojstava glinenih geosintetičkih barijera.

U trećem poglavlju prezentirani su rezultati analize mineraloškog i kemijskog sastava, fizikalnih osobina te indeksnih pokazatelja bentonitne gline.

U četvrtom, petom i šestom poglavlju detaljno je opisan eksperimentalni program istraživanja. Opisani su postupci pripreme i ugradnje uzoraka bentonitne gline. U četvrtom poglavlju prezentirani su rezultati ispitivanja hidrauličkih svojstava bentonitne gline u uređaju za troosni posmik. Prikazane su vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti i koeficijenta konsolidacije uzorka bentonitne gline. U petom poglavlju prezentirani su rezultati bubrenja bentonitne gline provedeni u edometru. Prikazane su vrijednosti koeficijenta konsolidacije kao i dobivene teoretske vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti proračunate na temelju koeficijenata konsolidacije iz edometra. U šestom poglavlju prezentiran je utjecaj bubrenja bentonitne gline na njenu posmičnu čvrstoću. Prikazani su odnosi naprežanja i deformacija kao i ovisnost posmične čvrstoće o vlažnosti bentonitne gline te o duljini hidratacije.

U sedmom poglavlju prodiskutirani su i analizirani rezultati istraživanja. Rezultati su analizirani i prezentirani pomoću nekoliko korelacijskih veza kao što su odnos vlažnosti bentonitne gline i posmične čvrstoće, odnos koeficijenta pora i posmične čvrstoće, odnos parametara posmične čvrstoće i duljine hidratacije, te vezom navedenih veličina s krivuljom usisnih naprežanja ovog tipa bentonitne gline prema Marcial et al. (2002). Navedeni odnosi prezentirani su u svjetlu pretpostavljenih promjena u mikrostrukturi bentonitne gline tijekom bubrenja.

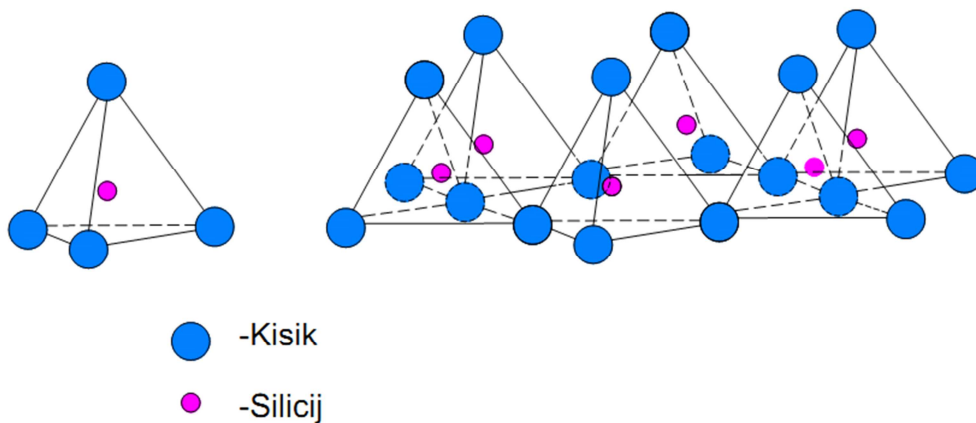
U osmom poglavlju dani zaključci kojima je dokazana hipoteza istraživanja.

## 2 BENTONITNA GLINA

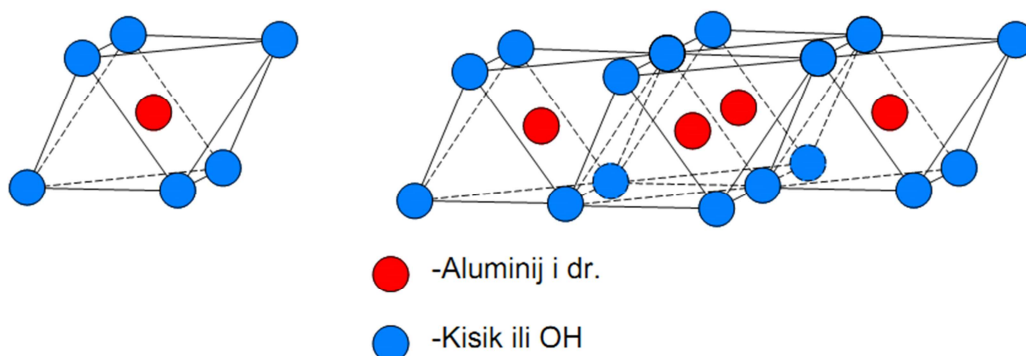
### 2.1 Općenito o bentonitnim glinama

#### 2.1.1 Minerali glina

Temeljna struktura svih minerala glina je složen paket sastavljen od mreže  $\text{SiO}_4$ -tetraedara (Slika 2-1) i mreže Al-oktaedara (Slika 2-2). U mreži  $\text{SiO}_4$ -tetraedara svaki silicij je okružen s četiri atoma kisika. Atom  $\text{Si}^{+4}$  može biti zamijenjen s  $\text{Al}^{+3}$  te rjeđe s  $\text{Fe}^{+3}$ . U mreži Al-oktaedara svaki atom aluminija je okružen sa šest pozicija na kojima se nalaze atomi  $\text{O}^{2-}$  ili ioni  $\text{OH}^-$ . Centralni kationi oktaedrijskih mreža, osim  $\text{Al}^{+3}$  mogu biti i  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  kao i ostali kationi kao  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ti}^{+4}$ ,  $\text{V}^{+3, +4, +5}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ . Mreže tetraedara i oktaedara su međusobno spojene preko  $\text{O}^{2-}$  i  $\text{OH}^-$ , koje mreže međusobno dijele. Dvije tetraedrijske mreže te jedna oktaedrijska mreža čini tromrežni sloj (sloj 2:1) dok kombinacija jedne tetraedrijske i jedne oktaedrijske mreže čini dvomrežni sloj (sloj 1:1).



Slika 2-1 Shematski prikaz  $\text{SiO}_4$ -tetraedar - lijevo i mreža  $\text{SiO}_4$ -tetraedara - desno (Murray 2007)



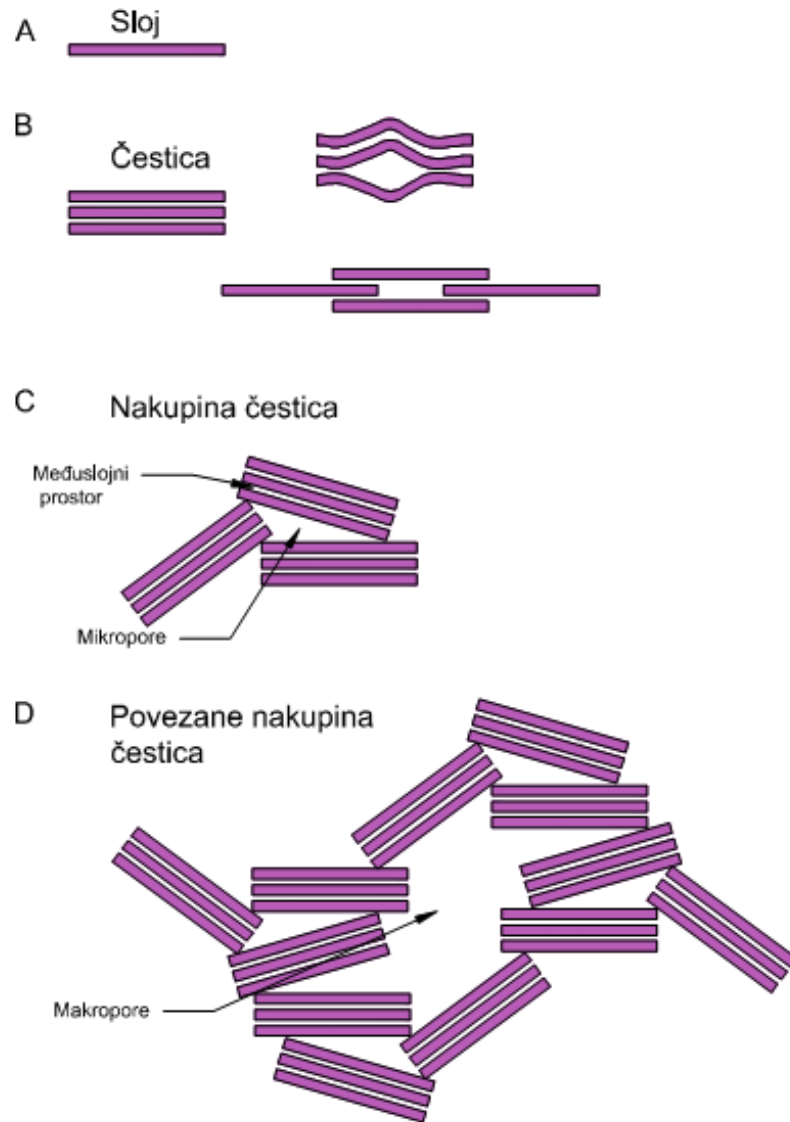
Slika 2-2 Shematski prikaz Al-oktaedra - lijevo i mreža Al-oktaedara - desno (Murray 2007)

Oktaedrijske mreže mogu biti s dva oktaedrijska kationa (oktaedra) po formulskoj jedinici, i takve filosilikate nazivamo dioktaedrijski filosilikati. U ovom slučaju trovalentni kationi (npr.  $\text{Al}^{+3}$ ) zauzimaju dvije od moguće tri oktaedrijske šupljine. Također možemo imati oktaedrijske mreže s tri oktaedrijska kationa na formulsku jedinicu a nazivamo ih trioktaedrijski filosilikati. U ovom slučaju dvovalentni kationi (npr.  $\text{Mg}^{+2}$ ) zauzimaju sve raspoložive oktaedrijske šupljine.

Minerali glina se klasificiraju u grupe obzirom na broj mreža i njihovu kristalnu strukturu u jediničnom paketu. Svaka grupa se dodatno dijeli u podgrupe prema kemijskom sastavu oktaedrijskih mreža, te dalje u pojedine vrste minerala glina.

Neadekvatne izmjene centralnih kationa u tetraedrima ( $\text{Si}^{+4}$  obično s  $\text{Al}^{+3}$ , rijetko s  $\text{Fe}^{+3}$  ili  $\text{Be}^{+2}$ ), izmjene dvovalentnih i trovalentnih kationa u oktaedrima s jednovalentnim ( $\text{Li}^{+}$ ) i dvovalentnim kationima, vakancijama (odsutnošću kationa) u oktaedrijskim pozicijama te dehidroksilacija  $\text{OH}^{-}$  u  $\text{O}^{2-}$ , uzrokuju pojavu naboja slojeva. Naboji slojeva bivaju neutralizirani različitim tvarima u međuslojnim prostorima i na rubovima čestica kao primjerice kationi, hidratizirani kationi, organske molekule i sl. Ova sposobnost daje mineralima glina sposobnost adsorpcije te ionske izmjene u međuslojnim prostorima i na površini čestica. Tablica 2-1 prikazuje neka od osnovnih svojstava minerala gline: vrstu međuslojne veze, sposobnost bubrenja, debljinu jediničnog paketa, specifičnu površinu čestica i sposobnost ionske izmjene (CEC – eng.: Cation Exchange Capacity).

Na slici 2-3 je na pojednostavljen način prikazano na koji način se jedinični slojevi minerala gline povezuju u čestice i nakupine čestica. Jedinični slojevi se međusobno povezuju i tvore jediničnu česticu. Prostori između jediničnih slojeva tvore međuslojne prostore. Čestice se zatim povezuju u nakupine čestica gdje prostori između čestica tvore mikropore. Daljnjim povezivanjem jediničnih nakupina čestica između njih nastaju makropore. Tako ukupni porni prostor tvore najmanje tri vrste pora: međuslojne pore, mikropore i makropore. Ukoliko se promatraju površine minerala glina, one mogu biti unutarnje i vanjske. Unutarnje se odnose na međuslojne prostore, a vanjske na siloksanske površine i bridove (Bargaya et al. 2006). Karakteristike navedenih mikro i makro razina značajno se razlikuju što je vidljivo primjerice kod hidratacije.



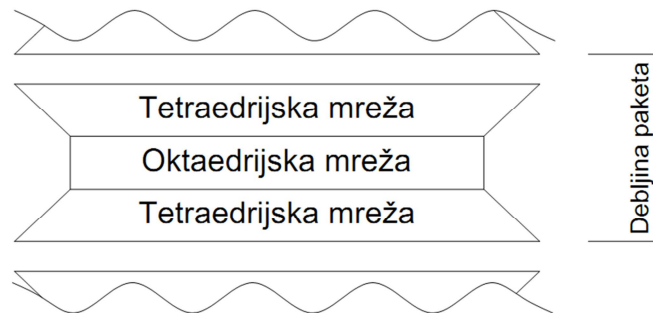
Slika 2-3 Struktura minerala glina a) jedinični sloj, b) čestice, c) nakupinu čestica s mikroporama, d) povezivanje nakupina čestica s makroporama (Bargaya et al. 2006)

Tablica 2-1 Osnovne karakteristike minerala glina (Mitchell & Soga 2005)

Mineral	Međuslojna veza	Bubrivost	Debljina paketa (nm)	Spec. površina (m <sup>2</sup> /g)	CEC (meq/100g)
Kaolinit	OH <sup>-</sup> (čvrsta)	NE	0,72	10-20	3-15
Montmorillonit	O <sup>-</sup> - O <sup>-</sup> (vrlo slaba)	DA	0,96	700-840	80-150
Illit	K <sup>+</sup> (čvrsta)	NE	1	65-100	10-40
Vermikulit	(slaba)	DA	1,05-1,4	870	100-150
Klorit	(čvrsta)	NE	1,4	-	10-40

### 2.1.2 Montmorillonit

Minerali iz grupe smektita spadaju među najčešće filosilikate s tromrežnom 2:1 građom sloja (Slika 2-4). Minerali ove grupe se tvore potpunom ili djelomičnom zamjenom  $Al^{+3}$  u oktaedrijskoj mreži i djelomičnom zamjenom  $Si^{+4}$  u tetraedrijskim mrežama. Zamjena  $Si^{+4}$  u tetraedrijskim mrežama je uglavnom ograničena do 15% i to s  $Al^{+3}$ .  $Al^{+3}$  u oktaedrijskoj mreži obično je zamijenjen različitim vrstama kationa kao  $Mg^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Li^{+}$  i sl. (Grim 1962).



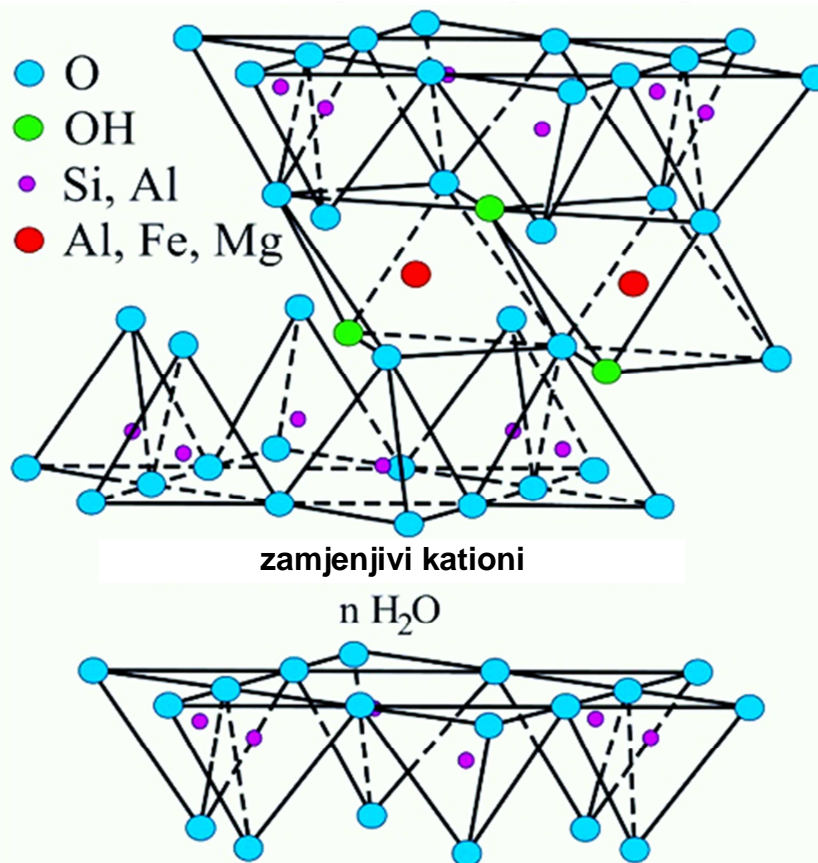
Slika 2-4 Tromrežna 2:1 struktura smektita

Montmorillonit je najčešći član podgrupe dioktaedrijskih smektita. Na svakih šest  $Al^{+3}$  dolazi do jedne zamjene s  $Mg^{+2}$  u oktaedrijskoj mreži, a u tetraedrijskoj mreži dio  $Si^{+4}$  može biti zamijenjen s  $Al^{+3}$  (Slika 2-5). Ovo rezultira da montmorillonit posjeduje dominantno oktaedrijski naboj koji po jediničnom paketu iznosi približno  $x \sim 0,2-0,6$  (Bargaya et al. 2006). Slika 2-6 prikazuje raspodjelu naboja u montmorillonitu koja rezultira nabojem jediničnog paketa 0,66 (Mitchell & Soga 2005). Ovaj naboj se uravnotežuje vezanjem zamjenjivih kationa u prostoru između jediničnih paketa te na njihovim rubovima (Slika 2-6). Idealizirana formula kemijskog sastava montmorillonita prema tome glasi (Bargaya et al. 2006):



gdje  $yM^+$  predstavlja broj izmjenjivih kationa kao što su  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  i  $Na^+$ .

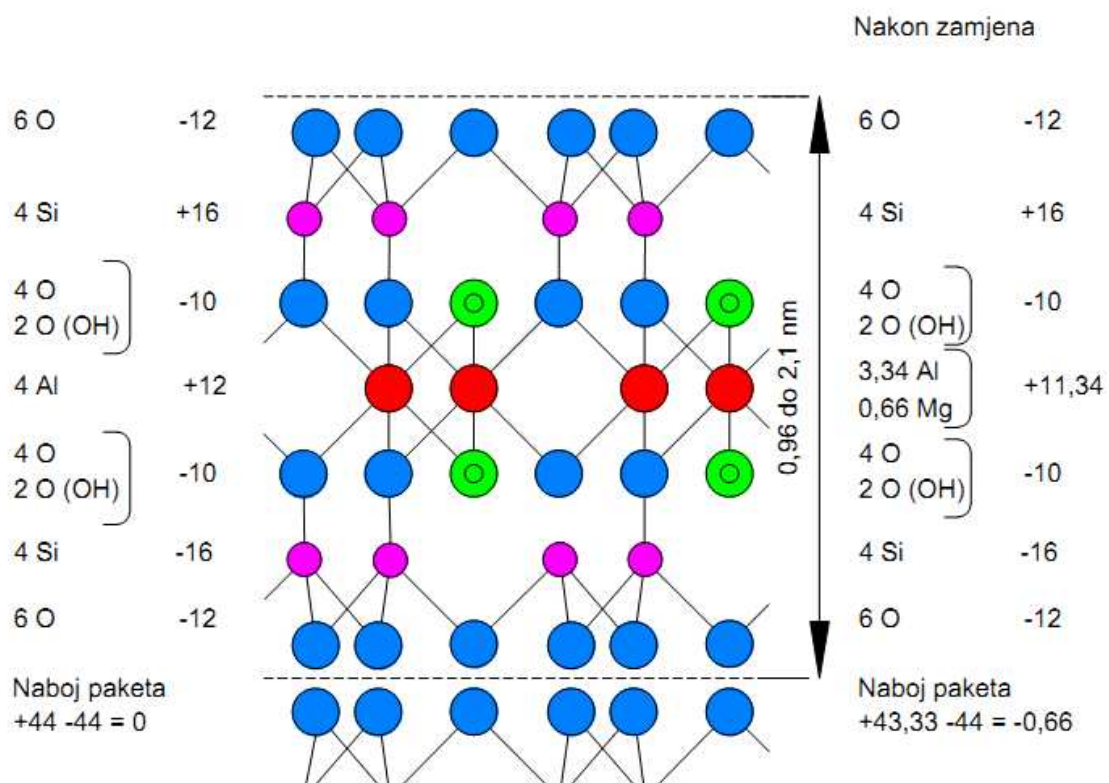
Naboj odgovara kapacitetu ionske izmjene od 80 do 150 meq/100 g te je nedostatan za čvrsto vezanje međuslojnih kationa a time i slojeva međusobno zbog čega montmorillonit kao i ostali smektiti ima veliku bubrivost. Bubrivost potiče od adsorpcije vode na površinu čestice te uslijed hidratacije međuslojnih kationa.



Slika 2-5 Struktura montmorillonita (Murray 2007)

Kada otopina dođe u kontakt s bubrivim mineralima glina, na kontaktu čvrste i tekuće faze dolazi do sorpcije iona i molekula. Sposito (2008, 1999) navodi da do sorpcije iona na površinu čestica glina i u međuslojne prostore može doći djelovanjem tri mehanizma (Slika 2-7) odnosno tvorbom tzv. unutarnjih i vanjskih kompleksa te difuznog sloja. Naime, površine 2:1 silikatnih slojeva karakteriziraju serije heksagonalnih šupljina u koordinaciji 6 atoma kisika koje se nalaze u ravnini atoma kisika, baza tetraedrijskih mreža (Slika 2-5). Promjeri šupljina iznose oko 0,26 nm. Ponašanje ovakvih površina ovisi o naboju silikatnih mreža 2:1 sloja. Šupljine mogu djelovati kao slab davalac elektrona ukoliko je deficit naboja silikatnih mreža mali. U ovom slučaju mogu nastati kompleksi s neutralnim molekulama kao što je voda. Ovakvi kompleksi su vrlo nestabilni i lako razdvojivi. U drugom slučaju, ukoliko je dominantni naboj paketa rezultat deficita naboja u oktaedrijskim mrežama, kao u slučaju montmorillonita, u šupljinama se u kombinaciji s hidratiziranim međuslojnim kationima tvore relativno jaki kompleksi koji su nepokretni. U trećem slučaju, gdje je naboj paketa rezultat deficita naboja u tetraedrijskim mrežama odnosno vrlo blizu šupljina, kompleksi postaju još snažniji.

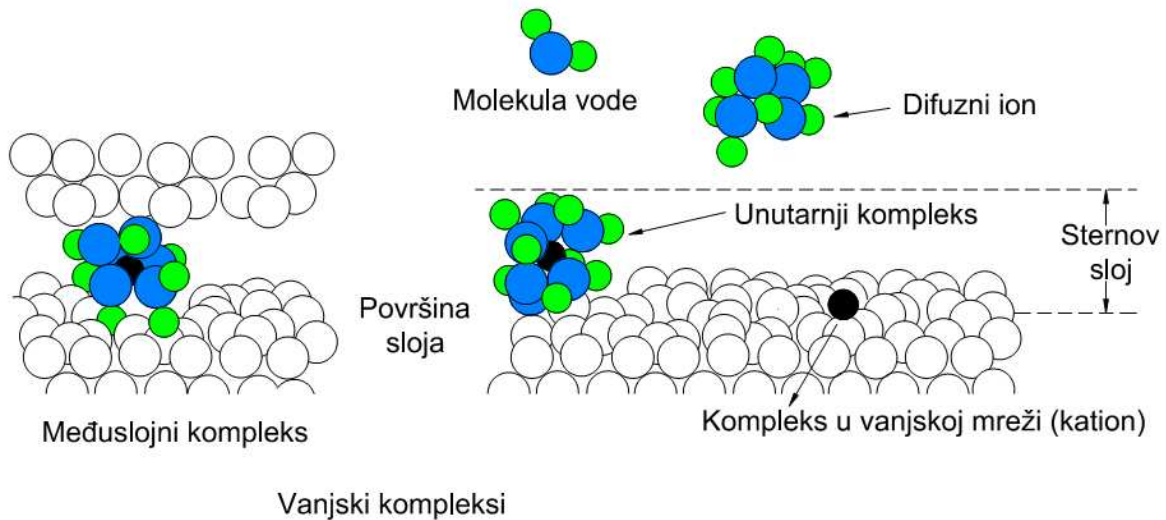
Unutarnji kompleksi nastaju vezanjem kationa ili molekula direktno na površinu minerala. Vanjski kompleksi tvore se vezanjem hidratiziranih kationa na površinu minerala s tim da se ta veza ostvaruje preko molekula vode. Nastaju elektrostatskom interakcijom te su ovi kompleksi slabiji u odnosu na unutarnje komplekse koji se tvore ionskim i kovalentnim vezama. Ova dva mehanizma tvore primarni sloj tzv. električnog dvostrukog sloja. Na lijevoj strani slike 2-7 vidljiv je primjer vanjskog kompleksa s hidratiziranim kationom u međuslojnom prostoru montmorillonita. Osim tvorbe vanjskih i unutarnjih kompleksa, međuslojni kationi također mogu biti neutralizirani negativnim nabojem čestica gline pri čemu nastaje sekundarni, difuzni sloj (Slika 2-7). Ovaj sekundarni sloj nije vezan sa silikatnom mrežom a tvore ga ioni koji se slobodno gibaju u međuslojnoj otopini. Stoga se može reći da su zamjenjivi kationi oni koji se mogu lako zamijeniti s drugim kationima iz otopine elektrolita koja prolazi kroz tlo. Kod montmorillonita to su kationi koji tvore vanjski kompleks i difuzni sloj.



Slika 2-6 Raspodjela naboja u montmorillonitu (Mitchell & Soga 2005)

U kontaktu s otopinom zamjenjivi međuslojni kationi također hidratiziraju, međutim ovisno o vrsti kationa u otopini može doći do istisnuća zamjenjivih kationa u otopinu i njihove zamjene s kationima iz otopine. Sposobnost zamjene ovisi o valenciji kationa, međusobnom odnosu koncentracija različitih iona u otopini i veličini hidratiziranog iona.





Slika 2-7 Tri mehanizma adsorpcije kationa na površinu minerala glina (montmorillonit) (Sposito et al. 1999)

Općenito, kationi veće valencije na zamjenjivim mjestima zamjenjuju katione manje valencije, manji hidratizirani kationi iste valencije zamjenjuju veće hidratizirane katione iste valencije, kationi manjeg ionskog radijusa zamjenjuju katione većeg radijusa iste valencije (Mitchell & Soga 2005; McBride 1994; Schulze 1989). Tijekom procesa zamjene kationa, važnu ulogu ima i koncentracija otopine. Općenito, zamjena se odvija po tzv. liotropnoj seriji (*eng. lyotropic series*) koja glasi:  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+}$ . Iznimke su moguće kada se kationi niže sposobnosti zamjene nalaze u znatno višim koncentracijama otopine u odnosu na katione više sposobnosti zamjene (Mitchell & Soga 2005). Tablica 2-2 prikazuje ionske radijuse kationa u suhom i hidratiziranom stanju.

Tablica 2-2 Ionski radijusi u suhom i hidratiziranom stanju

Ioni	Ionski radijus (nm) (Faure 1998)	Radijus hidratiziranog kationa (nm) (Mitchell & Soga 2005)	Hidratacijski broj (Halle 2004)
$\text{Li}^+$	0,068-0,082	0,73-1,00	7
$\text{Na}^+$	0,107-0,140	0,56-0,79	5
$\text{K}^+$	0,146-0,168	0,38-0,53	4
$\text{Mg}^{2+}$	0,066-0,097	1,08	12
$\text{Ca}^{2+}$	0,083-0,095	0,96	10

### 2.1.3 Pojavnost bubrenja

Bubrenje odnosno interakcija s vodom bitna su svojstva grupa vermikuliti i smektiti. Oni sadrže veliki broj međuslojnih prostora u koje, tijekom kontakta s vodom, ulaze molekule vode privučene negativnim nabojem na površinama. Molekule vode i međuslojni kationi tvore djelomično uređene strukture s tim da međuslojni kationi ujedno imaju najvažniju ulogu kod interakcije gline i vode. Bubrenje dovodi do razdvajanja jediničnih paketa sve do postizanja ravnoteže pri zadanom tlaku. Povećanje debljine jediničnog paketa uslijed bubrenja ovisi prije svega o međuslojnim kationima. Ukoliko su međuslojni kationi jednovalentni, odbijanje slojeva je veće pa je i bubrenje veće (Jo et al. 2005; Kolstad et al. 2004; Bouazza 2002; Jo et al. 2001; Ruhl & Daniel 1997; Alther et al. 1985).

Mitchell & Soga (2005) daju moguće mehanizme međusobne interakcije čestica gline i vode. Prvi je stvaranjem vodikovih veza koje se formiraju između atoma vodika i nekog elektronegativnog atoma. Ovdje se javljaju dva slučaja,  $H^+$  iz  $OH^-$  u sklopu površine tetraedrijske mreže privlači molekule vode iz međuslojnog prostora preko  $O^{2-}$ . U drugom,  $O^{2-}$  u sklopu tetraedrijske mreže privlači molekule vode iz međuslojnog prostora preko  $H^+$ . Ova veza ima za posljedicu premještanje i reorijentaciju molekula vode u međuslojnom prostoru. Ona je elektrostatske prirode i ona opada s udaljenošću od površine paketa. Drugi je stvaranjem akvakompleksa s međuslojnim kationima koji zatim bivaju privučeni uz površinu paketa u formi hidratizirane molekule. Ovdje su pozitivno nabijeni kationi okruženi negativno nabijenim krajem molekule vode ( $O^{2-}$ ) (Slika 2-7). Treći mehanizam se ostvaruje djelovanjem osmotskog tlaka. Naime, koncentracija hidratiziranih kationa je veća u blizini negativno nabijene površine paketa uslijed elektrostatskih privlačnih sila. Ove sile sprečavaju hidratizirane katione da se odvoje od površine ali također imaju za posljedicu manju koncentraciju molekula vode uz površinu paketa. Ova razlika u koncentraciji nastoji molekule vode pogurati prema negativno nabijenim površinama paketa uslijed djelovanja osmotskog tlaka. Četvrti mehanizam nastaje uslijed dipolnog privlačenja molekula s prisutnim dipolnim momentom kao što su molekule vode. Iako su električno neutralne privlači ih negativno nabijena površina paketa uslijed djelovanja van der Waalsovih sila.

Međuslojni kationi, uslijed energije hidratacije, privlače molekule vode iz otopine kako bi stvorili akvakomplekse. Nakon stvaranja akvakompleksa, uz negativno nabijenu površinu paketa nalazi se visoka koncentracija hidratiziranih kationa koja se nastoji dispergirati u otopini s ciljem stvaranja ravnoteže koncentracija u glineno-vodenoj suspenziji. Djelovanje elektrostatskih sila koje nastoje zadržati hidratizirane katione uz negativno nabijene površine

paketa i osmotskog tlaka koji nastoji postići ravnotežu koncentracija u suspenziji vode i gline uzrokuje stvaranje specifične raspodjele iona duž površine jediničnog paketa koja se još naziva „dvostruki difuzni sloj“ (Mitchell & Soga 2005; Shackelford 1994)

Koncept dvostrukog difuznog sloja izveden je na temelju električnog dvostrukog sloja, koji opisuje raspodjelu električnih potencijala u blizini nabijene površine te kao takav ima važnu ulogu u objašnjavanju ponašanja koloida i drugih slučajeva gdje je nabijena površina u kontaktu s otopinom elektrolita. Mitchell & Soga 2005 navode da je danas najšire prihvaćen Stern-Gouy-Chapman model dvostrukog difuznog sloja koji je nastao na temelju Helmholtzovog i Gouy-Chapmanovog modela. Model se sastoji od sloja kationa uz samu nabijenu površinu koji se naziva Sternov sloj i difuznog sloja kationa i aniona (Slika 2-8). Na slici su posebno naznačene ravnina dipolnih molekula vode uz samu površinu minerala,  $\alpha$ , ravnina hidratiziranih kationa najbliža površini minerala,  $\beta$ , ravnina početka difuznog sloja,  $D$ , ravnina razdvajanja difuznog sloja i slobodne vode,  $\zeta$ , površinski potencijal,  $\Psi_0$  i vrijednost površinskog potencijala na ravnini početka difuznog sloja,  $\Psi_D$ . Debljina Sternovog sloja se povećava s veličinom kationa. Debljina difuznog dvostrukog sloja,  $1/\chi$  na osnovu Debye-Huckleaove teorije dobije se pomoću izraza:

$$\frac{1}{\chi} = \left( \frac{\varepsilon_0 k}{2e^2 N} \frac{\varepsilon_r T}{\sum c_i z_i^2} \right)^{1/2} \quad (2-2)$$

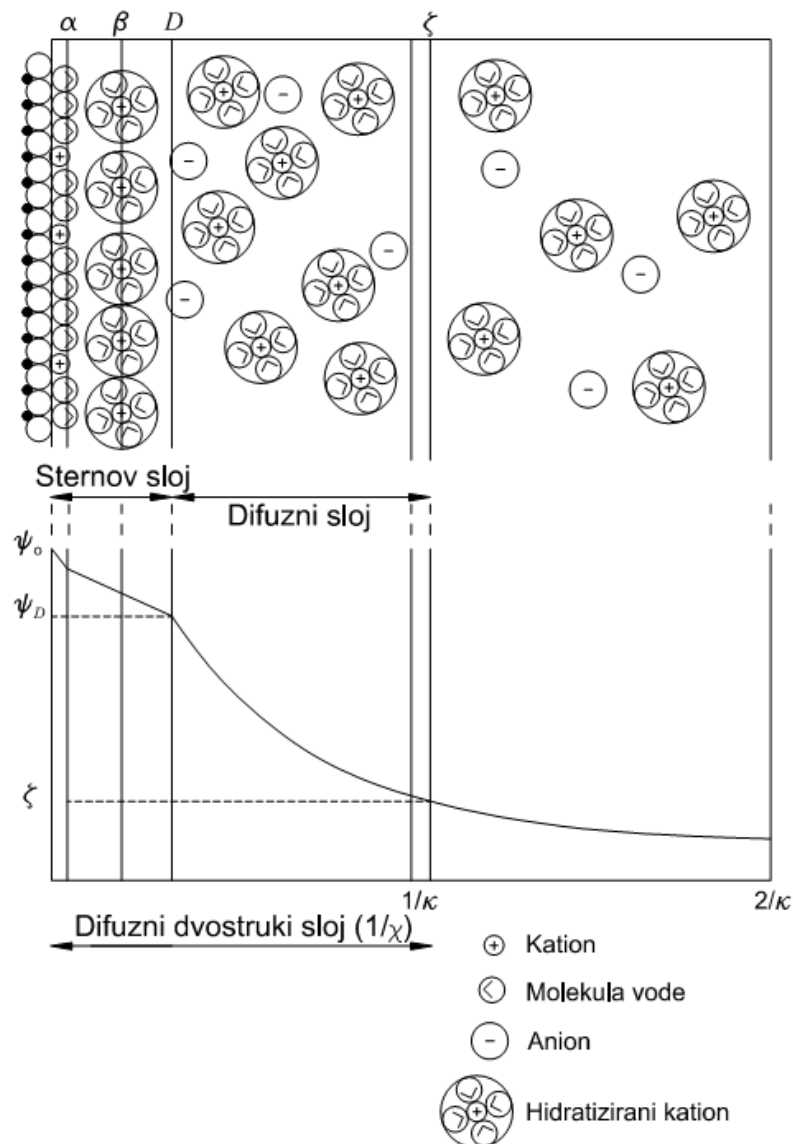
gdje je:  $\varepsilon_0$  – permitivnost vakuumu ( $8,8542 \times 10^{-12}$  F/m),  $\varepsilon_r$  – relativna permitivnost otapala (primjerice voda pri  $25^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_r = 78,54$ ),  $k$  – Boltzmannova konstanta ( $1,380658 \times 10^{-23}$  J/°K),  $T$  – apsolutna temperatura (°K),  $e$  – jedinični naboj ( $1,60217733 \times 10^{-19}$  C),  $N$  - Avogadrov broj ( $6,0221367 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>),  $c_i$  – koncentracija pojedine vrste iona u otopini (mol/m<sup>3</sup>),  $z_i$  – naboj pojedine vrste iona.

Ukoliko se u izraz (2-2) uvrste brojčane vrijednosti univerzalnih konstanti može se vidjeti da debljina difuznog dvostrukog sloja ovisi o temperaturi (T), koncentraciji ( $c_i$ ) naboju elektrolita ( $z_i$ ) u otopini te relativne permitivnosti otapala ( $\varepsilon_r$ ).

Povećanje temperature bi trebalo povećati debljinu difuznog sloja te smanjiti površinski potencijal uz pretpostavku nepromjenjivosti površinskog naboja. Međutim, povećanje temperature također smanjuje dielektričnu konstantu otapala (Tablica 2-3). Dobije se mali neto efekt umnoška  $\varepsilon_r \times T$  što pokazuje mali utjecaj temperature na debljinu difuznog sloja.

Ovaj zaključak treba uzeti s rezervom, obzirom da je eksperimentalno zabilježen utjecaj temperature na mehanička svojstva tla (čvrstoću, stišljivost i bubrenje).

Efektivna debljina difuznog sloja obrnuto je proporcionalna koncentraciji elektrolita u otopini. Porastom koncentracije reducira se površinski potencijal sloja što dovodi do značajnog smanjenja potencijala s udaljavanjem od površine sloja. Smanjuje se debljina dvostrukog difuznog sloja, a time i udaljenost na kojoj međusobno djeluju dva paralelna susjedna jedinična sloja. U praksi to znači da povećanje koncentracije elektrolita u otopini olakšava flokulaciju čestica te smanjuje bubrenje i tlak bubrenja.



Slika 2-8 Difuzni dvostruki sloj u montmorillonitu predložen, prema Guven, 1992 (gore). Dolje na slici vidljivo je smanjenje površinskog potencijala s udaljavanjem od površine čestice.

Prema izrazu (2-2) efektivna debljina difuznog sloja je također obrnuto proporcionalna valenciji kationa, odnosno veća valencija kationa ima za posljedicu smanjenje površinskog potencijala i debljine difuznog sloja. Međutim, apsorpcija viševalentnih kationa u međuslojne prostore obično ograničava mogućnost razdvajanja dva susjedna paralelna sloja. Ovo bitno ograničava mogućnost kvantitativne primjene teorije dvostrukog difuznog sloja.

Relativna permitivnost otapala i efektivna debljina difuznog sloja su proporcionalni. U ovom slučaju sa smanjenjem permitivnosti otapala dolazi do smanjenja površinskog potencijala sloja kao i debljine difuznog sloja. Ovisno o primjeni, glinovita tla mogu biti u kontaktu s različitim vrstama kemikalija te primjerice gorivo, otapala ili organske kemikalije mogu zamijeniti vodu u porama. U tom slučaju relativna permitivnost otapala može biti znatno manja (Tablica 2-3). Iako se najčešće uzima da je dielektrična konstanta vode 80, prema Schulzeu (1989), eksperimentalne vrijednosti dielektrične konstante porne vode u tlu znatno su manje (između 2 i 50).

Tablica 2-3 Vrijednosti dielektričnih konstanti za različita otapala pri različitim temperaturama

Otapalo	Dielektrična konst.	Otapalo	Dielektrična konst.
Aceton (0 °C)	1,0159	Formamid (25 °C)	182
Aceton (25 °C)	20,7	Metanol (25 °C)	33
Aceton (53 °C)	17,7	Voda (0 °C)	88
Acetilen (0 °C)	1,0217	Voda (20 °C)	80
Benzene (20 °C)	2,3	Voda (25 °C)	78
Benzin (20 °C)	2	Voda (50 °C)	70
Etanol (25 °C)	24,3	Sulfatna kis. (20 °C)	100

Izrazom (2-2) dobiva se debljina samostalnog difuznog dvostrukog sloja. Kao takav ne predstavlja reprezentativne uvjete za većinu glinenih sustava. Naime, obzirom na međusobnu blizinu susjednih jediničnih slojeva dolazi do preklapanja njihovih dvostrukih difuznih slojeva. Ovo rezultira odbojnom silom među njima odnosno kako je već navedeno osmotskim bubrenjem. Međutim, navedeni izraz daje dobar uvid utjecaja otopine na debljinu dvostrukog difuznog sloja kao i distribuciju iona uz površinu čestice glina. Daje relativno dobra predviđanja slobodnog bubrenja vrlo sitnih glinenih čestica s jednovalentnim međuslojnim kationima, kao primjerice Na i Li montmorillonit. Nedostaci teorije dvostrukog difuznog sloja temeljene na Gouy-Chapmanovom modelu su da ne uzima mnoge faktore u obzir, kao pH

otapala, veličinu iona, međusobno djelovanje čestica te također nemogućnost upotrebe za neidealizirane uvjete.

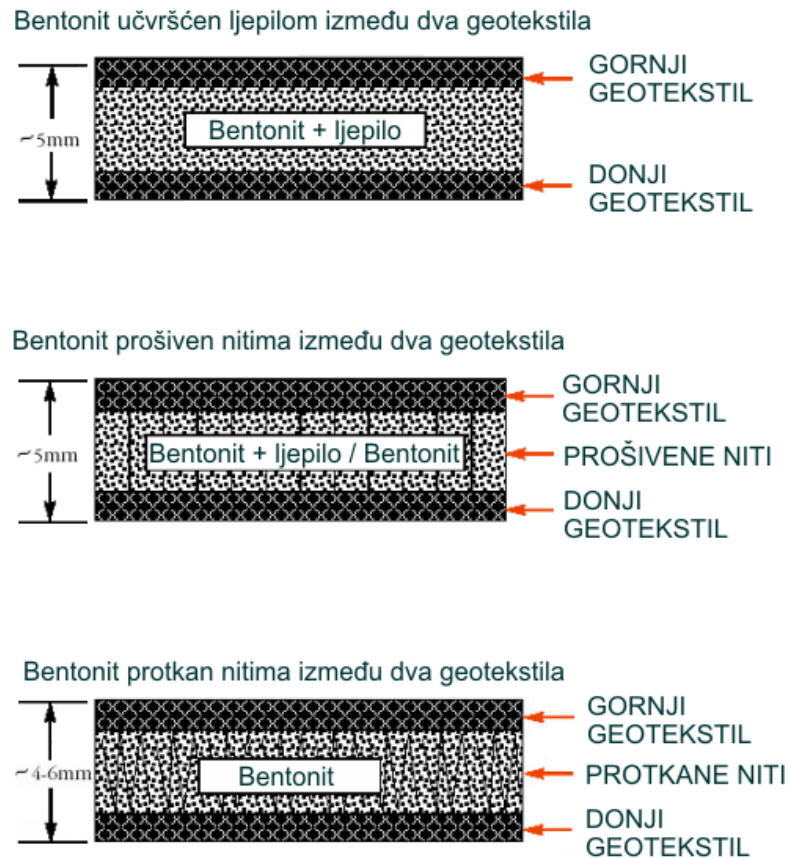
## 2.2 Primjena bentonitnih glina

Bentonitne gline danas imaju široku primjenu. Kako se radi o prirodnom materijalu, neškodljivom za okoliš u posljednjih se nekoliko desetljeća učestalije primjenjuju u sve većim količinama. U primjeni se posebno ističu natrijske bentonitne gline zbog velike sposobnosti bubrenja. U kontaktu s vodom pa čak i uslijed povećane vlažnosti zraka, natrijske bentonitne gline bubre i do 15 puta u odnosu na dehidratizirano stanje. Bubrenjem se popunjavaju njezine pore osiguravajući time vrlo malu hidrauličku i plinsku provodljivost odnosno omogućavajući njezinu primjenu kao brtvene barijere u različitim inženjerskim zahvatima. Zbog navedenih svojstava, bentonitne gline se kao brtvena komponenta upotrebljavaju i u glinenim geosintetičkim barijerama.

Glinene geosintetičke barijere su umjetno proizvedene hidrauličke barijere. Sastoje se od približno 5 mm tankog sloja bentonitne gline koja se nalazi između dva sloja geotekstila a u nekim slučajevima uz geotekstil dolazi i polimerna geosintetička barijera (Slika 2-9). Pri tome je bentonitna glina nepropusna komponenta dok su slojevi geotekstila nosiva komponenta (osim u slučaju kombinacije s polimernom geosintetičkom barijerom). Slojevi geotekstila najčešće se povezuju prošivenim ili protkanim tekstilnim nitima kod tzv. armiranih glinenih geosintetičkih barijera (Bouazza 2002). Prošiveni se spajaju pomoću neprekidnih tekstilnih niti raspoređenih u paralelne redove dok se protkani spajaju protkivanjem. S ciljem sprečavanja izvlačenja protkanih niti koristi se još metoda termičke obrade za njihovo učvršćenje. Upotrebljavaju se još i tzv. nearmirane glinene geosintetičke barijere ali je njihova upotreba ograničena na ravne podloge i kosine manjih nagiba. Kod takvih glinenih geosintetičkih barijera, bentonitna glina je ugrađena lijepljenjem odnosno pomiješana je s ljepilom topivim u vodi te ugrađena između dva sloja geotekstila. U ovom slučaju geotekstil se često kombinira s polimernom geosintetičkom barijerom. Pri tome polimerne geosintetičke barijere mogu biti različitih vrsta, debljina i tekstura. Uloga ljepila je očuvanje strukture glinene geosintetičke barijere tijekom manipulacije i ugradnje.

Glinene geosintetičke barijere proizvode se najčešće u rolama širine od 4-5 m i duljine od 25-60 m, a isporučuju zaštićene plastičnom folijom. U njih se uglavnom ugrađuju prirodne natrijske bentonitne gline i aktivirane natrijske bentonitne gline sa 60-90% natrijskog montmorillonita. Gotov proizvod sadrži približno  $5 \text{ kg/m}^2$  bentonitne gline. Isporučuju se s vlažnošću bentonitne gline od 10-15% kod armiranih vrsta glinenih geosintetičkih barijera odnosno 15% i većom vlažnošću kod nearmiranih (lijepljenih) glinenih geosintetičkih barijera. Hidratiziranjem, posmična čvrstoća nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera

podudara se s posmičnom čvrstoćom bentonitne komponente (Gilbert et al. 1996). Hidraulička provodljivost glinene geosintetičke barijere (bez polimerne geosintetičke barijere) manja je od  $1 \times 10^{-10}$  m/s (Bouazza 2002). Kao takvi predstavljaju slabopropusnu barijeru niske hidrauličke provodljivosti i jednostavne ugradnje s mnoštvom različitih primjena.



Slika 2-9 Načini spajanja bentonitne gline i geotekstila

Upotreba svih vrsta geosintetika pa i glinenih geosintetičkih barijera izazvala je veliku revoluciju u graditeljstvu. Danas se glinene geosintetičke barijere intenzivno upotrebljavaju kao brtvene barijere ili komponente brtvenih barijera u širokoj lepezi inženjerskih aplikacija u području hidrotehnike, geotehnike, prometnica i geotehnologije zaštite okoliša (Guyonnet et al. 2009; Kang i Shackelford 2010; Rosin-Paumier et al. 2010; Shackelford et al. 2010). Dobro su prepoznat proizvod zbog prednosti koje imaju nad klasičnom izvedbom glinovitih brtvenih sustava. Tu se može izdvojiti proizvodnja koja se odvija u tvorničkim uvjetima uz stalnu kontrolu kvalitete, jednostavnija i brža ugradnja, ograničena osjetljivost na vremenske uvjete, manja osjetljivost na slijeganja i deformacije, primjena na lokacijama gdje je prirodne mineralne sirovine teško nabaviti ili je njihova ugradnja otežana, dobra zastupljenost na tržištu uz prihvatljivu cijenu, često daje jednakovrijedna ili bolja rješenja. No, ne smiju se



zanemariti niti određeni nedostaci poput osjetljivost na probijanje zbog male debljine (samozacjeljivanje odnosno mogućnost bubrenja ovisi o lokalnim uvjetima), problem smanjenja posmične čvrstoće na kontaktu glinene geosintetičke barijere s drugim materijalima iz brtvenog sustava, ograničen kapacitet upijanja zagađivala zbog male debljine u odnosu na sustav klasične zbijene gline (5 mm u odnosu na 0,5 do 1,0 m zbijene gline) te pitanje trajnosti zbog kontakta s procjednim vodama odnosno zagađivalom (pitanje kompatibilnosti) ili nekih drugih uvjeta u okolišu.

Upotreba glinenih geosintetičkih barijera u različitim inženjerskim aplikacijama ima za posljedicu i različite uvijete ugradnje. Pri tome se mijenjaju parametri koji utječu na samo funkcioniranje glinene geosintetičke barijere kao brtvene barijere. Preporuke GRI-GCL5 (2011) navode vrijednosti dva važna parametra (veličina normalnih napreznja i vrijednost hidrauličkog gradijenta) pri različitim inženjerskim aplikacijama. U hidrotehnici i geotehnici upotrebljavaju se u ulozi brtvenih slojeva brana, nasipa, kanala vodotokova i sl., uglavnom s postojećim nepropusnim naslagama ili u kombinaciji s polimernom geosintetičkom barijerom. U ovom slučaju uloga glinene geosintetičke barijere je kontrola procjeđivanja odnosno gubitka vode iz vodotokova ili akumulacija. Očekuje se djelovanje normalnih napreznja na glinenu geosintetičku barijeru do  $50 \text{ kN/m}^2$  te hidrauličkih gradijenata većih od 100 pa i više od 1000, ovisno o lokalnim uvjetima. U prometnicama upotrebljavaju se u ulozi brtvenih slojeva cesta, željezničkih pruga, tunela, prometnih površina zračnih luka, samostalno ili u kombinaciji s polimernom geosintetičkom barijerom. U tom slučaju njihova uloga je zaštita podinskih naslaga i vodonosnika od primjerice soli i drugih zagađivala koje ispiru padaline te u slučaju akcidentnih situacija (izlijevanje goriva kod prometnih nesreća i sl.). Očekuju se normalna napreznja od oko  $50 \text{ kN/m}^2$  te hidraulički gradijenti manji od 50. U geotehnologiji zaštite okoliša upotrebljavaju se kao brtveni slojevi odlagališta otpada. U pokrovnim brtvenim slojevima odlagališta otpada upotrebljavaju se najčešće u kombinaciji s polimernom geosintetičkom barijerom s ciljem sprečavanja procjeđivanja padalina u tijelo odlagališta te s ciljem sprečavanja prodora tekućina i plinova iz tijela odlagališta u atmosferu i okoliš. U ovom slučaju, očekuju se relativno mala normalna napreznja, 10 do  $50 \text{ kN/m}^2$ , te hidraulički gradijenti manji od 50. U temeljnim brtvenim slojevima odlagališta otpada upotrebljavaju se najčešće u kombinaciji s glinenim brtvenim slojevima i polimernom geosintetičkom barijerom što s dovoljnom sigurnošću osigurava da neće doći do procjeđivanja i migracije procjedne tekućine i plinova iz tijela odlagališta u podinske naslage i tokove podzemne vode kao i sprečavanje prodora podzemnih voda u tijelo odlagališta. Ovisno o projektnom rješenju

odlagališta otpada, normalna naprezanja u ovom slučaju mogu uvelike varirati, od 100 pa i do 1000 kN/m<sup>2</sup>. Ukoliko drenažni sustavi odlagališta dobro funkcioniraju vrijednost hidrauličkih gradijenata u ovom slučaju ne bi trebala prelaziti 50. Međutim, slučajevi iz prakse pokazuju da su zabilježena mnoga začepjenja podinskih drenažnih sustava (Koerner & Koerner 1995; Rowe 1998; Fleming et al. 1999), pa se mogu pretpostaviti i znatno veće vrijednosti hidrauličkih gradijenata. Nadalje, upotrebljavaju se u području zaštite okoliša kao dodatne barijere uz spremnike, silose, rezervoare. Zadaća im je spriječiti procjeđivanje za slučaj propuštanja ili težeg oštećenja primarne barijere. U ovom slučaju se očekuju normalna naprezanja do 25 kN/m<sup>2</sup> dok se smatra da vrijednosti gradijenata neće prelaziti 150. Danas se sve češće upotrebljavaju i u rudarstvu kao brtveni slojevi taložnih bazena, jalovišta, odlagališta pepela i sl. Kod taložnih bazena najčešće se koriste u temeljnim brtvenim slojevima, dok se kod jalovišta i odlagališta pepela koriste u pokrovnim brtvenim slojevima. Pri tome se očekuju normalna naprezanja do 50 kN/m<sup>2</sup> te vrijednosti hidrauličkih gradijenata od 50 za odlagališta pepela i jalovišta pa i do 1000 za taložne bazene.

## 2.3 Mehanička svojstva bentonitnih glina

Dosadašnja ispitivanja ukazuju na mogućnost međusobne korelacije pojedinih fizikalno-mehaničkih svojstava bentonitne gline i zemljanih materijala na bazi bentonitnih glina s mineraloško-kemijskim sastavom (Guyonnet et al. 2009; Dolinar 2006; Dolinar 2010; Stark & Eid 1994; Tiwari & Marui 2005). Ovim istraživanjem želi se kvantificirati djelovanje bentonitne gline unutar glinene geosintetičke barijere kroz sustavno definiranje funkcijske povezanost bubrivosti, konsolidacijskih i hidrauličkih karakteristika sa čvrstoćom bentonitne gline. To podrazumijeva postavljanje određenog broja korelativnih veza među njima kojima će se opisati ponašanje bentonitne gline u različitim uvjetima opterećenja i hidratacije na praktičan i prihvatljiv način. Razvoj navedene funkcijske veze također zahtijeva definiranje procedura za određivanje funkcijske veze mehaničkih svojstava bentonitne gline s njenim mineraloško-kemijskim sastavom i fizikalnim osobinama.

Kako je navedeno na početku ovog poglavlja, glavni sastojak bentonitnih glina je montmorillonit odnosno minerali glina smektitne skupine. Jedinični naboj i koloidalna veličina čestica imaju za posljedicu da ova skupina minerala ima veliki afinitet prema molekulama vode. Rado ih vežu pa tako mogu i višestruko povećati svoj volumen što ima značajnu ulogu na mehanička svojstva uključujući čvrstoću, deformabilnost i hidrauličku provodljivost bentonitnih glina.

### 2.3.1 Posmična čvrstoća glinenih geosintetičkih barijera

Stabilnost bilo koje geotehničke građevine ovisi o posmičnoj čvrstoći tla. Ona je rezultat otpora trenja između čestica i međusobnog uklještenja čestica tla te moguće cementacije ili privlačnih sila između čestica. Ovisi o nizu faktora kao što su koeficijent pora, sastav, povijest naprezanja, temperatura, veličina i prirast deformacija te struktura tla. Poznato je da su ovi faktori većim dijelom međusobno zavisni. Međutim, sustavna funkcionalna veza svih njih nije poznata što je naročito izraženo kod bubrivih tala.

Ispitivanja posmične čvrstoće kao i parametra posmične čvrstoće provode se u različitim standardiziranim uređajima (izravni, jednoosni i troosni posmik) uz različite uvjete dreniranja, brzine smicanja, naprezanja. Kao rezultat te varijabilnosti u provedbi ispitivanja, dobivaju se i različite izmjerene vrijednosti posmične čvrstoće odnosno različite vrijednosti njenih parametara. Stoga je pri odabiru vrste ispitivanja i parametara provedbe pokusa poželjno odabrati one metode i one uvjete koji će na najbolji mogući način predstavljati terenske uvjete primjerene određenom inženjerskom zahvatu.

Posmična čvrstoća glinenih geosintetičkih barijera uglavnom se ne ispituje u standardiziranim uređajima za ispitivanje tla već su za tu namjenu razvijeni ili prilagođeni posebni uređaji kao primjerice uređaj za veliko smicanje i uređaj za kružni posmik. Pri tome se naročita pažnja posvećuje mehanizmu nanošenja normalne i posmične sile te veličini uzoraka obzirom da navedeni parametri mogu imati značajan utjecaj na izmjerene vrijednosti posmične čvrstoće. Danas se najčešće koristi uređaj za veliko smicanje obzirom da je njegova upotreba kod ispitivanja posmične čvrstoće glinenih geosintetičkih barijera preporučena i normom ASTM D6243. Ovaj uređaj je konceptijski sličan standardnom uređaju za izravni posmik tla (ASTM D3080). Međutim, veća kutija za posmik (primjerice presjeka 300×300 mm) koristi se u svrhu smanjenja utjecaja rubnih uvjeta te osiguranja reprezentativne količine armaturnih niti unutar uzorka (Zornberg et al. 2005). Uređaj za kružni posmik koristi se uglavnom za ispitivanja rezidualnih posmičnih čvrstoća glinenih geosintetičkih barijera obzirom da je moguće kod posmika ostvariti velike horizontalne pomake uzorka u istom smjeru. Dodatna prednost je i to što površina poprečnog presjeka ostaje nepromijenjena tijekom posmika (Eid & Stark 1997).

Obzirom na povećanu primjenu sve većih količina geosintetičkih glinenih barijera, rastao je i interes stručne i znanstvene javnosti za boljim poznavanjem njihovih svojstava. Kod promatranja ponašanja glinenih geosintetičkih barijera i bentonitnih glina uzet će se u obzir i brojni rezultati koji su nastali kao posljedica analize mehaničkih svojstava glinenih geosintetičkih barijera. Posmična čvrstoća glinenih geosintetičkih barijera ispitivana je uglavnom u standardnim uređajima za izravni posmik tla, uređajima za veliki posmik te uređajima za kružni posmik. Osim toga, postojeća ispitivanja izvođena su uz različite uvjete (primjerice različite brzine posmika, duljine hidratacije i sl.) što otežava usporedbu postojećih podataka. Promatrajući podatke različitih autora, najveće razlike se javljaju kod izbora načina pripreme uzoraka (metode hidratacije) i kod izbora brzina posmika.

Kod upotrebe glinenih geosintetičkih barijera sa stajališta njihove čvrstoće potrebno je obratiti pažnju na kontaktnu i unutarnju posmičnu čvrstoću. Pod pojmom kontaktne posmične čvrstoće smatra se čvrstoća koja se ostvaruje na kontaktu gline geosintetičke barijere s drugim materijalima, bilo da je riječ o tlima ili drugim geosinteticima. Unutarnja posmična čvrstoća razlikuje se kod armiranih i nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera. Unutarnja posmična čvrstoća armiranih glinenih geosintetičkih barijera ovisi o svim komponentama: vlačnoj čvrstoći armaturnih niti, vrsti veze sa slojevima geotekstila, vrsti geotekstila te o bentonitnoj glini. Hidratizirana bentonitna glina ima vrlo male vrijednosti posmične čvrstoće

te će njegov utjecaj na unutarnju posmičnu čvrstoću geosintetičkih glinovitih barijera biti manje izražen. Unutarnja posmična čvrstoća nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera može se poistovjetiti s posmičnom čvrstoćom bentonitne gline. Rad posvećuje pažnju bentonitnim glinama i njihovim mehaničkim svojstvima te se kod promatranja glinenih geosintetičkih barijera neće obrazlagati njihova kontaktna posmična čvrstoće.

Na rezultate ispitivanja posmične čvrstoće glinenih geosintetičkih barijera značajno utječu mnogi čimbenici:

- vrsta glinene geosintetičke barijere
- veličina uzorka
- postupak hidratacije
- vrsta tekućine u kontaktu s glinenom geosintetičkom barijerom
- brzina posmika
- veličina normalnih naprezanja za vrijeme posmika.

Tablica 2-4 prikazuje dostupne literaturne podatke o mjerenjima unutarnje posmične čvrstoće nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera. Osim vršnih prikazane su i rezidualne vrijednosti kuta unutarnjeg trenja i kohezije ukoliko su podaci bili dostupni. Veličina uzorka i uređaj za izravni posmik razlikovali su se kod pojedinih autora. Veličine uzoraka kretale su se od promjera poprečnog presjeka cilindričnog uzorka od 60 mm pa sve do dimenzija 406-1067 mm kod uzoraka s pravokutnim poprečnim presjekom. U tablici 2-4 također su navedeni uvjeti pod kojima su uzorci hidratizirani, vrijednosti normalnih naprezanja u fazi posmika te brzine smicanja. Ukoliko se promatraju uvjeti hidratacije uzoraka, dio uzoraka je ispitivan u suhom stanju. Pod pojmom suhi uzorak podrazumijeva se vlažnost isporučenog uzorka odnosno tvornička vlažnost bentonitne gline što u praksi iznosi približno 15-20% za glinene geosintetičke barijere kod kojih se kao vezivo upotrebljava ljepilo. Vršne vrijednosti kohezije suhих uzoraka kretale su se od 0-26 kPa, odnosno prosječna vrijednost na temelju dostupnih podataka iznosila je 11 kPa pri rasponu normalnih naprezanja od 6,9-483 kPa. Vršne vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja kretale su se od 3,7 do 37° uz prosječnu vrijednost od 26,2° pri rasponu normalnih naprezanja od 6,9-483 kPa. Podatke o rezidualnim vrijednostima parametara čvrstoće suhих uzoraka objavili su Zornberg et al. (2005). Pri rasponu naprezanja od 69-483 kPa dobivene su vrijednost rezidualne kohezije od 10,1 kPa i rezidualnog kuta unutarnjeg trenja od 4,0°.

Uvjeti hidratacije uzoraka su se značajno razlikovali od autora do autora. Uzorci su hidratizirani od jednog dana pa sve do četiri tjedna, pri čemu su tijekom faze hidratacije i faze posmika normalna naprezanja najčešće imala iste vrijednosti. U nekim slučajevima faza hidratacije se odvijala bez primjene normalnih naprezanja ili su primjenjivana vrlo mala normalna naprezanja s ciljem osiguranja ravnomjernog bubrenja glinene geosintetičke barijere. Velike razlike uvjeta u kojima su uzorci hidratizirani imale su za posljedicu različite vlažnosti uzoraka nakon posmika koje su prema dostupnim podacima iznosile i do 252 %. Brzine smicanja kretale su se od oko 0,0003 mm/min pa sve do 1 mm/min. Vršne vrijednosti kohezije hidratiziranih uzoraka kretale su se od 0-19 kPa s prosječnom vrijednosti dostupnih podataka 5,4 kPa pri normalnim naprezanjima od 6,9-320 kPa. Vršne vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja hidratiziranih uzoraka kretale su se od 0-30° uz prosječnu vrijednost 12,3° pri normalnim naprezanjima od 6,9-320 kPa. Rezidualne vrijednosti kohezije hidratiziranih uzoraka kretale su se od 0-9,5 kPa a prosječna vrijednost na temelju dostupnih podataka iznosi 5,2 kPa pri rasponu normalnih naprezanja od 6,9-320 kPa. Rezidualne vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja hidratiziranih uzoraka kretale su se od 5,1-14,3° uz prosječnu vrijednost od 10,0° pri rasponu normalnih naprezanja od 6,9-320 kPa.

Tablica 2-4 Literaturni podaci o posmičnoj čvrstoći nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera

Izvor	Uzorak	Vrsta pokusa (veličina uzorka)	Uvjeti hidratacije	Normalna naprezanja u fazi posmika (kPa)	Brzina smicanja (mm/min)	Vršni parametri		Parametri pri $\delta_r$	
						$c_v$ (kPa)	$\phi_v$ (°)	$c_r$ (kPa)	$\phi_r$ (°)
Chen-Northern 1988*	Claymax 200R	Izravni posmik (-)	2-3 dana	20,7-82,8	1,1938	1,9	14	-	-
					0,0033	0	10	-	-
Geoservices Consulting Engineers 1989*	Claymax 200R	Izravni posmik (300x300 mm)	$\sigma_{n,h} = 24$ kPa, 1 dan	4,8-27,6	0,508	0,24	12	-	-
Shan & Daniel 1991**	Claymax 200R	Izravni posmik ( $\phi$ 60 mm)	Suh	27-139	0,26	26	28	-	-
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 2-3 tjedna	33-139	0,0003	4	9	-	-
GRI 1991*	Claymax 200R	Izravni posmik (100x100 mm)	Suh	6,9-276	0,889	6,9	37	-	-
			$\sigma_{n,h} = 0$ kPa; 20 dana***			4,13	0	-	-
			$\sigma_{n,h} = 0$ kPa; 20 dana			3,46	0	-	-
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 20 dana***			2,78	16	-	-
	Gundseal	Izravni posmik (100x100 mm)	$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 20 dana	6,9-276	0,889	2,78	18	-	-
			Suh			4,9	26	-	-
			$\sigma_{n,h} = 0$ kPa; 20 dana***			2,8	0	-	-
			$\sigma_{n,h} = 0$ kPa; 20 dana			3,5	0	-	-
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 20 dana***			4,1	19	-	-
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 20 dana			4,1	18	-	-
Daniel et al. 1993**	Gundseal	Izravni posmik ( $\phi$ 60 mm)	Suh (w = 17 %)	27-139	0,26	13	36	-	-
				27-106	0,0003	10	22	-	-
			w = 50 %		0,26	15	27	-	-
					0,0003	5	7	-	-
			w = 100 %	27-139	0,26	19	12	-	-
					0,0003	8	7	-	-
		w = 145 %		0,0003	5	9	-	-	

Lai et al. 1998	Gundseal	Izravni posmik ( $\phi$ 80 mm)	Suh	23-320	Kontroliran prirast naprezanja	0	31	-	-	
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 3-4 tjedna	23-37		0	30	-	-	
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 3-4 tjedna	37-113		14	11	-	-	
Fox et al. 1998	Claymax 200RW	Veliki posmik (406x1067 mm)	$\sigma_{n,h} = 1$ kPa, 2 dana	6,9-279	0,1	2,4	10,2	1	4,7	
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 2 dana							
Kovačević Zelić 2000	Claymax 200R	Izravni posmik (100x100 mm)	$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 1 dan	50-200		1,219	11,7	17,0	9,5	14,3
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 1 dan			0,1219	6,6	15,7	6,0	10,5
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 1 dan			0,01219	1,0	15,9	0,0	10,5
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 1 dan			0,00146	7,0	11,5	7,5	5,1
			$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 9 dana			1,219	7,8	16,4	6,0	11,2
Zornberg et al. 2005	Claymax 200R	Veliki posmik (305-305 mm)	$\sigma_{n,h} = \sigma_{n,s}$ ; 7dana (w=252%)	14-55	1,0	1,7	12,3	2,1	8,5	
			Suh	69-483	1,0	16,1	3,7	10,1	4,0	

$\sigma_{n,h}$  vrijednost normalnih naprezanja za vrijeme faze hidratacije;  $\sigma_{n,s}$  vrijednost normalnih naprezanja za vrijeme faze smicanja

\* iz Kovačević Zelić 2000

\*\* iz Chiu & Fox 2004

\*\*\* hidratizirajući fluid - demineralizirana voda



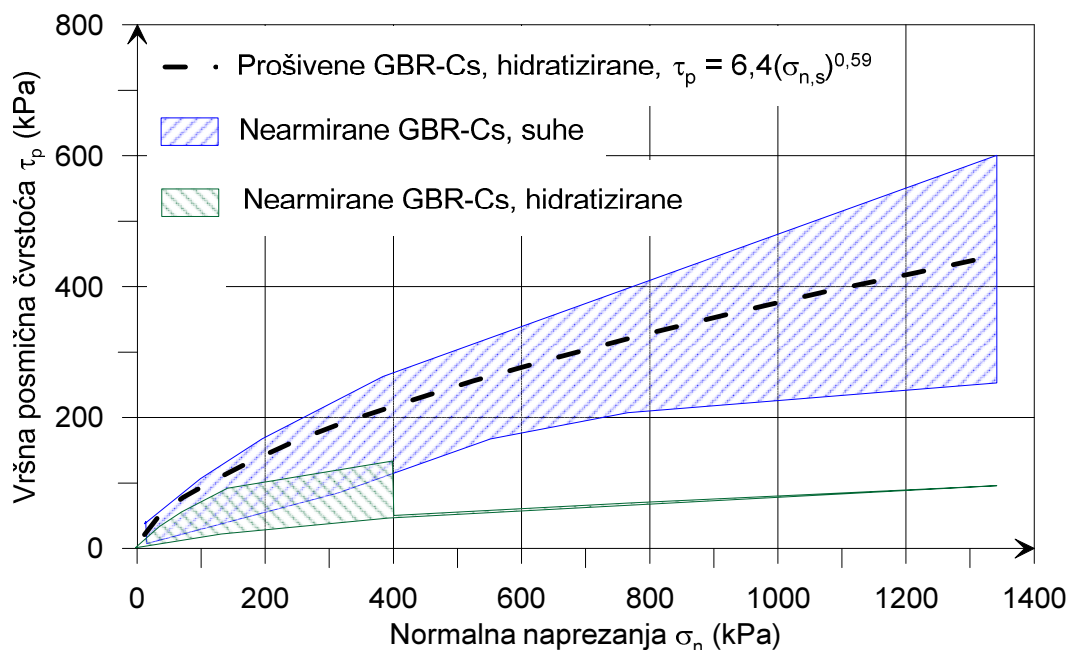
### 2.3.1.1 Utjecaj normalnih naprezanja na rezultate ispitivanja

Temeljem navedenih dostupnih podataka vidljivo je da je prisutan veliki raspon dobivenih rezultata za nearmirane glinene geosintetičke barijere. Obzirom na različite uvjete hidratacije i brzine posmika može se zaključiti da je to logično. Međutim, ukoliko se promatraju rezultati ispitivanja suhих nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera, koji su ispitivani u sličnim uvjetima, također je vidljiv veliki raspon rezultata kako za koheziju tako i za kut unutarnjeg trenja. S druge strane McCartney et al. (2002) provode ispitivanje varijabilnosti parametara posmične čvrstoće. Seriju od pet ispitivanja provode uz iste uvjete (normalno naprezanje 9,6 kPa, vrijeme hidratacije 24 sata i brzinu posmika od 1,0 mm/min). Rezultati su pokazali manju varijabilnost kod nearmirane glinene geosintetičke barijere u odnosu na armirane tipove. Vršne vrijednosti posmične čvrstoće su dobivene u rasponu od 3,3-5,1 kPa uz srednju vrijednost od 3,91 kPa i standardnu devijaciju od 0,75. Rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće su dobivene u rasponu od 2,3-3,5 kPa uz srednju vrijednost od 3,02 kPa i standardnu devijaciju od 0,45. Dakle, koeficijent varijabilnosti (odnos standardne devijacije i srednje vrijednosti) iznosi 19,2 % kod vršnih vrijednosti posmične čvrstoće i 14,9 % kod rezidualnih vrijednosti. Nešto manju varijabilnost vršnih parametara posmične čvrstoće nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera prikazuju Gilbert et al. (1997). Autori su pomoću tri ispitivanja pri normalnom naprezanju od 18 kPa dobili koeficijent varijabilnosti od 10%. Rezultati pokazuju da varijabilnost posmičnih čvrstoće nije toliko velika kao što to sugeriraju rezultati ispitivanja suhих nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera. Prema tome, rezultati ispitivanja neće ovisiti samo o uvjetima provođenja pokusa već i o načinu interpretacije rezultata. Naime, interpretacija parametara posmične čvrstoće na temelju ispitivanja u izravnom posmiku standardno se provodi upotrebom linearnih anvelopa sloma. Međutim, kod velikih raspona naprezanja mnogi autori izvještavaju o nelinearnosti istih (Fox et al. 1998; Zornberg et al. 2005; Fox 2006). Fox (2006) navodi da se ovakvo ponašanje najviše očituje kod protkanih i nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera. Na temelju navedenog može se pretpostaviti da će anvelopa sloma bentonitnih glina također imati nelinearni karakter te će vrijednosti parametara čvrstoće ovisiti o odabranom rasponu normalnih naprezanja. Kao primjer nelinearnosti anvelope sloma mogu se uzeti podaci objavljeni Chiu & Fox (2004) (Slika 2-10).

Chiu & Fox (2004) daju pregled podataka o vršnim posmičnim čvrstoćama suhих i hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera za raspon normalnih naprezanja do 1400 kPa (Slika 2-10). Za usporedbu te kao referentnu vrijednost, autori također daju vršnu

anelopu sloma hidratiziranih prošivenih glinenih geosintetičkih barijera. Podaci pokazuju velike raspone vrijednosti, ali su iz podataka jasni i neki trendovi. Vrijednosti vršnih posmičnih čvrstoća suhих nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera približno su istih vrijednosti kao i vrijednosti vršnih posmičnih čvrstoća hidratiziranih protkanih glinenih geosintetičkih barijera pri čemu autori navode da se i vrijednosti vršnih posmičnih čvrstoća suhих i hidratiziranih prošivenih glinenih geosintetičkih barijera podudaraju. Vršne vrijednosti posmične čvrstoće hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pokazuju znatno manje vrijednosti u odnosu na suho stanje.

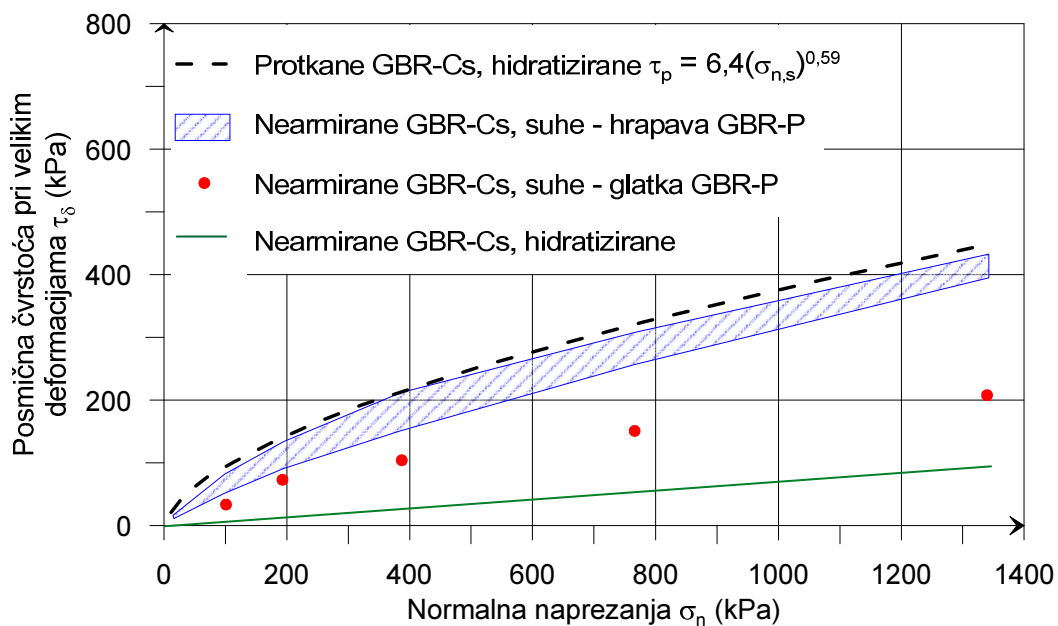
Slika 2-11 prikazuje vrijednosti rezidualnih posmičnih čvrstoća suhих i hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera (Chiu & Fox 2004). I u ovom slučaju najveću ulogu na rezidualnu posmičnu čvrstoću ima postupak hidratacije odnosno hidratacija uzorka. Suha nearmirana glinena geosintetička barijera ima znatno veće vrijednosti rezidualnih posmičnih čvrstoća u odnosu na hidratizirani. Također je vidljivo da kod suhих nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera veliku ulogu ima i tekstura polimerne geosintetičke barijere.



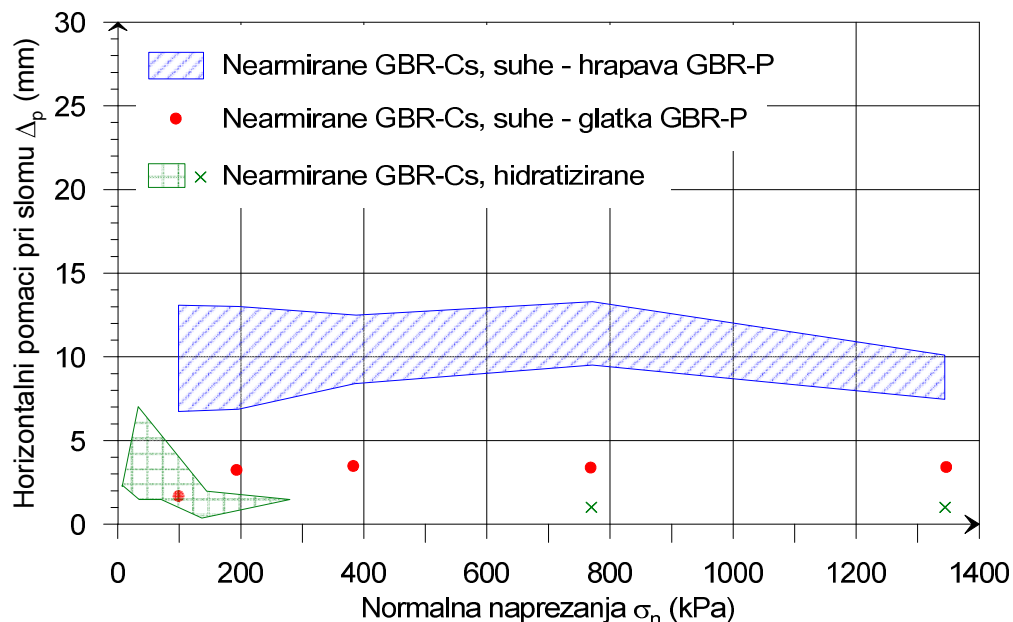
Slika 2-10 Vršne vrijednosti posmične čvrstoće suhих i hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim normalnim naprežanjima (modificirano iz Chiu & Fox, 2004)

Slika 2-12 prikazuje vrijednosti ostvarenih horizontalnih pomaka pri slomu ovisno o normalnim naprežanjima (Chiu & Fox 2004). Kod nearmiranih glinenih geosintetičkih

barijera vrijednosti horizontalnih pomaka kod kojih dolazi do sloma uzorka su u rasponu od 1 do 13 mm. Vidljivo je da ostvareni horizontalni pomaci pri slomu ovise o posmičnoj čvrstoći.



Slika 2-11 Rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće suhih i hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim normalnim naprezanjima (modificirano iz Chiu & Fox 2004)



Slika 2-12 Vrijednosti horizontalnih pomaka kod sloma za nearmirane glinene geosintetičke barijere pri različitim normalnim naprezanjima (modificirano iz Chiu & Fox 2004)

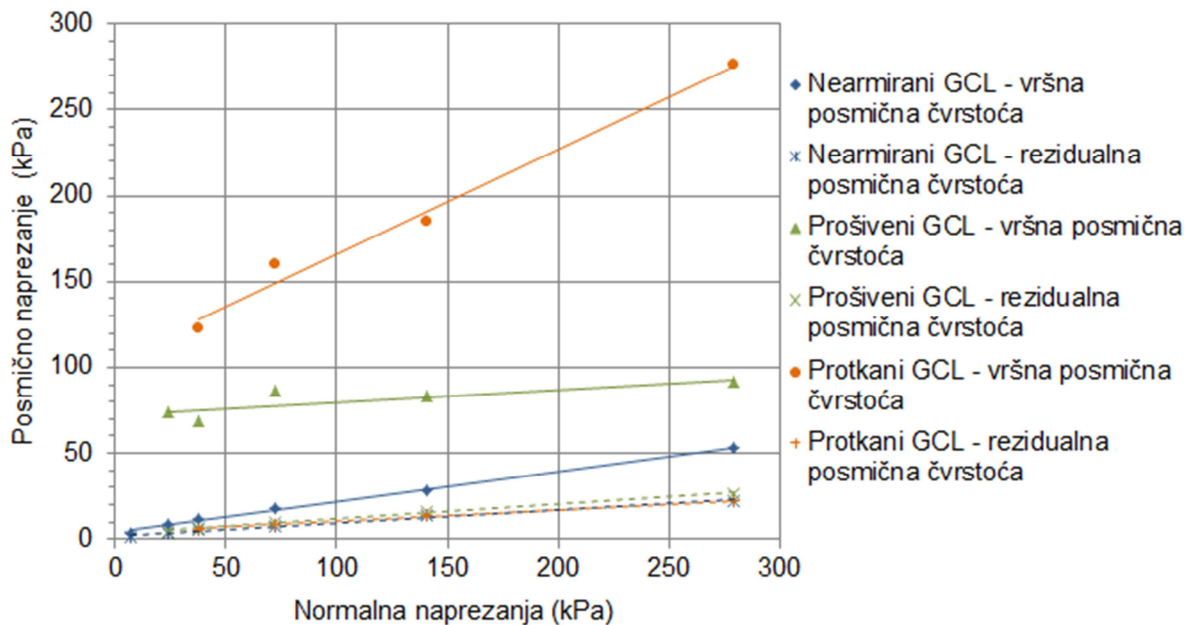
Općenito, suhe nearmirane glinene geosintetičke barijere s polimernim geosintetičkim barijerama hrapave teksture imaju najveću vršnu posmičnu čvrstoću koja se postiže kod najvećih horizontalnih pomaka. Suhe nearmirane glinene geosintetičke barijere s polimernim geosintetičkim barijerama glatke teksture imaju manju vršnu čvrstoću koja se postiže kod manjih horizontalnih pomaka. Hidratizirane nearmirane glinene geosintetičke barijere imaju najmanju vršnu posmičnu čvrstoću te najmanje vrijednosti horizontalnih pomaka potrebnih za postizanje stanja sloma.

### 2.3.1.2 Utjecaj armature glinene geosintetičke barijere na rezultate ispitivanja

Fox et al. (1998) provode istraživanja na velikom uređaju za smicanje izvlačenjem (*eng. pullout shear machine*). Poprečni presjek uzorka ima dimenzije 406x1067 mm, a u uređaju se može postići maksimalni horizontalni pomak od 203 mm. Postupak hidratacije je proveden u dvije faze. U prvoj fazi uzorak je smješten u posudu s vodovodnom vodom, opterećen sa 1 kPa normalnog naprezanja kako bi se osiguralo ravnomjerno bubrenje te tako ostavljen tijekom dva dana da bubri. Nakon toga u uzorak su postavljene dvije igle za mjerenje pornog tlaka. Jedna je bila smještena u samoj bentonitnoj glini dok je druga bila smještena na kontaktu bentonitne gline i gornjeg geotekstila. Ovdje treba napomenuti da sami autori rezultate mjerenja pornih tlakova smatraju nepouzdanima. Kao razlog navode začepljenja igala kao i pomake igala unutar uzorka što je rezultiralo nekonzistentnim očitajima. Ovo je ujedno i razlog zašto potencijalno interesantni podaci o promjeni pornih tlakova unutar bentonitne gline tijekom posmika nisu detaljnije analizirani. Druga faza hidratacije je započela ugradnjom hidratiziranog uzorka glinene geosintetičke barijere u uređaj te nanošenjem normalnog naprezanja. I u ovoj fazi omogućena je hidratacija tijekom dva dana. Nakon završetka druge faze hidratacije uzorak je posmaknut pri istim normalnim naprezanjima. Ispitivanja su provedena na tri vrste glinene geosintetičke barijere: nearmiranom (Claymax 200RW), prošivenom (Claymax 600SP) te protkanom (Bentomat ST). Rezultati pokazuju da armirane glinene geosintetičke barijere općenito pokazuju veću vršnu posmičnu čvrstoću u odnosu na nearmirane (Slika 2-13). Ako se promatraju samo armirane glinene geosintetičke barijere, veća posmična čvrstoća se javlja kod protkanih u odnosu na prošivene glinene geosintetičke barijere. Ukoliko se promatraju rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće, autori su došli do zaključka da vrsta glinene geosintetičke barijere, odnosno armatura ima neznatan utjecaj.

Vršne posmične čvrstoće za nearmirane glinene geosintetičke barijere postignute su pri horizontalnim pomacima od 1,4-2,4 mm. Zatim slijede protkane glinene geosintetičke barijere s ostvarenim horizontalnim pomacima pri maksimalnoj posmičnoj čvrstoći od 21,5-25,8 mm te prošiveni s pomacima od 39,7-63,1 mm.

Ukoliko se promatraju vertikalni pomaci za vršne vrijednosti posmične čvrstoće, autori navode da sve tri vrste glinenih geosintetičkih barijera pokazuju trend smanjenja vertikalne deformacije s povećanjem normalnih naprezanja. Kod vršnih vrijednosti posmične čvrstoće nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera nema značajnijih promjena volumena s promjenom normalnih naprezanja. U slučaju armiranih glinenih geosintetičkih barijera razlika u vertikalnim pomacima pri različitim normalnim napreznjima iznosi i do 0,5 mm. Prošiveni bubre kod manjih normalnih napreznja dok kod većih dolazi do njihovog slijeganja. Kod protkanih dolazi do slijeganja kod svih vrijednosti normalnih napreznja što autori pripisuju vlačnim silama koje se javljaju u protkanim nitima. Za rezidualne vrijednosti, nearmirani i protkane glinene geosintetičke barijere pokazuju trend prelaska iz bubrenja u slijeganje s povećanjem normalnih napreznja dok su svi prošiveni uzorci pokazali slijeganje.



Slika 2-13 Rezultati smicanja za različite vrste glinenih geosintetičkih barijera. Brzina posmika 0,1 mm/min (Fox et al. 1998)

### 2.3.1.3 Utjecaj brzine posmika na posmičnu čvrstoću glinenih geosintetičkih barijera

Kod upotrebe glinenih geosintetičkih barijera u odlagalištima, pretpostavlja se da će deformacije odlagališta biti dovoljno spore što odgovara dreniranim uvjetima (Gilbert et al. 1996). Međutim, u laboratorijima se često koriste brzi pokusi gdje su brzine posmika između 0,1 i 1 mm/min (Fox et al. 1998; Zornberg et al. 2005; Fox 2010). Razlog leži u kraćem trajanju te posljedično manjoj cijeni ispitivanja. Međutim, to su relativno velike brzine za slabopropusni materijal kao što je bentonitna glina, pa je teško očekivati da će se postići drenirani uvjeti tijekom posmika. Stoga se izvode i pokusi pri znatno manjim brzinama (0,0015 mm/min Zornberg et al. 2005; 0,0003 mm/min Daniel et al. 1993 preuzeto iz Chiu & Fox 2004).

Fox et al. (1998) izvještavaju o utjecaju brzine posmika na vršne i rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće armiranih glinenih geosintetičkih barijera. Ispitivanja su provedena pri brzinama posmika od 0,01; 0,1; 1 i 10 mm/min. Autori navode da su navedene brzine u rasponu standardnih brzina koje se upotrebljavaju kod ispitivanja glinenih geosintetičkih barijera. Navedeno ispitivanje je provedeno kod normalnog naprezanja od 72,2 kPa. Rezultati pokazuju da se obje vrijednosti posmične čvrstoće smanjuju 3-5% po logaritamskom ciklusu vremena. Prema tome, autori zaključuju da brzina posmika armiranih glinenih geosintetičkih barijera ima mali utjecaja na vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće pri ispitivanom normalnim naprezanjima (72,2 kPa). Smanjenje vršne i rezidualne posmične čvrstoće sa smanjenjem brzine posmika autori pripisuju promjeni vrijednosti pornog tlaka u uzorku te pojavi puzanja bentonitne gline i komponenti glinenih geosintetičkih barijera tijekom posmika. Navode da su izmjerene vrijednosti pornih tlakova kod vrijednosti rezidualne posmične čvrstoće bile jednake nuli. Način kao i upitna pouzdanost mjerenja pornih tlakova prethodno su objašnjeni u potpoglavlju 2.3.1.2. Svejedno, uz pretpostavku da su mjerenja pornih tlakova točna, autori zaključuju da je pri tome pojava puzanja bitan ako ne i dominantan faktor. Smanjenje posmične čvrstoće sa smanjenjem brzine posmika bilo je u skladu i s rezultatima ispitivanja nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera koje su objavili Gilbert et al. (1997). Ispitivani su uzorci dimenzija 30x30 cm u izravnom posmiku pri normalnim naprezanjima od 17 do 170 kPa dok su korištene brzine posmika od 0,0005 do 1,0 mm/min.

Kovačević Zelić (2000) provodi ispitivanje utjecaja brzine posmika i načina hidratacije na posmičnu čvrstoću nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera tipa Claymax 200R. Ispitivanja su provedena uz korištenje četiri brzine smicanja (1,219; 0,1219; 0,01219 i

0,00146 mm/min) i dvije različite duljine hidratacije uzoraka (24 h i 9 dana). Kao i kod prethodnih autora, i ovdje se pokazalo da posmična čvrstoća opada sa smanjenjem brzine posmika. Autorica uočava da su anvelope sloma gotovo paralelne za uzorke iste duljine hidratacije a različite brzine posmika. Zaključuje da se kut trenja ne mijenja već dolazi do promjene vrijednosti kohezije s promjenom brzine posmika. Serija s devetodnevnom hidratacijom pokazuje smanjenje oba parametra. Analizom vertikalnih pomaka ustanovljeno je da dolazi do slijeganja svih uzoraka kod brzine 1,219 i 0,1219 mm/min, neovisno o veličini normalnog napreznja i uvjetima hidratacije. Pri brzini 0,01219 mm/min, glinena geosintetička barijera bubri kod normalnih napreznja od 50 kPa, dok se kod ostalih vrijednosti normalnih napreznja sliježe. Pri brzini 0,00146 mm/min, bubre uzorci podvrgnuti normalnim napreznjima od 50 i 100 kPa dok se kod uzoraka podvrgnutih normalnom napreznju od 200 kPa praktički ne vide nikakve promjene vertikalnih pomaka.

Zornberg & McCartney (2009) na temelju podataka studija koje su proveli Eid i Stark (1997), Gilbert et al. (1997), Fox et al. (1998), Eid et al. (1999) i Zornberg et al. (2005) navode moguće razloge pojavi trenda smanjenja posmične čvrstoće sa smanjenjem brzine posmika: izvođenje navedenih ispitivanja pri relativno malim normalnim napreznjima, pojavom pornih tlakova tijekom faze posmika, pojavom puzanja kod bentonitne gline te pojavom trenja u nedreniranim uvjetima kod bentonitne gline s niskom vlažnošću. Kod većih normalnih napreznja ovaj trend se mijenja tj. s rastom brzine posmika smanjuje se posmična čvrstoća (kod normalnih napreznja 520 i 400 kPa). Autori na temelju navedenog zaključuju da manja brzina smicanja ima za posljedicu duže ispitivanje a time i više vremena za dodatnu hidrataciju ili konsolidaciju, ovisno o primijenjenom normalnom napreznju. Manja normalna napreznja mogu rezultirati bubrenjem glinene geosintetičke barijere, pa dulji posmik ostavlja više vremena za bubrenja a time i za smanjenje čvrstoće. Suprotno tome, kod glinenih geosintetičkih barijera ispitivanih pri većim normalnim napreznjima može se očekivati konsolidacija, pa dulji posmik znači veće smanjenje koeficijenta pora uzorka a time i veću čvrstoću.

#### *2.3.1.4 Utjecaj uvjeta hidratacije i vrste ispitne tekućine na posmičnu čvrstoću glinenih geosintetičkih barijera*

Kao jedan od bitnih čimbenika koji utječe na dobivene vrijednosti posmične čvrstoće glinenih geosintetičkih barijera je i priprema uzoraka. Priprema uzoraka podrazumijeva njihovu hidrataciju te ukoliko je potrebno konsolidaciju. Vrijeme hidratacije odnosno vrijeme

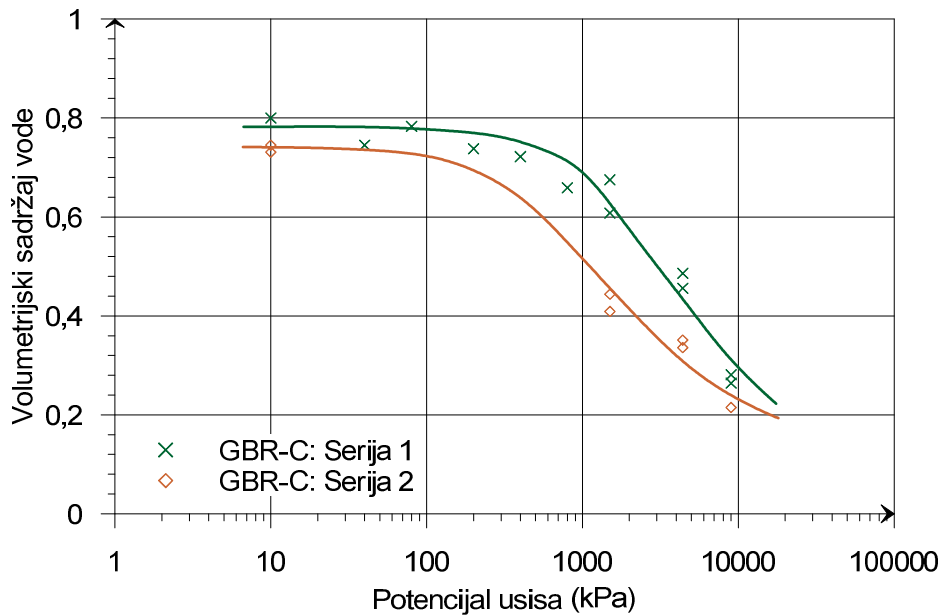
potrebno da se uspostavi ravnoteža (uzorak više ne mijenja vlažnost) može biti i nekoliko tjedana. Lai et al. (1998) navode da je proces hidratacije trajao dva do tri tjedna. Fox et al. (1998) ispituju mogućnost provedbe hidratacije u dvije faze. U prvoj fazi autori dopuštaju slobodno bubrenje odnosno uzorak smještaju u ćeliju bez nanošenja normalnog napreznja. S gornje strane uzorka postavlja se jedino pokrovna pločica koja sprječava nejednoliko bubrenje i koja daje normalno napreznje od 1 kPa. Nakon toga ćelija se stavlja u uređaj za izravni posmik gdje se primjenjuje željeno normalno napreznje kroz 48 sati. Upotrebom dvije faze hidratacije ravnoteža se postiže u roku od 48 sati odnosno kod nekih uzoraka i u roku od 24 sata. Ovakav pristup reducira vrijeme hidratacije u uređaju za izravni posmik bez značajnijih utjecaja na dobivene parametre unutarnje posmične čvrstoće glinene geosintetičke barijere. Autori su također mjerili porne tlakove, te navode da je došlo do disipacije pornih tlakova u drugoj fazi hidratacije kod uzoraka s manjim normalnim napreznjima. Kod većih napreznja porni tlakovi nisu bili u potpunosti disipirani. To pripisuju manjem koeficijentu pora kod većih napreznja te začepljenju igala za mjerenje pornih tlakova. Do istog zaključka dolaze i Zornberg et al. (2005) koji također provode hidrataciju uzoraka u dvije faze uz manje modifikacije. Na uzorak primjenjuju željeno normalno napreznje izvan uređaja za izravni posmik te ga potapaju vodovodnom vodom. Uzorak ostavljaju da se hidratizira do maksimalno 14 dana. Nakon hidratacije, ćeliju s uzorkom prenose na uređaj za izravni posmik gdje se primjenjuje normalno napreznje (obično ista vrijednost kao u fazi hidratacije). Ukoliko je normalno napreznje za vrijeme hidratacije bilo manje od predviđenog za posmik, vrijednost normalnih napreznja se podižu do vrijednosti željene za posmik te se uzorak ostavlja na konsolidaciji. Vrijeme konsolidacije se kretalo od 0-540 sati.

Kovačević Zelić (2000) istražuje utjecaj hidratacije na posmičnu čvrstoću nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera (Claymax 200R). Koristi faze konsolidacije (hidratacije) u trajanju od 24 h i 9 dana. Autorica zaključuje da s duljinom trajanja ispitivanja raste i konačna vlažnost uzoraka te da se posmična čvrstoća smanjuje. Također, veća vlažnost bentonitne gline ima za posljedicu smanjenje kohezije. Autorica pretpostavlja da bi se ova pojava mogla povezati s potencijalom usisa (eng. *suction*) bentonitnih glina. Naime, velike vrijednosti potencijala usisa zabilježene su kod niskih vlažnosti bentonitnih glina (Southen & Rowe 2005). Povećanjem vlažnosti odnosno stupnja zasićenosti pora dolazi do smanjenja potencijala usisa što se očituje smanjenjem negativnih pornih tlakova (Slika 2-14).

Općenito, hidratacija glinene geosintetičke barijere pri manjim normalnim napreznjima uzrokuje bubrenje bentonitne gline, što rezultira povećanjem koeficijenta pora. S druge strane,



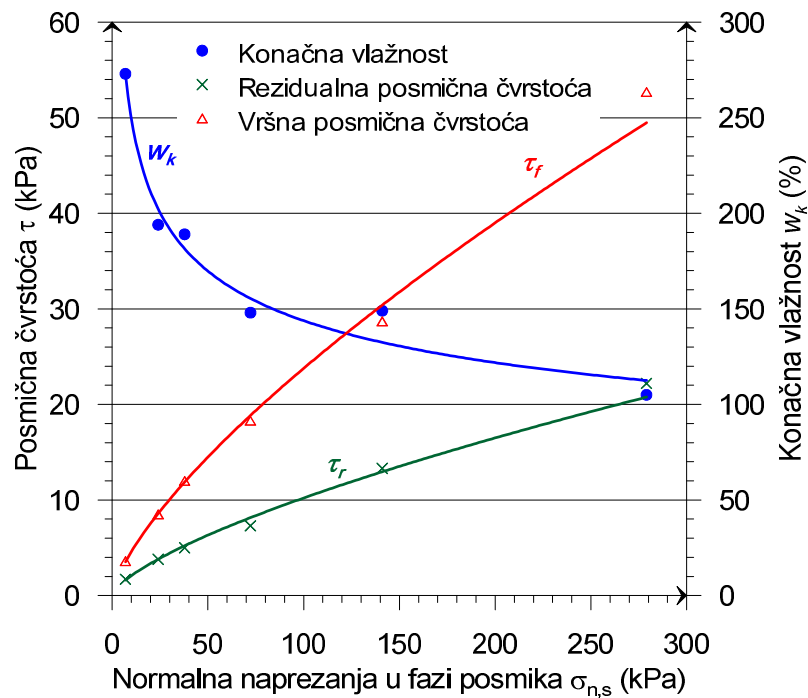
veće vrijednosti normalnih napreznja sprečavaju bubrenje pa je time i posmična čvrstoća veća.



Slika 2-14 Karakteristična krivulja retencije vode glinene geosintetičke barijere (Southen & Rowe 2005)

Slika 2-15 prikazuje rezultate ispitivanja vršne i rezidualne posmične čvrstoće te dobivene srednje vrijednosti konačnih vlažnosti nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera (Claymax 200RW) dobivene tijekom ispitivanja u uređaju za veliki posmik pri različitim vrijednostima normalnih napreznja (Fox et al. 1998).

Ispitna tekućina također utječe na posmičnu čvrstoću glinenih geosintetičkih barijera. Gilbert et al. (1996) ispituju prošivene glinene geosintetičke barijere demineraliziranom vodom i procjednom vodom s odlagališta te dolaze do zaključka da su kod upotrebe demineralizirane vode kao ispitne tekućine vršna i rezidualna posmična čvrstoća najmanje. Ovaj zaključak je u skladu s karakteristikama bentonitne gline kod koje se uslijed ionske izmjene smanjuje udio natrija u međuslojnim prostorima čime se smanjuje bubrivost i koeficijent pora a povećava posmična čvrstoća.



Slika 2-15 Posmične čvrstoće i završne vlažnosti nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim normalnim naprežanjima (modificirano iz Fox et al. 1998)

Pregledom postojećih spoznaja o unutarnjoj posmičnoj čvrstoći glinenih brtvenih barijera mogu se istaknuti najvažniji zaključci i pretpostavke o posmičnoj čvrstoći bentonitne gline.

Literaturni podaci o mjerenjima posmične čvrstoće ukazuju da kod velikih raspona naprežanja anvelopa sloma ima nelinearan karakter što se najviše očituje kod protkanih i nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera (Fox et al. 1998, Zornberg et al. 2005). Na temelju navedenog može se pretpostaviti da će i anvelope sloma bentonitne gline također imati nelinearan karakter te će i vrijednosti parametara čvrstoće ovisiti o odabranom rasponu normalnih naprežanja.

Također se može istaknuti da pregled literature pokazuje približno iste vrijednosti vršnih posmičnih čvrstoća suhih nearmiranih, suhih i hidratiziranih protkanih glinenih geosintetičkih barijera. Nasuprot tome, vršne vrijednosti posmične čvrstoće hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pokazuju znatno manje vrijednosti posmične čvrstoće u odnosu na suho stanje (Fox et al. 1998, Zornberg et al. 2005). Ovdje se može uočiti da doprinos bentonitne gline vršnoj posmičnoj čvrstoći glinene geosintetičke barijere značajno ovisi o njevoj vlažnosti.

Ako se promatra rezidualna posmična čvrstoća može se doći do zaključka da vrsta glinene geosintetičke barijere, odnosno armatura ima neznan utjecaj (Fox et al. 1998). Ovo

ukazuje da će po pitanju rezidualne posmične čvrstoće, unutarnja posmična čvrstoća glinene geosintetičke barijere ovisiti o vlažnosti bentonitne gline.

Pregledom literature također je utvrđen utjecaj brzine posmika na vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće glinenih geosintetičkih barijera. Zornberg & McCartney (2009) navode da manja brzina smicanja ima za posljedicu ukupno duže ispitivanje (faza hidratacije i posmika) a time i više vremena za dodatnu hidrataciju odnosno bubrenje u slučaju normalnih naprezanja manjih od tlaka bubrenja bentonitne gline ili konsolidaciju u slučaju normalnih naprezanja većih od tlaka bubrenja. Moguća hidratacija tijekom posmika ovisiti će također o tome u kojoj se fazi primarnog bubrenja nalazi uzorak. Naime, nakon dostizanja vremena potrebnog za završetak primarnog bubrenja može se pretpostaviti da će se hidratacija uzorka zaustaviti i da će uzorak nakon toga biti u fazi sekundarne kompresije.

### 2.3.2 Hidraulička provodljivost i kompatibilnost bentonitnih glina

Hidraulička provodljivost je fizička veličina koja izražava lakoću toka nekog fluida kroz neki porozni medij. Tok vode kroz zasićeno tlo proučavao je Darcy. Eksperimentalno je dokazao da tijekom laminarnog toka postoji linearna zavisnost između količine toka,  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), i hidrauličkog gradijenta,  $i$  (-), što se može izraziti:

$$Q = -k \cdot i \cdot A \quad (2-3)$$

gdje je  $k$  koeficijent proporcionalnosti odnosno koeficijent hidrauličke provodljivosti (eng. *coefficient of hydraulic conductivity*) ( $\text{m/s}$ ) dok je  $A$  površina poprečnog presjeka okomito na smjer toka vode ( $\text{m}^2$ ). Hidraulički gradijent je definiran padom potencijala,  $dh$  (m) na promatranom putu  $dx$  (m):

$$i = -\frac{dh}{dx} \quad (2-4)$$

Prema tome, izraz za Darcyevu brzinu toka,  $v$  ( $\text{m/s}$ ) glasi:

$$\frac{Q}{A} = v = -k \cdot i \quad (2-5)$$

Darcyjeva brzina toka nije stvarna brzina toka vode kroz tlo. Voda se kreće samo kroz pore tla pa je neto površina toka ustvari neto površina pora u promatranom poprečnom presjeku. Prema tome, stvarna brzina toka,  $v_s$  ( $\text{m/s}$ ) je definirana odnosom:

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (2-6)$$

gdje je  $n$  poroznost tla (-).

Koeficijent hidrauličke provodljivosti iz Darcyevog zakona,  $k$ , ovisi o značajkama medija kroz koji prolazi fluid te o značajkama tog fluida:

$$k = cd^2 \frac{\rho g}{\mu} = K \frac{\rho g}{\mu} \quad (2-7)$$

gdje je  $c$  bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke medija (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pora), a  $d$  je promjer pora kroz koju fluid prolazi (m). Značajke fluida su definirane sa gustoćom fluida,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), te dinamičkim viskozitetom fluida,  $\mu$  (N·s/m<sup>2</sup>), a  $g$  predstavlja akceleraciju sile teže izraženu u m/s<sup>2</sup>.

Izraz:

$$K = cd^2 \quad (2-8)$$

odnosi se na unutrašnju propusnost,  $K$  (eng. *intristic permittivity* ili samo *permittivity*) (m<sup>2</sup>) koja ovisi o veličini pora, geometriji pora te o raspodjeli pora medija.

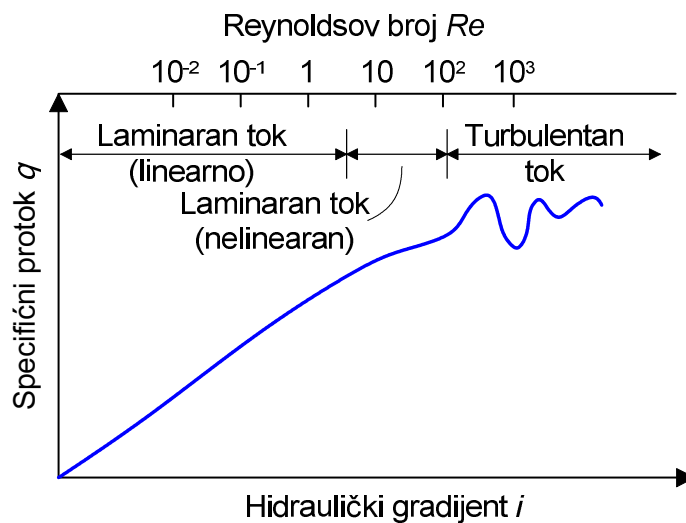
Viskoznost fluida i njegova gustoća ovise o temperaturi pa posredno i koeficijent hidrauličke provodljivosti ovisi o temperaturi. Isto tako na značajke medija te promjer pora utječe stanje i povijest naprezanja pa će na koeficijent hidrauličke provodljivosti posredno utjecati i naprezanja. Kod sitnozrnih tala kojima pripadaju i bentonitne gline kao ekspanzivna tla osim gustoće i viskoznosti i druga svojstva fluida koji prolazi kroz medij mogu značajno utjecati na koeficijent hidrauličke provodljivosti. To mogu biti kemijske i električne značajke fluida što može uzrokovati promjenu oblika zrna i geometrije pora uslijed bubrenja, slijeganja ili disperzije. Osim toga, tok fluida može nastati uslijed gradijenata električnog ili kemijskog potencijala. Također, promjene koncentracije i kemijskog sastava fluida mogu znatno utjecati na strukturu medija što je eksperimentalno dokazano a biti će naknadno prikazano kao čest slučaj kod bentonitnih glina. Lu & Likos (2004) navode da ove pojave mogu dovesti do znatnih odstupanja od Darcyevog zakona prilikom promatranja toka kroz ovu vrstu materijala.

Viskoznost fluida koji protječe kroz neki medij ima izravan utjecaj na način toka u nekom zasićenom ili djelomično zasićenom mediju. Reynoldsov broj se koristi kao kriterij za razdvajanje različitih režima toka a time i kao kriterij primjenjivosti Darcyevog zakona. Reynoldsov broj  $Re$  je bezdimenzionalna veličina definirana gustoćom fluida  $\rho$ , brzinom toka

$v$ , dinamičkom viskoznošću  $\mu$  te dominantnim promjerom pora odnosno dominantnom veličinom pora  $d$ :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2-9)$$

Male vrijednosti Reynoldsovog broja (maje od 10) pokazuju da na tok fluida dominantnu ulogu ima njegova viskoznost te da je tok laminaran i da vrijedi Darcyev zakon. Vrijednosti Reynoldsovog broja veće od 100 pokazuju da na tok fluida kroz neki porozni medij počinje utjecati kinetička energija i inercija te tok vjerojatno postaje turbulentan. Za vrijednosti Reynoldsovog broja manje od 100 a veće od vrijednosti između 1 i 10 tok ostaje laminaran ali se ponaša nelinearno (Bear 1972). Slika 2-16 prikazuje približne granice između različitih režima toka ovisno o Reynoldsovom broju ako je medij tlo. Reynoldsov broj je za većinu slučajeva toka u tlu manji od 1. Međutim, pojava velikih vrijednosti gradijenata može uvjete toka približiti nelinearnom laminarnom režimu ili turbulentnom režimu.



Slika 2-16 Režimi toka kroz porozni medij (Freeze & Cherry 1979<sup>1</sup>)

Za određivanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti zasićenih koherentnih tala u geomehaničkom laboratoriju najčešće se koristi edometar i troosna ćelija. U edometru se koeficijent hidrauličke provodljivosti dobije nametanjem promjenjive razlike tlakova na krajevima uzorka. Glavni nedostaci ovakvog mjerenja su vidljivi pri dugotrajnim pokusima.

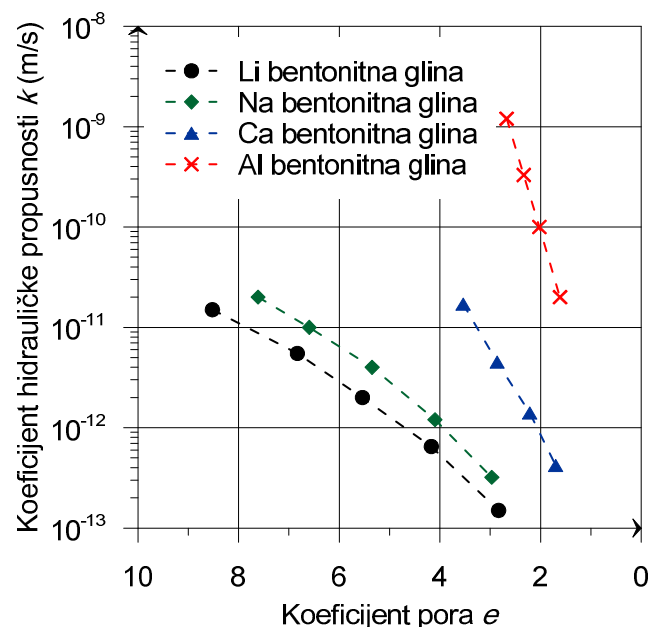
<sup>1</sup> Preuzeto iz Lu i Likos 2004

Kod slabopropusnih materijala kao što su bentonitne gline ne može se točno odrediti kolika je količina tekućine isparila, a kolika je stvarno prošla kroz uzorak.

Uz to, uzorci su ugrađeni u metalni cilindar pa je teško tijekom ispitivanja osigurati nepropusni kontakt između uzorka i stjenke cilindra, odnosno dio vode se može procijediti uz kontakt uzorka i stjenke cilindra pa se uslijed očitavanja prividno većeg protoka dobiva veći koeficijent hidrauličke provodljivosti. Također, u cilindrima se ne mogu dobro kontrolirati naprezanja koja djeluju na uzorak, što je dodatna komponenta koja djeluje na hidrauličku provodljivost. Ispitivanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti u troosnoj ćeliji može se provesti metodom stalne razlike tlakova i metodom zadanog protoka (eng. *flow pump test*). Metoda stalne razlike tlakova koja se provodi u troosnoj ćeliji ima brojne prednosti u odnosu na ispitivanje u edometru metodom promjenjive razlike tlakova. U troosnoj ćeliji uzorak je okružen fleksibilnom membranom koja uslijed djelovanja ćelijskog tlaka tijesno prianja uz stjenke uzorka, čime se sprečava stvaranje kanala za protok vode. Radi se o metodama za određivanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti u zasićenim uvjetima pa je zasićenost uzorka relativno lako osigurati primjenom povratnog tlaka. Nedostatak ove metode, kao i prethodne može se javiti kod jako slabopropusnih tala kao što su bentonitne gline. Naime, ova ispitivanja mogu biti dugotrajna pa promjena temperature ili rast bakterija mogu značajno utjecati na izmjerenu hidrauličku provodljivost (Rosin-Paumier & Touze-Foltz 2012; Francisca & Glatstein 2010). Metoda zadanog protoka je modificirana metoda mjerenja koeficijenta hidrauličke provodljivosti s konstantnom razlikom tlaka. Tekućina se utiskuje u ili izvlači iz uzorka konstantnom brzinom, odnosno zadanim protokom, tijekom čega se prati promjena razlike tlakova na kapi i bazi uzorka. Najistaknutije prednosti ove metode u odnosu na prethodno navedene su u bržem procesu mjerenja te u činjenici da se protok može preciznije nametnuti nego mjeriti kao posljedica nametnute razlike tlakova na krajevima uzorka pa su i rezultati ove metode točniji.

Kako je navedeno glinene geosintetičke barijere se koriste kao hidrauličke barijere u različitim inženjerskim zahvatima, pa je za njih najvažnije svojstvo niske hidrauličke provodljivosti koju osigurava mineralna komponenta odnosno bentonitna glina. Niskoj hidrauličkoj provodljivosti bentonitne gline doprinosi povećanje sadržaja montmorillonita, specifične površine (smanjenje veličine čestica), deficita površinskog naboja, te sadržaj natrija ( $\text{Na}^+$ ) u sustavu izmjene. Utjecaji ovih faktora na kvalitetu bentonitne gline uglavnom su uočljivi makroskopski kroz povećanje kapaciteta ionske izmjene, povećanje plastičnosti, povećanje kapaciteta bubrenja u prisustvu tekućine i smanjenju hidrauličke provodljivosti.

Prema tome, čimbenike koji utječu na hidrauličku provodljivost bentonitnih glina može se izdvojiti na temelju jednadžbe (2-7). Općenito, hidraulička provodljivost će ovisiti o značajkama medija i značajkama fluida. Ako se promatraju značajke medija potrebno je poznavati geometriju i dimenzije pora što ovisi o vrsti tla odnosno veličini i obliku čestica. Kako je teško odrediti geometriju i dimenzije pojedinih pora, poroznost medija se najčešće iskazuje pomoću koeficijenta pora. Slika 2-17 prikazuje promjenu koeficijenta hidrauličke provodljivosti s promjenom koeficijenta pora čija promjena je posljedica promjene efektivnih naprezanja uzorka. Odnosi su prikazani za bentonitne gline s jednom vrstom međuslojnih kationa. Ako se promatra fluid, na hidraulička svojstva će utjecati vrsta fluida ali i temperatura koja utječe na viskoznost fluida.



Slika 2-17 Odnos koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti različitih vrsta bentonitnih glina (Vees & Winterkorn 1967<sup>2</sup>)

Djelovanje vrste fluida na hidraulička svojstva bentonitne gline potrebno je promatrati sa stajališta kemijske kompatibilnosti odnosno trajnosti mineralnih brtvenih barijera izloženih djelovanju različitih vanjskih utjecaja prisutnih kod upotrebe tijekom dugog vremenskog perioda. Provedena su brojna istraživanja u svrhu određivanja kemijske kompatibilnosti bentonitnih glina kao komponente glinenih geosintetičkih barijera ili drugih brtvenih barijera s brojnim varijantama ispitnih tekućina. Pri tome su ispitne tekućine bile u formi

<sup>2</sup> Preuzeto iz Fang & Daniels 2005

demineralizirane vode, jedno- ili više-ionskih otopina, eluata i procjednih tekućina. Djelovanje otopine na hidrauličku provodljivost ovisilo je o njenom sastavu i koncentraciji. Ispitivanja kemijske kompatibilnosti bentonitnih glina određivanjem koeficijenta hidrauličke provodljivosti dugotrajan su i vrlo zahtjevan postupak. U krajnjem slučaju ispitivanje može trajati i tijekom nekoliko godina (Shackelford et al. 2000). Iz ovog razloga obično se nastoji korelacijom različitih svojstava bentonitnih glina (fizikalnih, kemijskih, mineraloških i mehaničkih) definirati indikatore koji bi omogućili bolju selekciju i kontrolu bentonitnih glina prilikom upotrebe u brtvenim barijerama. Jednostavnije rečeno, u prvoj se fazi ispitivanja kompatibilnosti provode upotrebom jednostavnijih metoda, najčešće ispitivanjem indeksnih pokazatelja kao npr. indeksa slobodnog bubrenja, granica plastičnosti i sl. na većem broju uzoraka obzirom da su ranija istraživanja pokazala da promjena indeksnih svojstava upućuje na promjenu koeficijenta hidrauličke provodljivosti. Nakon toga slijedi određivanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti na manjem broju uzoraka.

Upotrebom jednoionskih otopina kao ispitnih tekućina nastojalo se razjasniti djelovanje pojedinih vrsta kationa, koncentracija otopina te pH otopine na hidraulička svojstva glinenih geosintetičkih barijera. Jo et al. (2001) provode ispitivanja utjecaja različitih koncentracija jednoionskih otopina soli, naboja kationa, pH vrijednosti te veličine hidratiziranog kationa na hidraulička svojstva i slobodno bubrenje bentonitne gline. Rezultati XRD analize su pokazali da se radi o bentonitnoj glini koja sadrži 67% montmorillonita, 10% kvarca, 7% kristobalita, 11% plagioklasa, 5% kalcijских feldspata te tragove illita i tinjaca. Granica tečenja bentonitne gline iznosila je  $w_L = 746\%$ , indeks plastičnosti  $I_p = 692\%$  te gustoća čvrstih čestica  $\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$ . Kao ispitna tekućina korištene su otopine NaCl, KCl, LiCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, CuCl<sub>2</sub> i LaCl<sub>3</sub>. Kao referentna tekućina korištena je demineralizirana voda. Koncentracije otopina su bile u rasponu od 0,005-1 mol/l.

Promatrajući djelovanje naboja kationa na hidraulička svojstva bentonitnih glina autori dolaze do spoznaje da se koeficijent hidrauličke provodljivosti povećava s povećanjem naboja kationa u otopini pri istim vrijednostima koncentracija otopine. Utjecaj naboja kationa na koeficijent hidrauličke provodljivosti najveći je pri srednjim vrijednostima koncentracija otopina (0,025-0,1 mol/l). Za koncentracije otopina od 0,025 mol/l, promjena naboja od jednovalentnih do trovalentnih uzrokuje povećanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti od približno tri reda veličine. Kod koncentracije od 0,1 mol/l, ista promjena u naboju uzrokuje povećanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti od šest redova veličine. Kod visokokonzentriranih otopina (1 mol/l), promjena naboja kationa ima mali utjecaj na



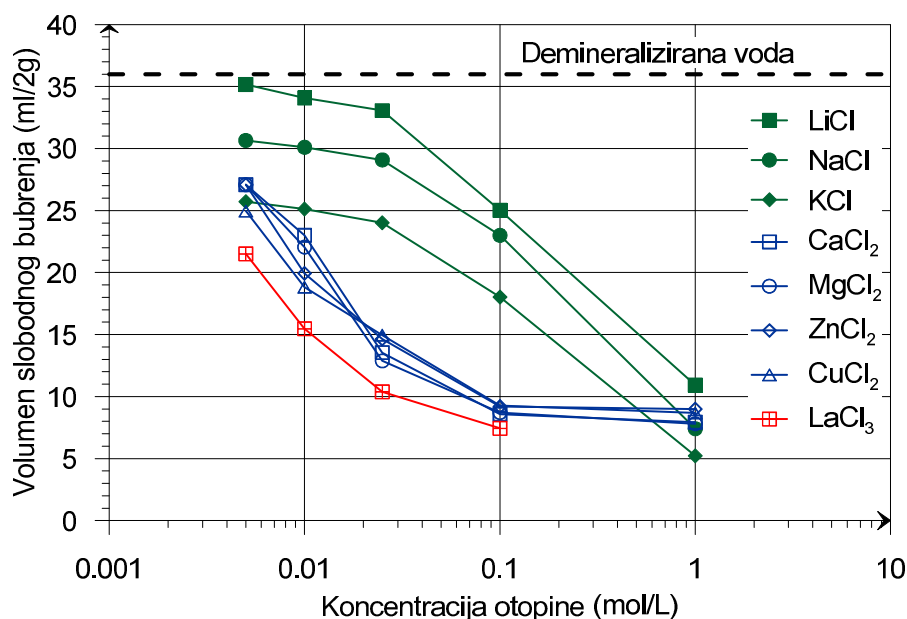
koeficijent hidrauličke provodljivosti, a kod otopina niskih koncentracija koeficijent hidrauličke provodljivosti je ostao gotovo nepromijenjen. Za sve otopine, povećanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti je izraženije kod promjene s otopina soli jednovalentnih kationa u otopine soli dvovalentnih kationa. Povećanje koeficijenta hidrauličke provodljivosti za promjenu naboja s dvovalentnih u trovalentne bilo je manje izraženo. Ustanovljeno je također da je navedeno ponašanje usporedivo s ponašanjem indeksa slobodnog bubrenja. I kod tih ispitivanja, promjena naboja kationa s jednovalentnih u dvovalentne imala je veći utjecaj na indeks slobodnog bubrenja u odnosu na povećanje naboja kationa s dvovalentnih u trovalentne uz iste ostale parametre provedbe pokusa. Utjecaj naboja kationa je također bio naglašen kod srednjih vrijednosti koncentracija.

Promatranjem bubrenja bentonitne gline u otopinama soli jednovalentnih kationa pri istim koncentracijama soli, najveće je bubrenje nastupilo kod  $\text{Li}^+$  a najmanje kod  $\text{K}^+$  (Slika 2-18). Navedeno ponašanje jednovalentnih kationa je posebno uočljivo sa smanjenjem koncentracije otopine te je bilo u skladu s XRD analizama gdje su ispitivani međuslojni razmaci montmorillonita nakon postizanja ravnoteže ulazne i izlazne tekućine s kationima  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  i  $\text{Li}^+$ . Dobiveni međuslojni razmaci su najveći u slučaju djelovanja otopine soli s  $\text{Li}^+$ , srednje vrijednosti za  $\text{Na}^+$  te najmanji za  $\text{K}^+$ . Ukoliko se navedeno uspoređi s radijusima hidratiziranih jednovalentnih kationa (Tablica 2-2) vidljivo je da kod otopina jednovalentnih kationa, otopine s kationima većeg radijusa hidratacije uzrokuju veće bubrenje. Budući da ti kationi tijekom osmotskog bubrenja ispunjavaju veći međuslojni volumen, autori smatraju da je to uzrok pojavi većeg bubrenja odnosno manje hidrauličke provodljivosti. Kod viševalentnih kationa, veličina hidratiziranog kationa imala je vrlo mali utjecaj na bubrenje i koeficijent hidrauličke provodljivosti što su potvrdile i provedene XRD analize gdje su dobiveni međuslojni razmaci montmorillonita gotovo isti bez obzira o kojem se dvovalentnom kationu radilo. Autori smatraju da volumen bubrenja i hidraulička provodljivost nisu u ovisnosti o radijusu hidratacije dvovalentnih i trovalentnih kationa budući da ti kationi doprinose samo intrakristalnom ali ne i osmotskom bubrenju.

Do istog zaključka došli i Alther et al. (1985) istražujući utjecaj naboja kationa i koncentracije anorganskih otopina na hidrauličku provodljivost polimeriziranih i netretiranih bentonitnih glina. Djelovanje otopina dvovalentnih kationa imalo je za posljedicu veću hidrauličku provodljivost bentonitne gline u odnosu na otopine jednovalentnih kationa.

Do sada su provedena brojna istraživanja utjecaja različitih koncentracija otopina na koeficijent hidrauličke provodljivosti glinenih geosintetičkih barijera odnosno bentonitne

gline (McNeil & Coleman 1966; Alther et al. 1985; Gleason et al. 1997 i Petrov et al. 1997). McNeil & Coleman (1966) istraživali su utjecaj koncentracije otopina NaCl i CaCl<sub>2</sub> na hidrauličku provodljivost šest montmorillonitnih tala sa sadržajem montmorillonita od 25 do 48%. Utvrdili su da je kod niskih koncentracija otopina (< 0,02 mol/l) hidraulička provodljivost montmorillonitnih tala tretiranih otopinama NaCl imala 20 puta nižu vrijednost u odnosu na tla tretirana otopinom CaCl<sub>2</sub>. Upotrebom visoko koncentriranih otopina (> 0,6 mol/l), tla su imala približno istu hidrauličku provodljivost bez obzira kojom su od dvije otopine bila tretirana. Do sličnog zaključka dolaze i Alther et al. (1985). Dobivena hidraulička provodljivost bentonitne gline povećavala se s povećanjem koncentracije elektrolita u otopini.



Slika 2-18 Utjecaj naboja kationa na volumen slobodnog bubrenja bentonitne gline (Jo et al. 2001)

Gleason et al. (1997) istražuju svojstva bentonitne gline u svrhu primjene u brtvenim slojevima. Ispitane su granice plastičnosti te koeficijent hidrauličke provodljivosti na tankom sloju bentonitne gline koji je simulirao mineralnu komponentu glinenih geosintetičkih barijera. Bentonitna glina je bila tretirana vodovodnom vodom te otopinom 0,25 mol/l CaCl<sub>2</sub> kod efektivnog napreznja od 35 kPa. Bentonitna glina tretirana otopinom 0,25 mol/l CaCl<sub>2</sub> je pokazala znatno veći koeficijent hidrauličke provodljivosti ( $9,0 \cdot 10^{-9}$  m/s) u odnosu na istu tretiranu vodovodnom vodom ( $6,0 \cdot 10^{-12}$  m/s).

Petrov et al. (1997) ispituju utjecaj različitih koncentracija otopina NaCl na hidrauličku provodljivost protkane glinene geosintetičke barijere. Pri ispitivanju koristili su vertikalna

naprezanja od 35 kPa. Povećanje koncentracije otopine rezultiralo je povećanjem koeficijenta hidrauličke provodljivosti što je prema autorima, uzrokovano smanjenjem volumena vezane vode.

Jo et al. (2001) zaključuju da se općenito koeficijent hidrauličke provodljivosti povećava s povećanjem koncentracije kationa svih soli u otopini, pa čak i u slučaju otopina soli jednovalentnih kationa (Tablica 2-5). Tako primjerice, uzorci glinenih geosintetičkih barijera tretirani s 1 mol/l otopinama soli NaCl, KCl i LiCl imaju znatno više vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti u odnosu na uzorke tretirane s 0,1 mol/l otopinama istih soli.

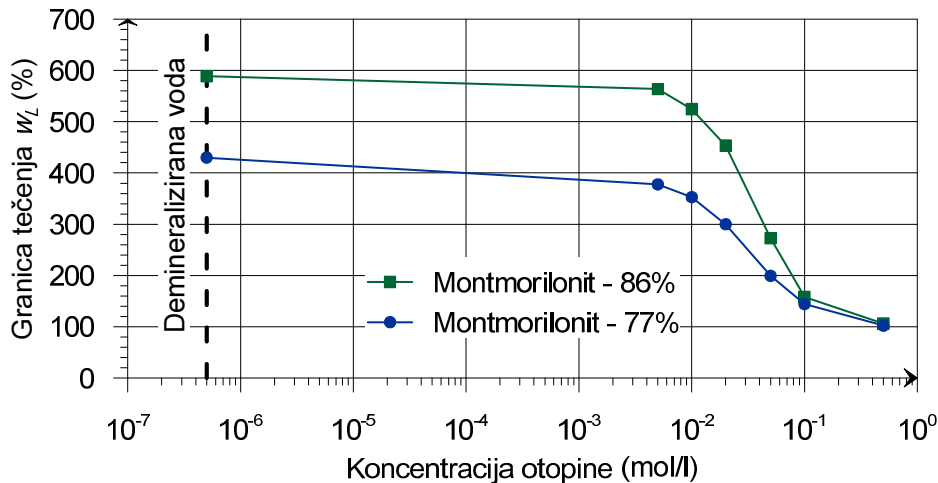
Kod visokih koncentracija (1 mol/l), dobivene su slične vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti ( $> 10^{-5}$  m/s) za sve otopine soli bez obzira na naboj kationa. Slično, kod otopina malih koncentracija dobiveni koeficijent hidrauličke provodljivosti bio je nizak kod svih otopina ( $< 10^{-10}$  m/s). I kod niskih i kod visokih koncentracija ( $\leq 0,01$  ili  $\geq 1$  mol/l), koeficijent hidrauličke provodljivosti je varirao maksimalno jedan red veličine. Prema tome, autori su zaključili da su s visoko koncentriranim otopinama vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti vrlo male u odnosu na referentne vrijednosti dobivene demineraliziranom vodom kao referentnom tekućinom. U ovom slučaju sastav otopine odnosno vrsta kationa u otopini ima neznatan utjecaj na hidrauličku provodljivost.

Tablica 2-5 Vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti kod različitih koncentracije otopina soli jednovalentnih kationa (Jo et al. 2001)

Ispitna tekućina	Koeficijent hidrauličke provodljivosti (m/s)	
	1 mol/l	0,1 mol/l
LiCl	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-12}$
NaCl	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^{-11}$
KCl	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-11}$

Slično se može zaključiti i na temelju rezultata ispitivanja indeksa slobodnog bubrenja i granica plastičnosti. Razlika u volumenu bubrenja dobivena u otopinama kationa različitih naboja najizraženija je kod srednjih vrijednosti koncentracija (0,025 do 0,1 mol/l). Kod visokih koncentracija (1 mol/l), dobiveni su približno isti volumeni bubrenja bez obzira na vrstu kationa u otopini (Slika 2-18). Prema tome, vrijednosti volumena bubrenja su približno iste kod upotrebe visokokonzentriranih otopina pa se može zaključiti da i ovdje vrsta kationa u otopini nema utjecaja na bubrenje.

Djelovanje različitih koncentracija  $\text{CaCl}_2$  na granice plastičnosti dvije vrste bentonitne gline (Slika 2-19) istražuju Lee & Shackelford (2005). Povećanjem koncentracije otopine od  $5 \cdot 10^{-7}$  mol/l (demineralizirana voda) do 0,5 mol/l, granica tečenja se smanjila sa 430 na 106% kod bentonitne gline s manjim udjelom montmorillonita (77 %) odnosno sa 589 na 102% kod bentonitne gline s većim udjelom montmorillonita (86 %). Autori pretpostavljaju da je razlog ovakvom ponašanju zamjena iona  $\text{Na}^+$  ionima  $\text{Ca}^{+2}$  što ima za posljedicu povećanje međulamelarnih sila u strukturi montmorillonita.

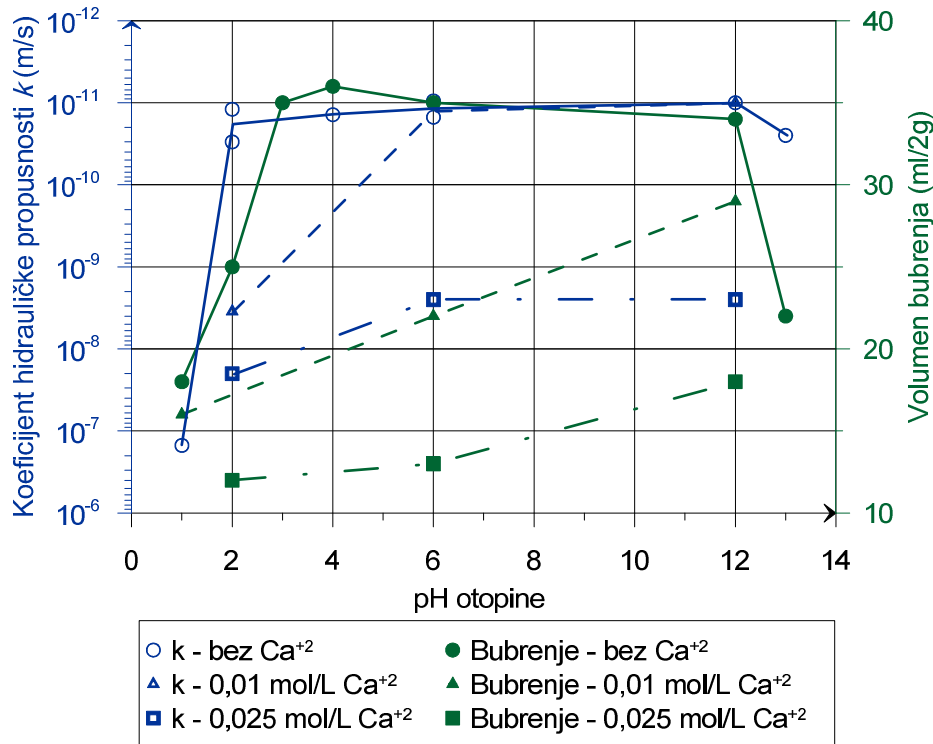


Slika 2-19 Utjecaj koncentracije otopine  $\text{CaCl}_2$  na granicu tečenja bentonitne gline (Lee & Shackelford 2005)

Petrov & Rowe (1997) dolaze do sličnog zaključka. Koncentracija  $\text{NaCl}$  je značajno utjecala na granicu tečenja bentonitne gline, koja je iznosila 530% s demineraliziranom vodom kao ispitnom tekućinom a 139% za 0,6 mol/l otopinu  $\text{NaCl}$  odnosno 96% za 2,0 mol/l otopinu  $\text{NaCl}$ . S eluatom kao ispitnom tekućinom dobivena je granica tečenja od 221% što odgovara vrijednostima dobivenih kod koncentracije otopine od 0,1-0,6 mol/l.

Jo et al. (2001) koriste otopine  $\text{HCl}$  (pH 1, 2 i 4) te otopine  $\text{NaOH}$  ili  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (pH 12 ili 13) s ciljem određivanja utjecaja pH na svojstva bentonitne gline. Demineralizirana voda je korištena kao neutralna otopina s pH 6,5. Otopine s pH 12 ili 13 pripremljene su miješanjem  $\text{NaOH}$  i demineralizirane vode. Na kraju pripreme dobivene su koncentracije kationa  $\text{Na}^+$  0,01 i 0,1 mol/l. Otopina  $\text{CaCl}_2$  s koncentracijama 0,025 i 0,01 mol/l miješana je s  $\text{HCl}$  i  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  s ciljem kombiniranja utjecaja pH i koncentracije. Tako su otopine različite vrijednosti pH (od 2-12) imale koncentraciju kationa  $\text{Ca}^{+2}$  0,025 i 0,01 mol/l. Ispitivanja su pokazala da pH otopine utječe na koeficijent hidrauličke provodljivosti uzoraka glinenih geosintetičkih barijera tretiranih otopinama soli (bez dodanih  $\text{Ca}^{+2}$  kationa) kada je pH vrlo nizak (<2). Za pH od 2 do 12 (Slika 2-20), koeficijent hidrauličke provodljivosti se

kretao u rasponu od  $9,1 \cdot 10^{-12}$  do  $3,0 \cdot 10^{-11}$  m/s. Kod pH = 1,  $k = 1,5 \cdot 10^{-7}$  m/s, a kod pH = 13  $k = 2,2 \cdot 10^{-11}$  m/s. Do istog zaključka dolaze Ruhl i Daniel (1997), jedinu razliku dobivaju za koeficijent hidrauličke provodljivosti kod pH = 13 ( $2,0 \cdot 10^{-8}$  m/s).



Slika 2-20 Utjecaj pH otopine na koeficijent hidrauličke provodljivosti i volumen bubrenja (Jo et al. 2001)

Slični ali manje izražen utjecaj pH na koeficijent hidrauličke provodljivosti Jo et al. (2001) dobivaju kada su otopine sadržavale katione  $\text{Ca}^{+2}$ . Kod tih ispitivanja, pH je utjecao na koeficijent hidrauličke provodljivosti samo kod male vrijednosti (pH=2). Približno iste vrijednosti koeficijent hidrauličke provodljivosti su dobivene za ostale vrijednosti pH kod istih koncentracija. Smanjenu osjetljivost na promjenu pH u 0,01 i 0,025 mol/l kalcijским otopinama autori povezuju s dominantnošću kalcijских kationa na koeficijent hidrauličke provodljivosti bentonitne gline čime se maskira utjecaja pH. Izuzetak je izrazito nizak pH. Autori su slične vrijednosti dobili i za volumen bubrenja. Bentonitna glina je u jako kiselim otopinama bubrila najmanje 17,8 ml/2g, i to neovisno o koncentraciji  $\text{Ca}^{+2}$ , dok je veće bubrenje nastalo u 0,01 mol/l kalcijским otopinama i to kod svih pH u odnosu na 0,025 mol/l kalcijске otopine.

Jo et al. (2001) navode da kiseline i lužine mogu značajno utjecati na kristalnu rešetku minerala glina, s tim da kiseline najčešće djeluju na oktaedrijske mreže a lužine na

tetraedrijske. Smanjenje volumena bubrenja u jakim otopinama kiselina autori pripisuju djelovanju kiseline na  $Al^{+3}$  u oktaedrijskim mrežama montmorillonita odnosno njegovog otapanja s pozicija oktaedrijskih mreža. To rezultira zamjenom  $Al^{+3}$  i  $Na^{+}$  kao zamjenjivog kationa u međuslojnim prostorima čime se smanjuje i volumen vezane vode. Do istog zaključka su došli Mathers et al. (1955). Egloffstein (1994) navodi da se volumen vezane vode može smanjiti razaranjem strukture montmorillonita uslijed djelovanja jakih kiselina ili lužina. Kako bi se otkrilo da li je došlo do izlaska  $Al^{+3}$  iz oktaedrijskih pozicija, Jo et al. (2001) su proveli kemijsku analizu tekućine na izlazu iz uzorka prilikom ispitivanje hidrauličke provodljivosti s jakim kiselinama (otopina pH = 1), demineraliziranom vodom (pH = 6,5) i jakim bazama (pH = 13).  $Al^{+3}$  je pronađen u izlazu kod jakih kiselina (pH = 1) ali ne i u izlazima kod demineralizirane vode i jake baze. Visoke koncentracije silicija su pronađene samo u izlazu s demineraliziranom vodom. Autori navedeno pripisuju otapanju  $Al^{+3}$  kod niskih vrijednosti pH, ali ne i kod visokih pH. Kod pH = 13 autori smatraju da  $Al^{+3}$  tvori komplekse te se kao takav taloži unutar čestice. Kao objašnjenje autori nude visoke koncentracije  $Na^{+}$  iz NaOH. Naime, volumen bubrenja (22,0 ml) dobiven za pH = 13 (koncentracija 0,1 mol/l NaOH) približno odgovara volumenu bubrenja (23 ml) za 0,1 mol/l otopine NaCl (pH = 6,2).

Promatranjem kiselih i bazičnih otopina u koje su dodani kationi  $Ca^{+2}$ , primijećeno je veće bubrenje u 0,01 mol/l kalcijskoj otopini kod svih vrijednosti pH u odnosu na 0,025 mol/l kalcijsku otopinu (Slika 2-20). Također, pH je imao veći utjecaj na bubrenje kod 0,01 mol/l kalcijске otopine u odnosu na 0,025 mol/l kalcijsku otopinu. Volumen bubrenja se konstantno povećavao s povećanjem pH kod 0,01 i 0,025 mol/l kalcijске otopine što je u suprotnosti s rezultatima dobivenim za kisele i bazne otopine bez  $Ca^{+2}$ , gdje se najmanje bubrenje javilo kod najjače kiseline i baze. Povećanje volumena bubrenja nastalo povećanjem pH kod kiselina i lužina s  $Ca^{+2}$  autori pripisuju taloženju  $Ca(OH)_2$  što rezultira sniženjem koncentracije  $Ca^{+2}$  u otopini.

Glinena geosintetička barijera će rijetko biti u doticaju s jednoionskim otopinama tijekom svog životnog vijeka. Uglavnom će to biti procjedne tekućine i druge višeionske otopine. Kolstad et al. (2004) istraživali su utjecaj višeionskih otopina soli na glinenu geosintetičku barijeru koja je sadržavala bentonitnu glinu s 86% montmorillonita. Za ispitivanja su koristili višeionske otopine koncentracije 0,05-0,5 mol/l. Odnos koncentracija jednovalentnih i dvovalentnih kationa u otopini *RMD* varirao je od  $0-1,97 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}^{1/2}$ . *RMD* se definira kao odnos:

$$RMD = \frac{c_M}{\sqrt{c_D}} \quad (2-10)$$

gdje je  $c_M$  ukupna koncentracija monovalentnih kationa u otopini a  $c_D$  ukupna koncentracija dvovalentnih kationa u otopini. Autori su pripremili kombinirane otopine različitih soli:  $\text{Li}^+\text{-Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+\text{-Mg}^{+2}$  i  $\text{Li}^+\text{-Na}^+\text{-Ca}^{+2}\text{-Mg}^{+2}$ . Za otopine s  $RMD < 0,35 \text{ mmol/l}^{1/2}$  navode da se mogu smatrati otopinama s pretežno dvovalentnim kationima (otopina s potpuno dvovalentnim kationima  $RMD = 0 \text{ mol/l}^{1/2}$ ), a s  $RMD > 0,90 \text{ mmol/l}^{1/2}$  pretežno jednovalentnim. Otopine s vrijednošću RMD-a između ove dvije vrijednosti smatraju da imaju podjednak udio jednovalentnih i dvovalentnih kationa. Autori dolaze do zaključka da je kod manjih koncentracija otopine ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti i volumena bubrenja o RMD-u veća. Pri tome su dobivene vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti i volumena bubrenja gotovo identične. Drugim riječima, RMD otopine ima veći utjecaj na hidrauličku provodljivost kod otopina niske ionske koncentracije u odnosu na otopine većih koncentracija gdje se taj utjecaj smanjuje. Iznimka su samo ispitivanja kod otopina koncentracije 0,1 mol/l, gdje se uočavaju odstupanja od navedenog trenda. Autori nisu mogli objasniti razlog ovom odstupanju. Rezultati su u skladu s prethodno navedenim rezultatima Jo et al. (2001) o dominantnom utjecaju koncentracije otopine na hidraulička svojstva bentonitne gline. Također, Kolstad et al. (2004) dolaze do zaključka da veličina hidratiziranog kationa u višeionskim otopinama nema značajan utjecaj na koeficijent hidrauličke provodljivosti i volumen bubrenja bentonitne gline. Autori navedeno ponašanje pripisuju dvovalentnim kationima u čijem se prisustvu smanjuje mogućnost pojave osmotskog bubrenja pa je njihov utjecaj dominantan na koeficijent hidrauličke provodljivosti i bubrenje.

Ruhl & Daniel (1997) ispituju utjecaj procjednih tekućina na hidrauličku provodljivost glinenih geosintetičkih barijera. Pri tome su koristili tri različita uvjeta hidratacije pri efektivnom naprezanju od 35 kPa. Ispitna tekućina su bile eluati i procjedne tekućine komunalnog odlagališta otpada, odlagališta opasnog otpada, odlagališta pepela, HCl i NaOH. Glinena geosintetička barijera tretirana eluatom pripremljenim kao procjedna tekućina s odlagališta komunalnog otpada (0,15 mol/l octene kiseline; 0,15 mol/l natrij acetata, 0,0007 mol/l salicilne kiseline i 1000 mg/l  $\text{Ca}^{+2}$ ) imala je hidrauličku provodljivost u granicama od  $10^{-8}$  do  $10^{-7}$  m/s, dok je glinena geosintetička barijera tretirana procjednom tekućinom iz odlagališta komunalnog otpada imala znatno manji koeficijent hidrauličke provodljivosti ( $10^{-10}$  do  $10^{-12}$  m/s). U slučaju tretiranja glinene geosintetičke barijere izravno s 0,1 mol/l HCl (pH = 1) i 0,1 mol/l NaOH (pH = 13), vrijednost dobivenog koeficijenta hidrauličke provodljivosti

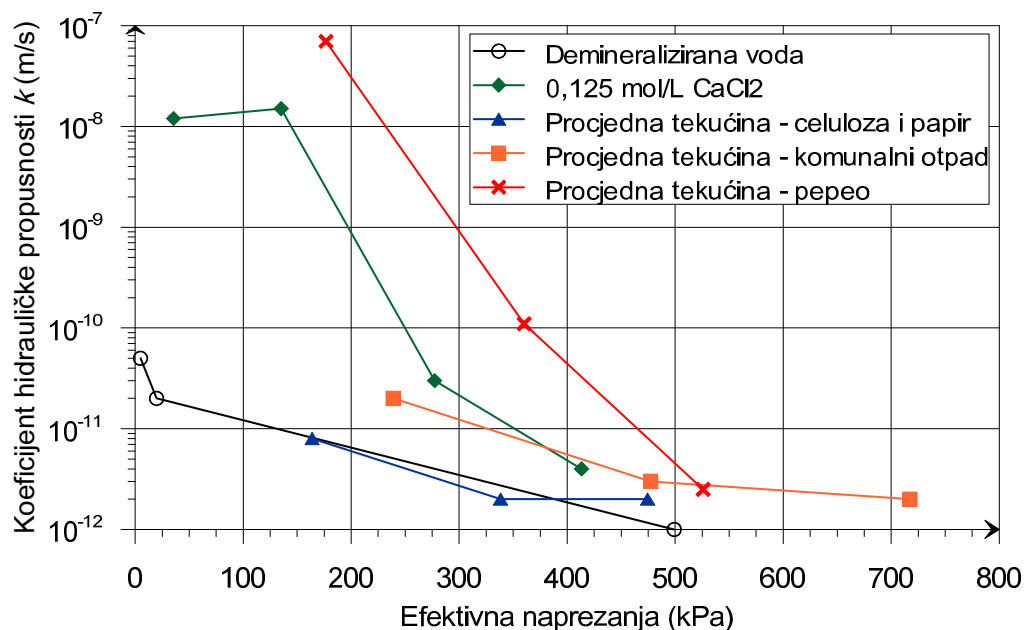
se kretala od  $10^{-8}$  do  $10^{-9}$  m/s. Autori dolaze do zaključka da procjedna tekućina iz odlagališta komunalnog otpada koja sadrži podjednake količine jednovalentnih i viševalentnih kationa sadrži i razne čestice i mikroorganizme što uzrokuje začepljenje pora u bentonitnoj glini. Navedenu pojavu su detaljnije razjasnili Shackelford et al. (2000). Oni su prezentirali da uzorci tretirani procjednim tekućinama odlagališta komunalnog otpada (Ruhl & Daniel 1997) vjerojatno nisu došli do ravnoteže ulazne i izlazne tekućine u trenutku prekida ispitivanja, te da se znatno veće vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti mogu dobiti ukoliko se ravnoteža uspostavi za što zbog začepljenja mikroorganizmima treba znatno više vremena. Tako Jo et al. (2005) istražuju utjecaj otopina soli ( $\text{NaCl}_2$ ,  $\text{KCl}$  i  $\text{CaCl}_2$ ) na trajnost glinenih geosintetičkih barijera odnosno na njihovu dugoročnu hidrauličku provodljivost. Promatrani su utjecaj koncentracije i naboja kationa u otopini te utjecaj kriterija prekida ispitivanja na hidrauličku provodljivost glinenih geosintetičkih barijera. Pojedini uzorci su ispitivani dulje od dvije godine kako bi se zadovoljio kriterij prekida ispitivanja odnosno do postizanja ravnoteže ulazne i izlazne tekućine. Dugoročna hidraulička provodljivost kod djelovanja 0,1 mol/l  $\text{NaCl}_2$  i  $\text{KCl}$  otopina bila je 2 puta manja u odnosu na dobivenu s demineraliziranom vodom kao ispitnim fluidom. Kod slabijih otopina soli dvovalentnih kationa ( $\text{CaCl}_2 \leq 0,02$  mol/l), hidraulička provodljivost glinenih geosintetičkih barijera je u početku bila mala ( $\approx 2,0 \cdot 10^{-11}$  m/s) te bez promjene u prve 0,2 godine tijekom kojeg razdoblja je izmjeren protok ispitne tekućine kroz uzorak jednak 3-15 volumena pora uzorka. Nakon tog razdoblja, hidraulička provodljivost se postepeno povećavala te je nakon zadovoljenja kriterija prekida ispitivanja ona bila prosječno  $3,0 \cdot 10^{-10}$  m/s pri čemu je koncentracija iona  $\text{Na}^+$  u izlazu je bila neznatna. Hidraulička provodljivost glinenih geosintetičkih barijera tretiranih jačim otopinama soli dvovalentnih kationa ( $\text{CaCl}_2 \leq 0,05$  mol/l) bila je znatno veća ( $1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s) u odnosu na dobivene vrijednosti s demineraliziranom vodom pri čemu treba napomenuti da je ravnoteža ulazne i izlazne tekućine nastupila gotovo odmah nakon početka ispitivanja.

Autori također zaključuju da je kod tretiranja glinenih geosintetičkih barijera otopinama soli, neophodno postići ravnotežu ulazne i izlazne tekućine. Tako hidraulička provodljivost glinenih geosintetičkih barijera dobivena u skladu sa standardnim kriterijima za prekid ispitivanja prema ASTM D 5084 ili ASTM D 6766 može biti 2-13 puta viša u odnosu na hidrauličku provodljivost gdje kao kriterij prekida ispitivanja koristi ravnotežu ulazne i izlazne tekućine što je najviše izraženo kod slabijih otopina soli dvovalentnih kationa ( $\leq 0,02$  mol/l). Norma ASTM D 6766 kao kriterij ravnoteže ulazne i izlazne tekućine uvjetuje da vrijednost omjera pH ulazne i izlazne tekućine te električne provodljivosti ulazne i izlazne



tekućine mora biti  $< 0,1$ . Pri tome su dobivene vrijednosti hidrauličke provodljivosti do tri puta veće u odnosu na dobivene vrijednosti kada se kao kriterij za prekid ispitivanja koristi potpuna ravnoteža.

Thiel & Criley (2005) istražuju hidrauličku provodljivosti djelomično prehidratiziranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim vrijednostima efektivnih naprežanja. Pri tome kao ispitnu tekućinu koriste tri vrste procjednih tekućina: s odlagališta komunalnog otpada, odlagališta celuloze u papirnoj industriji te s odlagališta pepela nastalog spaljivanjem komunalnog otpada. Ukupno otopljena tvar u procjednoj tekućini odlagališta komunalnog otpada iznosi 11000 mg/l, odlagališta celuloze 12000 mg/l i odlagališta pepela 50000 mg/l s tim da procjedna tekućina odlagališta celuloze ima znatno veći udio jednovalentnih kationa u odnosu na procjednu tekućinu odlagališta komunalnog otpada. Navedene vrijednosti hidrauličke provodljivosti uspoređene su s vrijednostima dobivenim korištenjem demineralizirane vode i otopine  $\text{CaCl}_2$  koncentracije 0,125 mol/l kao ispitne tekućine. Rezultati pokazuju smanjenje hidrauličke provodljivosti s rastom efektivnih naprežanja odnosno smanjenjem koeficijenta pora (Slika 2-21).



Slika 2-21 Vrijednosti hidrauličke provodljivosti glinene geosintetičke barijere pri različitim vrijednostima efektivnih naprežanja (Thiel & Criley 2005)

Povećanjem efektivnih naprežanja dolazi do smanjenja hidrauličke provodljivosti u svim slučajevima s tim da je kod upotrebe procjedne tekućine odlagališta pepela ta promjena najveća. Promjena hidrauličke provodljivosti kod procjedne tekućine odlagališta celuloze je

najmanja. Autori dolaze do zaključka da odnos između hidrauličke provodljivosti i efektivnih naprezanja ovisi o kemijskom sastavu ispitne tekućine. Međutim, prelaskom vrijednosti efektivnih naprezanja od 400 do 500 kPa osjetljivost hidrauličke provodljivosti glinene geosintetičke barijere na ispitnu tekućinu se znatno smanjuje pa i prestaje. Navedeni zaključak je u skladu s istraživanjima koja se provode za ispitivanja brtvenih barijera u odlagalištima radioaktivnog otpada. Naime, kod velikih zbijenosti bentonitnih glina (suhe gustoće od približno 1,54-1,64 g/cm<sup>3</sup>) što bi odgovaralo efektivnim naprezanjima od nekoliko megapaskala kemijski sastav ispitne tekućine ima neznatan utjecaj na hidrauličku provodljivost i tlak bubrenja bentonitne gline (Karland 1998; Wang et al. 2012).

Pregledom postojećih spoznaja o hidrauličkim svojstvima bentonitne gline i glinenih geosintetičkih barijera mogu se ukratko istaknuti najvažniji zaključci o bubrenju i hidrauličkim svojstvima bentonitne gline.

Općenito, hidraulička provodljivost bentonitne gline ovisiti će o njenoj poroznosti i o značajkama fluida. Pri tome se poroznost najčešće iskazuje pomoću koeficijenta pora. Ako se promatra fluid, na hidraulička svojstva će utjecati vrsta fluida ali i temperatura koja utječe na viskoznost fluida. Djelovanje fluida na hidraulička svojstva bentonitne gline promatra se sa stajališta kemijske kompatibilnosti odnosno trajnosti bentonitne gline izložene djelovanju različitih vanjskih utjecaja prisutnih kod upotrebe tijekom dugog vremenskog perioda. Ovdje će se ukratko opisati kako značajke fluida poput koncentracije, pH vrijednosti otopine te vrste kationa u otopini mogu utjecati na svojstva bentonitne gline (prvenstveno hidraulička).

Promatrajući djelovanje koncentracije otopine može se zaključiti da se koeficijent hidrauličke provodljivosti povećava s povećanjem koncentracije kationa neovisno o sastavu otopine (Jo et al. 2001). Navedeno je u skladu s opisom dvostrukog difuznog sloja u poglavlju 2.1 gdje je navedeno da će rast koncentracije otopine uzrokovati smanjenje debljine difuznog sloja. Pri tome visoko koncentrirane otopine u potpunosti onemogućavaju stvaranje difuznog sloja.

Promatrajući djelovanje pH otopine može se zaključiti da je djelovanje izraženo samo kod većih ili manjih vrijednosti pH (Jo et al. 2001). Ovo se objašnjava dvjema činjenicama. Prvo, rastom ili smanjenjem pH vrijednosti raste koncentracija vodikovih ili hidroksidnih iona a veća koncentracija otopine opet znači smanjenje debljine difuznog sloja. Drugo, Jo et al. 2001 navode da ekstremne vrijednosti pH ( $\text{pH} < 1$  ili  $\text{pH} > 12$ ) mogu značajno utjecati na kristalnu rešetku minerala glina odnosno može doći do promjena u oktaedrijskoj ili tetraedrijskoj mreži.

Vrsta kationa u otopini također utječe na hidraulička svojstva bentonitne glina. Pojava dvovalentnih kationa u otopini uzrokuje ionsku izmjenu jednovalentnih međuslojnih kationa što ima za posljedicu smanjuje mogućnosti pojave osmotskog bubrenja (Kolstad et al. 2004) odnosno izostanak difuznih slojeva. Kod jednovalentnih kationa hidratacijski radijus odnosno veličina hidratiziranog kationa također utječe na hidraulička svojstva. Povećanjem hidratacijskog radijusa, kationi tijekom osmotskog bubrenja ispunjavaju veći međuslojni volumen što se makroskopski očituje povećanjem bubrenja i smanjenjem koeficijenta hidrauličke provodljivosti. Promatrajući djelovanje naboja kationa na hidraulička svojstva bentonitnih glina jasna je razlika u ponašanju bentonitne gline kada su u pitanju jednovalentni odnosno dvovalentni kationi. Jo et al. (2001) također dolaze do spoznaje da daljnjim povećanjem naboja kationa dolazi do smanjenja bubrenja odnosno povećanja koeficijenta hidrauličke provodljivosti.

Prethodno naveden utjecaj značajki fluida na bubrenje i hidraulička svojstva bentonitne gline svakako treba promatrati u cjelini sa značajkama medija odnosno njegovom poroznošću. Poroznost odnosno koeficijent pora u ovom slučaju bentonitne gline, ovisiti će o njoj zbijenosti i efektivnim naprezanjima. Thiel i Criley (2005) dolaze do zaključka da odnos između hidrauličke provodljivosti i efektivnih naprezanja ovisi o kemijskom sastavu ispitne tekućine što je u skladu s prethodno navedenim zaključcima. Međutim, porastom efektivnih naprezanja iznad 500 kPa osjetljivost hidrauličke provodljivosti glinene geosintetičke barijere na ispitnu tekućinu znatno se smanjuje pa i prestaje. Do istog zaključka dolaze i Karland 1998; Wang et al. 2012 uočivši da kod velikih zbijenosti bentonitnih glina koje odgovaraju efektivnim naprezanjima od nekoliko megapaskala kemijski sastav ispitne tekućine nema primjetan utjecaj na hidrauličku provodljivost i tlak bubrenja bentonitne gline.

Na temelju navedenog se kao opći zaključak može navesti da će djelovanje otopine na bubrenje i hidrauličku provodljivost bentonitne gline ovisiti o sastavu i koncentraciji otopine ali i o efektivnim naprezanjima.

### **2.3.3 Konsolidacijske karakteristike bentonitne gline**

Uslijed djelovanja opterećenja na tlo dolazi do njegovog deformiranja. Pri tome deformacija može biti trenutna i konsolidacijska (primarna konsolidacija i puzanje kao sekundarna konsolidacija). Ostvarena deformacija će ovisiti o svojstvima tla, uvjetima dreniranja i povijesti naprezanja. Sitnoznata tla u što spadaju i bentonitne gline zbog svoje slabe hidrauličke provodljivosti imaju izraženu komponentu konsolidacijske deformacije i

puzanja. Naime, kada se optereti zasićeno deformabilno tlo kao što je bentonitna glina, u početku fluid prenosi opterećenje obzirom da se radi o relativno nestišljivom mediju pogotovo u usporedbi s deformabilnošću strukture tla što dovodi do generiranja pornog pretlaka. Dreniranjem vode iz pora dolazi do smanjenja pornog pretlaka i prijenosa opterećenja na skelet tla. Jednostavnije rečeno, volumna deformacija tla nastala tijekom procesa konsolidacije jednaka je volumenu istisnute vode iz pora. Teoriju konsolidacije razradio je K. Terzaghi dvadesetih godina prošlog stoljeća. Neke od bitnih pretpostavki ove teorije su da se promjena volumena odnosno deformacija događa samo u jednom smjeru odnosno vertikalno pa se još naziva i teorija jednodimenzionalne konsolidacije, zatim da se radi o homogenom zasićenom mediju pri čemu su skelet medija i fluid nestišljivi te da vrijedi Darcy-ev zakon odnosno da je tok laminaran.

Puzanje ili sekundarna konsolidacija je definirana kao smanjenje volumena tla uslijed konstantnog djelovanja opterećenja. Nastaje nakon primarne konsolidacije odnosno nakon prijenosa opterećenja s fluida na skelet i smatra se da je posljedica promjene orijentacije čestica skeleta i deformacije samog skeleta.

U nastavku su ukratko opisana istraživanja pojave bubrenja i konsolidacije glinenih geosintetičkih barijera. Hewitt et al. (1997) izvještavaju o edometarskim pokusima provedenim u skladu s normom ASTM D 2435. Ispitivanja su provedena na uzorcima armiranih glinenih geosintetičkih barijera: Bentofix NW i Claymax 506 SP. Bentofix NW je protkani tip glinene geosintetičke barijere s aktiviranim natrijskom bentonitnom glinom dok je Claymax 506 SP prošiveni tip glinene geosintetičke barijere s prirodnim natrijskom bentonitnom glinom kao mineralnom komponentom. Uzorci Claymax-a nisu uključivali linije prošivanja pa ih se kao takve može usporediti s bubrenjem bentonitne gline. Uzorci su ugrađivani u ćeliju nakon rezanja s originalnom vlažnošću (eng. *as received*). Nakon ugradnje uzorci su opterećeni normalnim naprežanjem tijekom 48 sati. Završetkom ove faze uvedena je vodovodna voda nakon čega je promatrana promjena volumena uzoraka u uvjetima jednodimenzionalne kompresije sve do postizanja približno stabilnog stanja. Pokusi su provedeni za raspon vertikalnog opterećenja od 6,9-344,8 kPa.

Za navedeni raspon normalnih naprežanja Hewitt et al. dolaze do zaključka da uzorci Claymax 506 SP postižu najmanje 90% ukupnog pomaka u roku do 10 dana. Porastom normalnih naprežanja smanjivao se ostvareni ukupni pomak, završna vlažnost ali i vrijeme potrebno za postizanje stabilnog stanja. U pokusu bubrenja pri najvećem normalnom

naprezanju od 344,8 kPa zapaženo je da se uzorci nakon dodavanja vode još neko vrijeme sliježu a tek naknadno počinju bubriti.

Uzorci prošivane glinene geosintetičke barijere su ostvarili za oko 50% manje ukupne pomake kao i manje završne vlažnosti, međutim vrijeme potrebno za stabilizaciju bubrenja je ostalo približno isto, do 10 dana. Autori smatraju da su uzrok navedenom ponašanju protkane niti koje sprečavaju bubrenja a time i smanjuju vrijednosti završne vlažnosti. Obzirom da se radi o dvije glinene geosintetičke barijere s dvije potpuno različite vrste mineralne komponente (aktivirana i prirodna natrijska bentonitna glina) teško je razdvojiti doprinos armaturnih niti od doprinosa mineralne komponente smanjenju bubrenja kod ove dvije vrste glinenih geosintetičkih barijera. Tablica 2-6 prikazuje rezultate ispitivanja bubrenja u edometru.

Petrov et al. (1997) provode ispitivanja bubrenja u edometru te hidrauličke provodljivosti prošivane glinene geosintetičke barijere. Ispitivanja su provedena na originalnim uzorcima prošivanih glinenih geosintetičkih barijera te na uzorcima kojima su prekinute armaturne niti s ciljem definiranja utjecaja armaturnih niti na bubrivost i hidrauličku provodljivost. Mineralna komponenta ugrađena u glinenu geosintetičku barijeru je prirodni natrijski bentonitna glina s približno 91% smektita, 5% kvarca, 3% feldspata i 1% karbonata. Kapacitet ionske izmjene je iznosio 85,8 meq/100g, a udio  $\text{Na}^+$  kao zamjenjivog kationa 69,7%. Uzorci su bili opterećivani normalnim napreznjima od 3-400 kPa. Nakon nekoliko minuta, kada je završilo početno slijeganje, uzorci su potopljeni destiliranom vodom nakon čega je započeto mjerenje vertikalnih pomaka do stabilizacije. Početna vlažnost uzoraka je iznosila približno 8%.

Autori dolaze do zaključka da postoji linearna veza između završne vlažnosti i završne visine uzoraka odnosno završnog koeficijenta pora uzorka s prerezanim armaturnim nitima. Odnos završne vlažnosti i normalnih napreznja je nelinearan. Međutim, ukoliko se odnos završnog koeficijenta pora ili završne visine uzorka stavi u polulogaritamsko mjerilo s normalnim napreznjima, funkcijska ovisnost se može aproksimirati s dva pravca s graničnim normalnim napreznjem od 25 kPa. Pravac do 25 kPa ima veći nagib pa to konkretno znači i da je ovisnost završne vlažnosti kao i završnog koeficijenta pora o normalnim napreznjima veća. Od 25 kPa do 400 kPa pravac je manjeg nagiba pa će i normalna napreznja manje utjecati na završnu vlažnost i završni koeficijent pora. Ispitivanja bubrenja na uzorku s armaturnim nitima pokazuju utjecaj niti na smanjenje bubrenja kao i na smanjenje završne vlažnosti i završnog koeficijenta pora. Ova pojava je bila posebno izražena kod manjih normalnih napreznja gdje je bubrenje bilo praktično potpuno limitirano duljinom armaturnih

nitima. Navedeno je vidljivo i iz rezultata bubrenja, završna visina uzoraka kod normalnih napreznja od 3 i 6 kPa iznosila je u oba slučaja oko 13 mm, dok je kod uzorka s prerezanim armaturnim nitima završna visina bila približno 21 mm kod normalnog napreznja od 3 kPa odnosno približno 18 mm kod 6 kPa (Tablica 2-6).

Tablica 2-6 Rezultati ispitivanja bubrenja u edometru (Hewitt et al. 1997; Petrov et al. 1997; Kovačević Zelić 2000)

Normalno napreznje (kPa)	Debljina uzorka (mm)			Vert. pomak (mm)		Vert. deformacija		Vlažnost	
	Početna	Nakon kompresije	Nakon bubrenja	Tijekom kompresije	Tijekom bubrenja	Tijekom kompresije	Tijekom bubrenja	Početna	Nakon bubrenja
6,9*	6,561	6,440	12,220	0,121	-5,780	1,84%	89,8%	7,9%	246,5%
34,5*	6,934	6,587	10,907	0,347	-4,320	5,00%	65,6%	15,7%	207,7%
69,0*	6,942	6,582	9,733	0,360	-3,151	5,19%	47,9%	15,2%	171,8%
137,9*	6,139	5,856	7,713	0,283	-1,857	4,60%	31,7%	6,7%	130,0%
206,9*	6,147	5,854	6,979	0,293	-1,125	4,80%	19,2%	6,8%	115,4%
344,8*	6,104	5,867	6,279	0,237	-0,412	3,88%	7,0%	7,0%	91,5%
3**	6,30	6,30	20,92	0,00	-14,62	0,0%	232,1%	8,0%	464,0%
6**	6,47	6,47	17,51	0,00	-11,04	0,0%	170,6%	8,0%	395,0%
25**	5,88	5,70	9,78	0,18	-4,08	3,1%	71,6%	8,0%	196,0%
50**	6,08	5,72	8,83	0,36	-3,11	5,9%	54,4%	8,0%	152,0%
75**	6,12	5,62	7,91	0,50	-2,29	8,2%	40,7%	8,0%	139,0%
100**	6,16	5,55	7,38	0,61	-1,83	9,9%	33,0%	8,0%	111,0%
150**	5,66	4,93	6,12	0,73	-1,19	12,9%	24,1%	8,0%	102,0%
200**	5,99	5,16	6,04	0,83	0,88	13,9%	17,1%	8,0%	83,0%
400**	5,79	4,56	4,80	1,23	-0,24	21,2%	5,3%	8,0%	63,0%
0***	5,46	-	14,20	-	-8,735	-	160,0%	53,1%	-
25***	5,40	-	6,82	-	-1,420	-	26,3%	54,6%	-
100***	5,10	-	5,56	-	-0,459	-	9,0%	36,9%	-

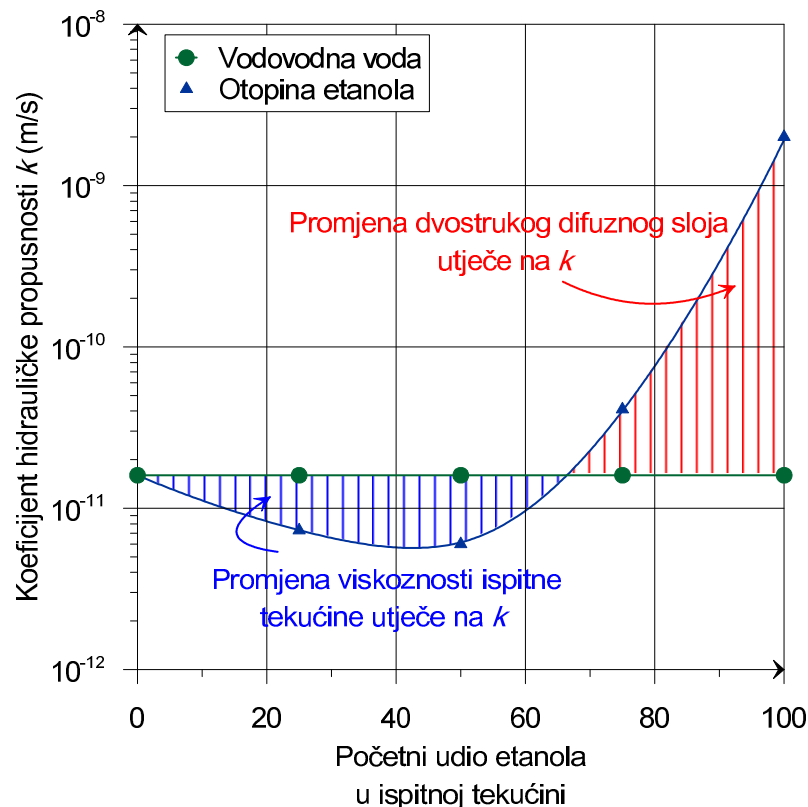
\* izvor Hewitt et al. (1997), fluid vodovodna voda, uzorak Claymax 506 SP bez armaturnih nitima;

\*\* izvor Petrov et al. (1997), fluid destilirana voda, prošivena glinena geosintetička barijera s prerezanim armaturnim nitima;

\*\*\* izvor Kovačević Zelić (2000), fluid vodovodna voda, uzorak Claymax 200R (nearmirana glinena geosintetička barijera).

Autori su ispitivanja hidrauličke provodljivosti također provodili u edometarskim ćelijama. Pri tome su promatrali hidrauličku provodljivost za različite ispitne tekućine: demineraliziranu i vodovodnu vodu te otopine etanola u različitim postocima (25%, 50%, 75% i 100% etanola). Uzorci su prije ispitivanja hidrauličke provodljivosti bili hidratizirani

vodovodnom vodom nakon čega je uslijedilo mjerenje hidrauličke provodljivosti s odabranom tekućinom. Kriterij za prekid ispitivanja je bilo postizanje maksimalne razlike u koncentraciji ulazne i izlazne tekućine od približno 5%. Vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti su pokazale da kod manjih koncentracija etanola u otopini, dominantan utjecaj na koeficijent hidrauličke provodljivosti ima viskoznost fluida odnosno ispitne tekućine (Slika 2-22). Kako etanol ima veću viskoznost od vode, kod manjih koncentracija (25% i 50%) dobivene su manje vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti bentonitne gline, kod vodovodne vode  $k = 1,6 \cdot 10^{-11}$  m/s, kod 25% etanola  $k = 7,3 \cdot 10^{-12}$  m/s a kod 50% etanola  $6,0 \cdot 10^{-12}$  m/s.



Slika 2-22 Djelovanje otopine etanola na koeficijent hidrauličke provodljivosti. Vrijednosti su dobivene kod normalnog naprezanja od 35 kPa (Petrov et al. 1997)

Kod većih koncentracija etanola, dominantnu ulogu na hidraulička svojstva mineralne komponente ima djelovanje etanola na dvostruki difuzni sloj što rezultira znatnim povećanjem hidrauličke provodljivosti: kod 75% etanola  $k = 4,1 \cdot 10^{-11}$  m/s a kod 100% etanola  $2,0 \cdot 10^{-9}$  m/s. Ispitivanja su provedena pri normalnim naprezanjima od 35 kPa. Djelovanje etanola na bentonitnu glinu je dokumentirano i nakon izgradnje uzorka. Naime uzorci kod kojih su korištene 75% i 100% otopine etanola nakon izgradnje su bili svijetlo sive boje, vidljivo flokulirani, zrnate i suhe teksture. Ako se promatra djelovanje etanola na završni koeficijent pora, za razliku od koeficijenta hidrauličke provodljivosti, s povećanjem udjela etanola (25%,

50%, 75% i 100%) završni koeficijent pora kontinuirano se smanjivao te je iznosio 3,04; 2,72; 2,78 i 2,46.

Kako je ranije navedeno Kovačević Zelić (2000) provodi i standardna ispitivanja jednodimenzionalne konsolidacije u edometru s različitim ciklusima opterećenja i rasterećenja. Prvi uzorak (bubrio je bez nanošenja normalnih naprezanja) podvrgnut je inkrementima opterećenja od 12-800 kPa. Drugi uzorak (bubrio pri normalnom naprezanju od 25 kPa) podvrgnut je inkrementima opterećenja od 50-800 kPa a treći uzorak (bubrio pri normalnom naprezanju od 100 kPa) bio je podvrgnut inkrementima opterećenja od 200-1600 kPa. Pri tome su neke faze opterećenja trajale i dulje od 24 sata obzirom da su padale u dane vikenda. Sve faze rasterećenja su trajale 24 sata. Koeficijent konsolidacije  $c_v$  određen je dvjema metodama: Cassagrandeovom i Taylor-ovom metodom. Uočene su odstupanja u vrijednostima koeficijenta konsolidacije dobivenim ovim dvjema metodama što je posebno došlo do izražaja u početnim inkrementima opterećivanja uzoraka. Autorica smatra da su rezultati dobiveni Taylor-ovom metodom točniji. Zaključak obrazlaže činjenicom da su tijekom ugradnje uzoraka rađene određene prilagodbe, koje su kasnije uzrokovale greške u mjerenjima vertikalnih pomaka na početku pojedinog inkrementa opterećenja. Cassagrandeova metoda koristi početni dio krivulje za određivanje koeficijenta konsolidacije pa je greška ove metode veća. Rezultati pokazuju da povećanjem vertikalnih naprezanja opada koeficijent konsolidacije što znači da se istovremeno smanjuje i stišljivost uzorka  $m_v$ . Ukoliko se dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije usporede s ispitivanjima hidrauličke provodljivosti glinenih geosintetičkih barijera, dolazi se do istog zaključka. Veća normalna naprezanja uzrokuju smanjenje koeficijenta pora a time i koeficijenta hidrauličke provodljivosti. Vrijednosti koeficijenta konsolidacije su se kretale od otprilike 0,0005  $\text{cm}^2/\text{min}$  za inkrement opterećenja 800-1600 kPa do 0,0065  $\text{cm}^2/\text{min}$  za inkrement opterećenja 0-12 kPa.

Lin & Benson (2000) istražuju bubrenje ugrađujući sloj prirodne natrijske bentonitne gline debljine približno 8 mm u posebno izrađenom uređaju. Naveden je mineraloški sastav bentonita: 67% montmorilonita, 10% kvarca, 7% kristobalita, 11% plagioklasa, 5% kalij feldspata i ostatak minerala u tragovima. Kao ispitne tekućine korištene su destilirana voda, vodovodna voda i otopina soli  $\text{CaCl}_2$ . Normalna naprezanja su iznosila 0,68 kPa. Rezultati su pokazali da kod destilirane vode kao ispitne tekućine ravnoteža nije postignuta ni nakon 17 dana odnosno uzorak je i dalje bubrio samo smanjenim intenzitetom. Inače, debljina mineralne komponente u glinenoj geosintetičkoj barijeri iznosi približno 5-6 mm dok u ovom

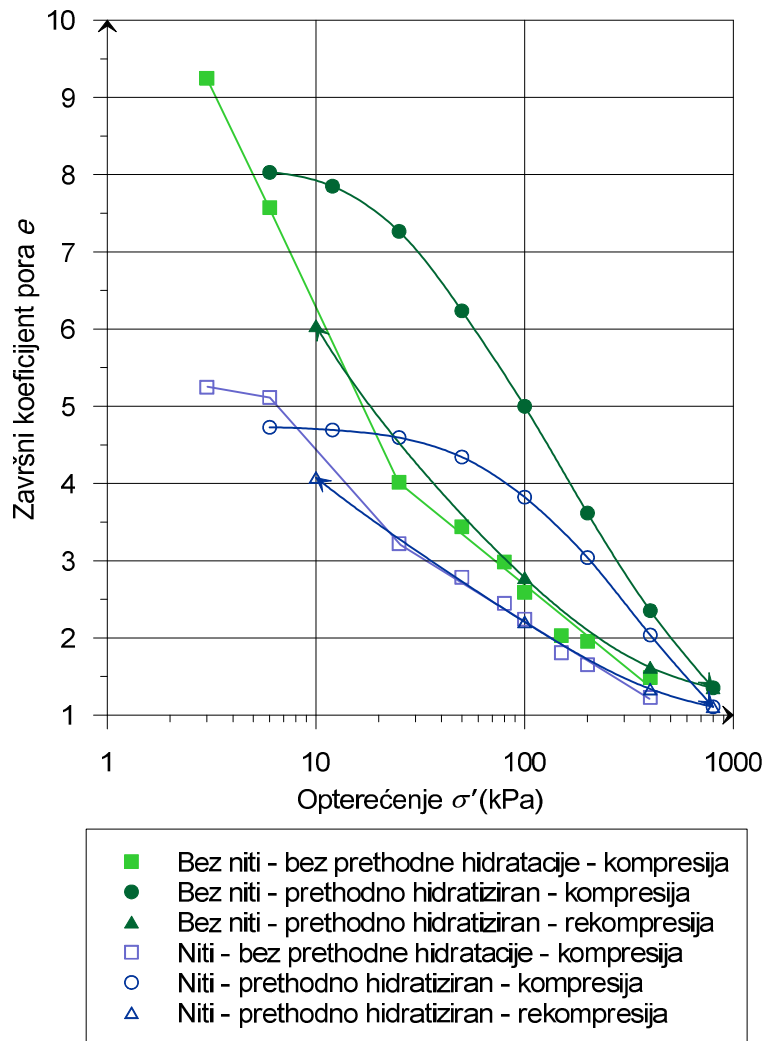


slučaju autori imaju nešto veću debljinu mineralne komponente u pokusu. Može se zaključiti da će vrijeme i intenzitet bubrenja ovisiti ne samo o mineraloškom sastavu mineralne komponente i o ispitnoj tekućini već i o debljini mineralne komponente što je u skladu i s teorijom konsolidacije.

Pusch & Schomburg (1999) istražuju djelovanje mikrostrukture neporemećenih i umjetno pripremljenih uzoraka bentonitne gline na njenu hidrauličku provodljivost. Ispitivanja su provedena na Friedland glini sljedećeg mineraloškog sastava: smektiti 38-53%, kvarc 21-36%, feldspati 5%, karbonati 0,2-5%, muskovit 7-18% i kloriti + kaoliniti 6-16%. Kao zamjenjivi kation prevladava  $\text{Na}^+$ . Neporemećeni uzorci su uzeti iz rudnika s dubine od 30 m i imali su gustoću  $1910 \text{ kg/m}^3$  i prirodnu vlažnost 28,5%. Poremećeni, umjetno pripremljeni uzorci su dobiveni zbijanjem praha također na gustoću od  $1910 \text{ kg/m}^3$  s vlažnošću 3%. Pri tome je postotak prolaza praha kroz sito otvora 1 mm bila 100%. U prvom koraku autori su ispitivali mikrostrukturu ove dvije vrste uzoraka pomoću transmisijskog elektronskog mikroskopa (TEM) pri čemu su opterećenim uzorcima povećavali zasićenost vodom. Razlika u mikrostrukturi je bila jasno vidljiva. Prirodni neporemećeni uzorci su bili homogene strukture dok su umjetno pripremljeni uzorci bili nehomogene strukture s čestim pojavama kanala odnosno šupljina ispunjenih mekim glinenim gelom približne dimenzije 5-10  $\mu\text{m}$ . Koeficijent hidrauličke provodljivosti ispitivan je uz primjenu hidrauličkog gradijenta od 35. Prvih 11 dana kao ispitna tekućina korištena je destilirana voda, nakon toga 8 dana 3,5% otopina soli  $\text{CaCl}_2$  a nakon toga opet demineralizirana voda kroz 16 dana. Dobiveni rezultati su pokazali da je hidraulična provodljivost prirodnih neporemećenih uzoraka manja u odnosu na hidrauličku provodljivost umjetno pripremljenih uzoraka i to bez obzira na vrstu ispitne tekućine. Također, promjena hidrauličke provodljivosti uvođenjem otopine soli  $\text{CaCl}_2$  manje je izražena kod prirodnog neporemećenog uzorka u odnosu na umjetno pripremljen uzorak. Navedeno se povezuje s mikrostrukturom ove dvije vrste uzoraka. U odnosu na homogenu strukturu prirodnog neporemećenog uzorka, umjetno pripremljeni se sastoji od zrna visoke gustoće i mekog gela u porama između njih. Prema tome, hidraulička provodljivost bentonitne gline će svakako ovisiti i o njenoj mikrostrukturi obzirom da se u glinene geosintetičke barijere bentonitna glina ugrađuje u obliku granula ili praha različitog granulometrijskog sastava.

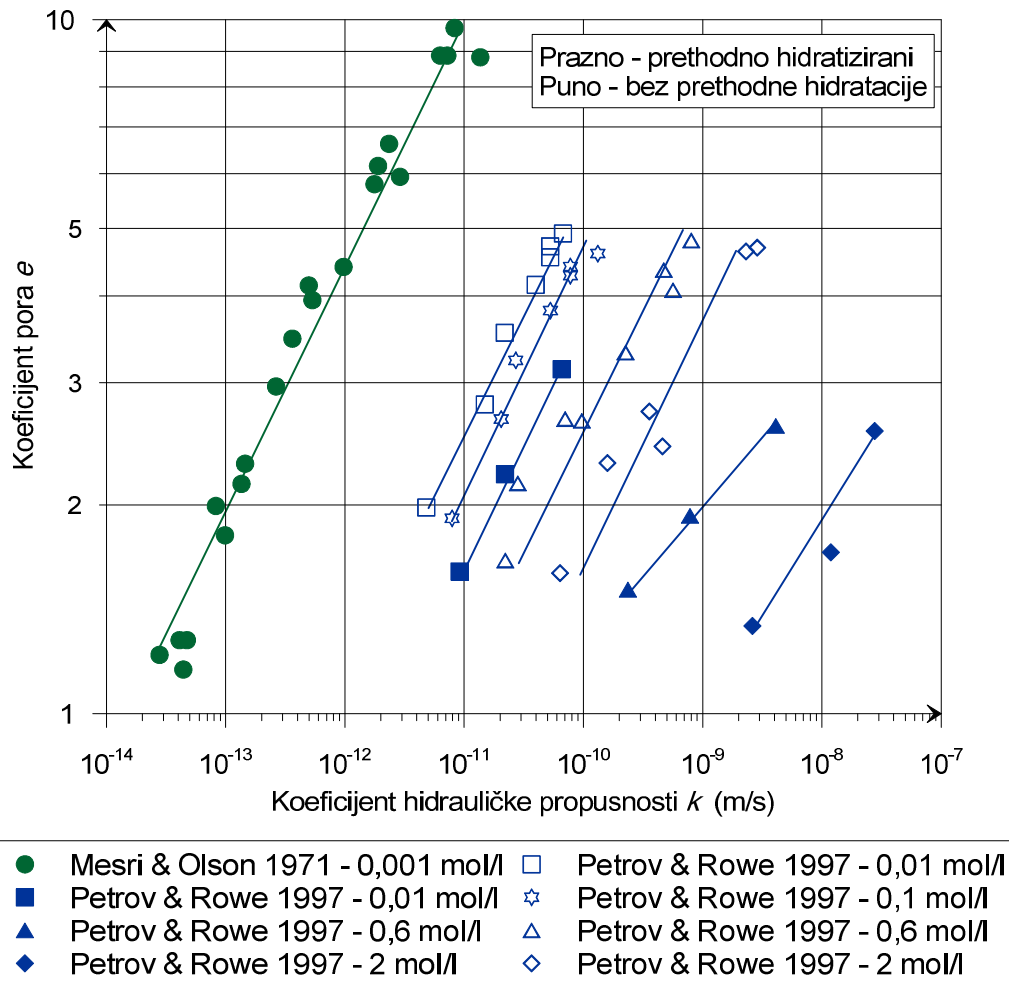
Petrov & Rowe (1997) provode ista ispitivanja na istoj vrsti uzoraka kao i Petrov et al. (1997) s tim da u ovom slučaju koriste destiliranu vodu, različite koncentracije otopina soli  $\text{NaCl}$  i umjetno pripremljen eluat kao ispitne tekućine. Pri tome također provode pokuse

bubrenja i jednodimenzionalne konsolidacije s destiliranom vodom kao ispitnom tekućinom. Koriste dvije procedure ispitivanja. U prvom slučaju glinena geosintetička barijera se opterećuje bez prethodne hidratacije (pokusi bubrenja pod opterećenjem) nakon čega se dodaje destilirana voda i prati bubrenje uzorka do konstantne visine. U drugom slučaju uzorak se opterećuje sa 6 kPa te dodaje destilirana voda. Uzorak tako bubri do konstantne visine. Nakon toga slijedi postupno opterećivanje uzorka u inkrementima (standardni pokusi konsolidacije), nanošenjem dvostruko većeg opterećenja svakih 48 sata. Cilj ispitivanja je bio odrediti utjecaj prethodne hidratacije uzoraka na završni koeficijent pora. Naime, u praksi, glinene geosintetičke barijere mogu biti namjerno djelomično hidratizirane prije ugradnje, mogu se hidratizirati djelovanjem padalina ili djelovanjem susjednih slojeva (podinskih ili krovinskih). Ovisno o tome da li je glinena geosintetička barijera prvo opterećena pa onda hidratiziran ili je situacija obrnuta ovisit će i njegovo dalje ponašanje. Ovim pristupom, željelo se dobiti donju i gornju granicu koeficijenta pora. Slika 2-23 prikazuje utjecaj prethodne i naknadne hidratacije na završni koeficijent pora glinenih geosintetičkih barijera sa i bez armaturnih niti. Pokusi konsolidacije pokazuju da uzorak bez armaturnih niti bubrio pod opterećenjem od 6 kPa do završnog koeficijenta pora od 8,03 (za to je bilo potrebno 47 dana). Uzorak s armaturnim nitima bubrio je do završnog koeficijenta pora od 4,7. Uzorak bez armaturnih niti pokazuje prividno prekonsolidacijsko naprezanje  $\sigma_p' = 25$  kPa i indeks kompresije  $c_c = 2,15$ . Završni koeficijent pora pri opterećenju od 800 kPa iznosio je 1,37. Uzorak s armaturnim nitima imao je prividno prekonsolidacijsko naprezanje od 70 kPa i indeks kompresije 1,46. Također je vidljivo da se krivulja rasterećenja dobro poklapa s krivuljom bubrenja pod opterećenjem. Autori navode da je najveća razlika u koeficijentima pora vidljiva kod opterećenja od 25 kPa kod uzorka bez armaturnih niti odnosno u rasponu od 50-100 kPa kod uzorka s armaturnim nitima. Za uzorak bez armaturnih niti to znači razliku u hidrauličkoj provodljivosti od jednog reda veličine ( $3 \cdot 10^{-11}$  do  $3 \cdot 10^{-10}$  m/s) dok je za uzorak s armaturnim nitima promjena u hidrauličkoj provodljivosti manja ( $1,8 \cdot 10^{-11}$  do  $4,5 \cdot 10^{-11}$  m/s). Navedeno pokazuje značajan utjecaj prethodne hidratacije na koeficijent pora a time i na hidrauličku provodljivost koja je vezana za koeficijent pora. Autori zaključuju da postoji linearnu veza hidrauličke provodljivosti u logaritamskom mjerilu i koeficijenta pora u linearnom mjerilu. Pri tome su nagibi pravaca podjednaki osim kod otopina s najvišim koncentracijama NaCl, gdje se povećanjem koncentracije nagib pravca smanjivao. Navedeno se slaže sa zaključcima Mesri & Olson (1971) koji su također pokazali da postoji direktna linearna ovisnost hidrauličke provodljivosti u logaritamskom mjerilu i koeficijenta pora također u logaritamskom mjerilu za uzorke monominerala montmorillonita (Slika 2-24).



Slika 2-23 Utjecaj postupka hidratacije na završni koeficijent pora glinenih geosintetičkih barijera sa i bez armaturnih niti (Petrov & Rowe 1997)

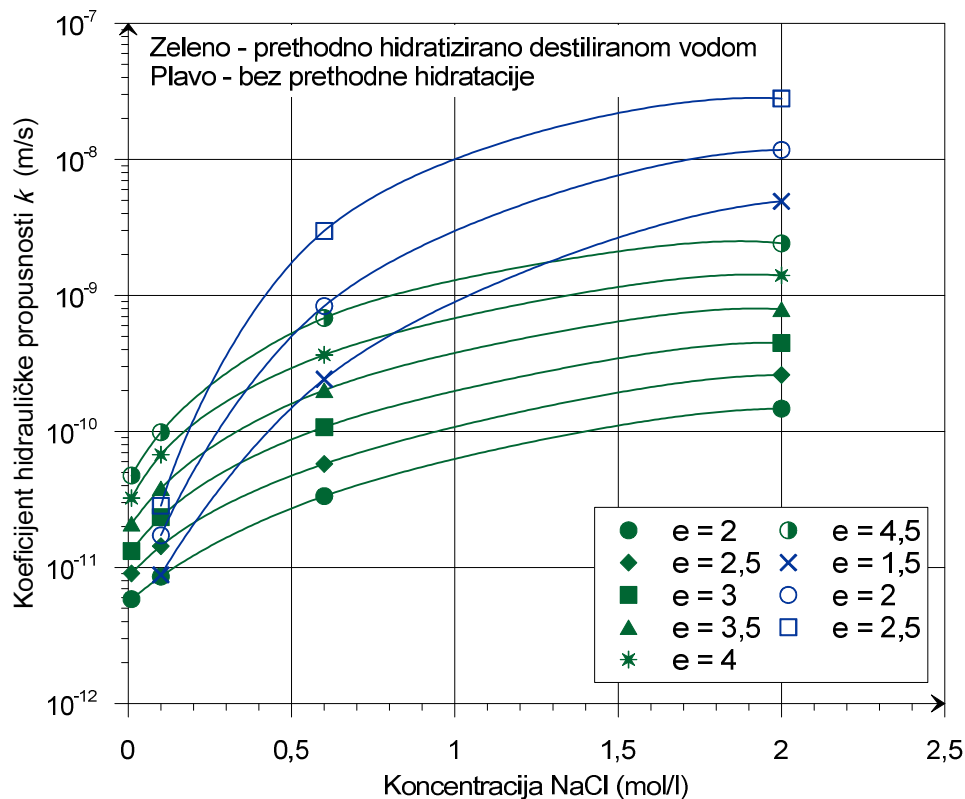
Petrov & Rowe (1997) su također proveli istraživanje utjecaja različitih efektivnih naprezanja i različitih koncentracija otopina soli NaCl na hidrauličku provodljivost navedenih uzoraka protkane glinene geosintetičke barijere. Pri tome su ispitivanja proveli pri efektivnim naprezanjima od 3, 35 i 110 kPa (Slika 2-24). Koncentracije otopina soli NaCl su iznosile 0,01; 0,1; 0,6 i 2 mol/l. Destilirana voda je korištena kao referentna tekućina te kao fluid za prethodnu hidrataciju glinene geosintetičke barijere. U prvom slučaju, uzorak je opterećen odabranim efektivnim naprezanjem nakon čega je započelo mjerenje koeficijenta hidrauličke provodljivosti s odabranom otopinom dok je u drugom slučaju, uzorak prvo hidratiziran destiliranom vodom kod malog efektivnog naprezanja nakon čega je započelo mjerenje hidrauličke provodljivosti s odabranom otopinom. Rezultati pokazuju promjenu hidrauličke provodljivosti pri konstantnim vrijednostima završnog koeficijenta pora (Slika 2-25).



Slika 2-24 Odnos hidrauličke provodljivosti bentonitne gline s različitim koncentracijama otopina soli NaCl i koeficijenta pora

Autori objašnjenje nalaze u razdvajanju djelovanja promjene koeficijenta pora kao posljedice promjene stanja naprezanja i promjene debljine dvostrukog difuznog sloja kao posljedice promjene koncentracije otopine. U slučaju prethodno hidratiziranih uzoraka destiliranom vodom, za promjenu završnog koeficijenta pora sa 2 na 4,5 hidraulička provodljivost je porasla za 1,5 do dva reda veličine. Isti rast hidrauličke provodljivosti uslijedio je i za promjenu koncentracije otopine soli NaCl sa 0,01 do 2 mol/l. U slučaju uzoraka koji nisu prethodno hidratizirani destiliranom vodom, za promjenu završnog koeficijenta pora od 1,5 na 2,5 hidraulička provodljivost je porasla za oko jedan reda veličine dok je za promjenu koncentracije otopine soli NaCl sa 0,1 do 2 mol/l hidraulička provodljivost porasla 2,5 do 3 reda veličine. Može se zaključiti da u slučaju prethodne hidratacije destiliranom vodom (Slika 2-25), promjena završnog koeficijenta pora i promjena koncentracije podjednako utječu na hidrauličku provodljivost dok u slučaju kada je uzorak

izravno tretiran ispitnom tekućinom, debljina dvostrukog difuznog sloja znatno više utječe na hidrauličku provodljivost od promjene koeficijenta pora.



Slika 2-25 Odnos hidrauličke provodljivosti bentonitne gline i koncentracije otopine NaCl za različite vrijednosti završnog koeficijenta pora (Petrov & Rowe 1997)

Kodikira & Rahman (2002) istražuju utjecaj konsolidacije uzoraka uslijed povećanja hidrauličkih gradijenata na izmjerene vrijednosti hidrauličke provodljivosti zasićenih uzoraka u troosnom uređaju. Za usporedbu su provedene i analitičke parametarske analize. Uzorci su bili pripremljeni zbijanjem dvije vrste gline, s tim da je jedna vrsta imala dominantan udio smektita (> 50%). Kao ispitna tekućina korištena je demineralizirana voda. Kod istih uvjeta izvođenja pokusa, povećanjem gradijenta s 28 na 300, autori zapažaju smanjenje hidrauličke provodljivosti za oko 21,1 % kod tla s dominantnim udjelom smektita (sa  $6,54 \cdot 10^{-11}$  na  $5,16 \cdot 10^{-11}$  m/s). Kod druge vrste tla, s udjelom smektita od 10-30%, povećanje gradijenta s 28 na 300 imalo je za posljedicu smanjenje hidrauličke provodljivosti za oko 29,2 % (sa  $6,55 \cdot 10^{-11}$  na  $4,64 \cdot 10^{-11}$  m/s). Autori navode da je vidljiv relativno mali utjecaj promjene hidrauličkog gradijenta na koeficijent hidrauličke provodljivosti za navedeni raspon, s tim da se s povećanjem udjela smektita taj utjecaj smanjuje. Veći udio smektita je također utjecao na veću granicu tečenja i indeks plastičnosti materijala te na veću stišljivost. Promatranjem odnosa koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti u logaritamskom mjerilu

dobiven je linearni odnos za obje vrste tla. Pri tome je indeks koeficijenta hidrauličke provodljivosti  $c_k$  (nagib navedenog pravca) za tlo bogatije smektitom iznosio 0,16 dok je za tlo s manjim udjelom smektita iznosio 0,10.

Baille et al. (2010) prikazuje rezultate istraživanja stišljivosti i hidrauličkih svojstava zasićene bentonitne gline. Ispitivanja provode u posebno konstruiranom edometarskom uređaju s rasponom naprežanja od 100 kPa do 25 MPa. Kao ispitnu tekućinu upotrebljavaju demineraliziranu vodu. Radilo se o uzorcima bentonitne gline s oko 60% montmorillonita, granicom tečenja 178% i kapacitetom ionske izmjene od 74 meq/100g. Udio dvovalentnih kationa na zamjenjivim pozicijama je bio 88% a ostatak su bili jednovalentni kationi. Početna vlažnost je bila 9,5%. Kao ispitna tekućina je korištena demineralizirana voda. Uočavaju da početna zbijenost značajno utječe na indeks kompresije bentonitne gline, dok je utjecaj na indeks rekompresije znatno manji. Funkcijska ovisnost indeksa kompresije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti s koeficijentom pora pokazuje bilinerani karakter kod uzoraka koji nisu pripremljeni zbijanjem. Tako je indeks kompresije  $c_c$  za raspon naprežanja od 10 do 400 kPa iznosio 1,88, dok je  $c_c$  za raspon naprežanja od 800 kPa do 21 MPa iznosio 0,53. Kod zbijenih uzoraka navedeni odnosi pokazuju linearan karakter. Autori zaključuju da je koeficijent hidrauličke provodljivosti općenito veći kod uzoraka pripremljenih zbijanjem iako ne navode razlog ovom zaključku. Promatrajući koeficijent konsolidacije  $c_v$ , autori dolaze do zaključka da se smanjuje s povećanjem naprežanja odnosno sa smanjenjem koeficijenta pora. Do promjene u ponašanju ovih dvaju vrsta uzoraka dolazi kod velikih opterećenja. Kod uzoraka koji nisu prethodno pripremani zbijanjem  $c_v$  nakon 3 MPa počinje rasti. Kod uzoraka pripremanih zbijanjem, ovisno o zbijenosti, daljnjim povećanjem opterećenja on ostaje relativno konstantne vrijednosti.

Kang & Shackelford (2010) provode istraživanje konsolidacijskih karakteristika glinenih geosintetičkih barijera u troosnom uređaju pri izotopnom stanju naprežanja. Mineralna komponenta glinene geosintetičke barijere sastojala se od 71% montmorillonita, 7% illita/smektita, 15% kvarca i 7% ostalih minerala. Granica tečenja je iznosila 487% a granica plastičnosti 39%. Na temelju Terzaghijeve teorije konsolidacije analitički određuju koeficijent hidrauličke provodljivosti čije vrijednosti zatim provjeravaju dobivenim vrijednostima u uređaju za troosni posmik. Dolaze do zaključka da se hidraulička provodljivost smanjuje s povećanjem efektivnih naprežanja te da se poklapaju vrijednosti teorijski i eksperimentalno dobivenih iznosa hidrauličke provodljivosti, što sugerira da je klasična Terzaghijeva teorija zadovoljavajući alat za opisivanje konsolidacijskih karakteristika glinenih geosintetičkih

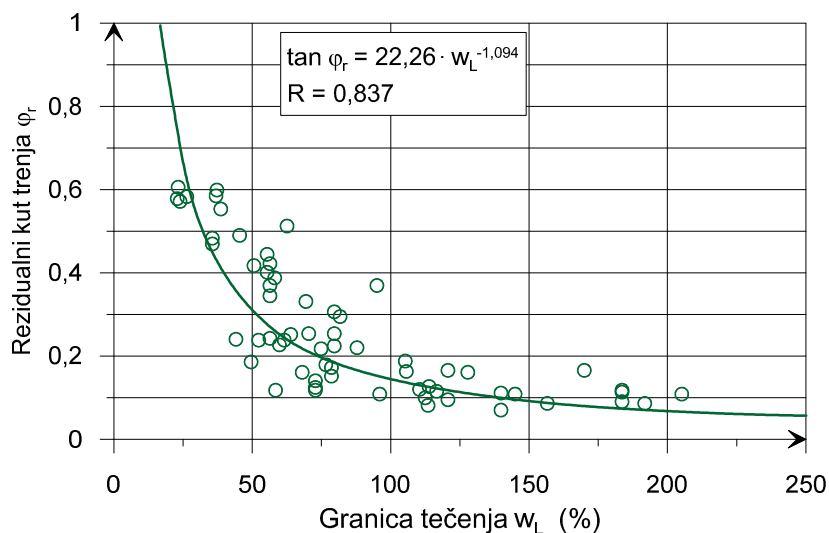
barijera i u troosnom uređaju gdje su do neke mjere moguće i bočne deformacije. Veza koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti pokazivala je linearan trend kod mjerenog raspona efektivnih naprezanja od 69-207 kPa. Pri tome su također volumna deformacija te koeficijent pora imali linearan trend u odnosu na efektivna naprezanja prikazana u logaritamskom mjerilu. Za navedeni raspon efektivnih naprezanja koeficijent konsolidacije se smanjivao s povećanjem opterećenja što je u skladu s prethodno navedenim literaturnim podacima.

Guyonnet et al. (2009) istražuju mogućnost korelacije različitih svojstava bentonitnih glina (fizikalnih, kemijskih, mineraloških i mehaničkih) s ciljem definiranja parametara materijala koji bi omogućili bolju selekciju i kontrolu glinenih geosintetičkih barijera prilikom upotrebe kao brtvenih barijera s naglaskom na odlagališta otpada. Istraživanja su proveli na tri vrste prirodnih natrijskih bentonitnih glina sa sadržajem smektita od 68,8-76,5%, tri vrste aktiviranih natrijskih bentonitnih glina sa sadržajem smektita od 71,5-75,0% i dvije prirodne kalcijске bentonitne gline, jedna sa sadržajem smektita od 29,6% i druga sa 76,8% smektita. Autori dolaze do zaključka da je kapacitet ionske izmjene dobar pokazatelj sadržaja smektita u bentonitnoj glini. Također dobivaju relativno dobru linearnu vezu između indeksa slobodnog bubrenja i udjela natrija kao zamjenjivog kationa.

Suzuki et al. (2005) istražuju moguće funkcijske ovisnosti rezidualnog kuta unutarnjeg trenja i indeksnih pokazatelja sitnozrnatih tala (granica tečenja i indeks plastičnosti). Pri tome se koriste podacima kako svojih istraživanja tako i prethodno objavljenih literaturnih podataka. Između ostalog, korelacije provode na temelju 323 vrste tla sa smektitima kao dominantnim mineralom. Podaci o konkretnom mineraloškom i kemijskom sastavu za pojedina smektitna nisu navedeni. Autori dolaze do zaključka da se rezidualna posmična čvrstoća postepeno smanjuje s povećanjem glinene komponente u tlu. Promatrajući smektitna tla, autori uočavaju funkcijsku vezu rezidualnog kuta trenja s granicom tečenja (Slika 2-26), indeksom plastičnosti i odnosom granice plastičnosti i granice tečenja pri čemu dobiveni koeficijenti korelacije  $r$  redom iznose 0,837; 0,855 i 0,874. Promatrana smektitna tla su imala granicu tečenja u rasponu od oko 25-205%.

Benson & Scalia (2010) istražuju stanje glinenih geosintetičkih barijera ugrađenih u pokrovne slojeve više odlagališta komunalnog otpada. Radilo se o glinenim geosintetičkim barijerama koje su u brtvenom sloju odlagališta natkrivene polimernom geosintetičkom barijerom. Uzorci su vađeni nakon 4,7 do 6,7 godine upotrebe. Provedena su ispitivanja hidrauličke provodljivosti u uvjetima potpune zasićenosti otopinom soli  $\text{CaCl}_2$  koncentracije

0,01 mol/l i demineraliziranom vodom kao ispitnom tekućinom te sadržaja vlage i zamjenjivih kationa mineralne komponente. Pri odabiru ispitne tekućine autori su slijedili preporuke norme ASTM 5084, gdje je navedena koncentracija preporučena kod ispitivanja hidrauličke provodljivosti u područjima s vrlo tvrdom vodom. Debljina pokrovnog sloja na lokacijama iskopa uzoraka je iznosila od 0,76-1,22 m dok je na jednoj lokaciji debljina bila 0,3 m. Rezultati pokazuju da je u navedenom periodu došlo do ionske izmjene na dvije trećine pozicija jednovalentnih zamjenjivih kationa dvovalentnima. Pri tome su ugrađeni uzorci imali od 65-80% jednovalentnih kationa na pozicijama zamjenjivih kationa. To dovodi do zaključka da će tijekom vremena, bez obzira na to što je glinena geosintetička barijera natkrivena polimernom geosintetičkom barijerom, doći do potpune izmjene jednovalentnih kationa dvovalentnima na pozicijama zamjenjivih kationa. Također, primijećeno je da su uzorci s većom vlažnošću pri iskopu (>50%) pokazali znatno manje vrijednosti hidrauličke provodljivosti prilikom korištenja otopine  $\text{CaCl}_2$  kao ispitne tekućine. Autori zaključuju da bez obzira na ionsku izmjenu zamjenjivih kationa, uzorci i dalje ostaju vrlo osjetljivi na kemijski sastav ispitne tekućine, te da treba osigurati dovoljnu vlažnost tijekom cijelog perioda upotrebe. Ukoliko se osiguraju dovoljna debljina pokrovnog sloja te dovoljna vlažnost podinskih naslaga glinena geosintetička barijera ostaje vrlo efikasna brtvena barijera kroz dulje vremensko razdoblje te kao takva u kombinaciji s polimernom geosintetičkom barijerom osigurava vrlo malu filtraciju u tijelo odlagališta.



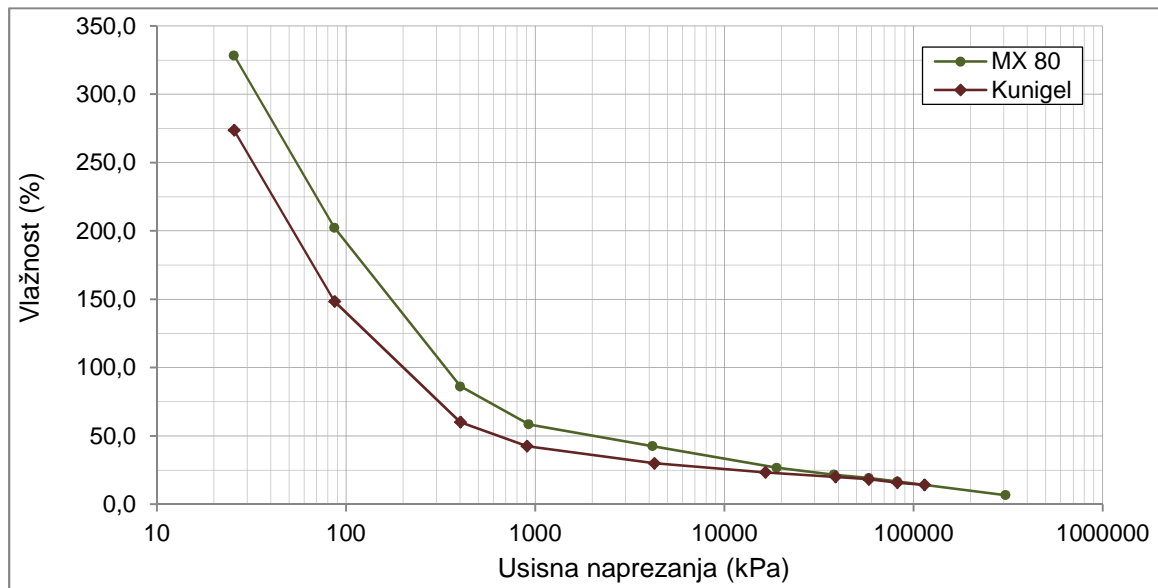
Slika 2-26 Funkcijska veza rezidualnog kuta trenja i granice tečenja dobivena na temelju 145 uzoraka tla smektitima kao dominantnim mineralom (Suzuki et al. 2005)



Ukoliko navedeni uvjeti nisu osigurani brtvena svojstva glinene geosintetičke barijere mogu biti značajno narušena. Touze-Foltz et al. (2010) provode ispitivanje na uzorcima glinenih geosintetičkih barijera uzetih također iz pokrovnog brtvenog sloja odlagališta komunalnog otpada nakon 2-6 godina upotrebe. U ovom slučaju je glinena geosintetička barijera samostalno obavljala brtvenu funkciju. Debljina pokrovnog sloja je iznosila 0,5 m uz napomenu da je navedena debljina bila u skladu s francuskim regulatornim normama (iz 1998 godine) odnosno 0,2 m kod jednog uzorka uzetog u djelu odlagališta s vidljivim deformacijama tijela odlagališta. Mineralna komponenta glinene geosintetičke barijere je aktivirana natrijska bentonitna glina. Rezultati pokazuju da je u ovom slučaju došlo praktično do potpune ionske izmjene jednovalentnih kationa dvovalentnima. Indeks slobodnog bubrenja kod svih uzoraka je iznosio manje od 10 ml/2g. Izvađeni uzorci su bili vidno oštećeni bilo prodorom korijenja bilo djelovanjem ciklusa sušenje-vlaženje. Hidraulička provodljivost je ispitivana na tri uzorka u modificiranom edometarskom uređaju s normalnim naprezanjem od 10 kPa. Otopina soli NaCl koncentracije 0,001 mol/l korištena je kao ispitna tekućina. Početne vlažnosti uzoraka su bile 48% i 65% kod dva uzorka uzeta s dubine 0,5 m te 37% za uzorak uzet s dubine 0,2 m. Dobiveni su koeficijenti hidrauličke provodljivosti oko  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s kod prva dva uzorka te  $6,91 \cdot 10^{-6}$  m/s za treći uzorak (uzet s 0,2 m). Također, kod sva tri uzorka primijećena je konsolidacija uzorka tijekom mjerenja koeficijenta hidrauličke provodljivosti. Ako dobivene podatke usporedimo s podacima o koeficijentima hidrauličke provodljivosti dobivenih u iznosima manjim od  $1,5 \cdot 10^{-8}$  m/s (Benson & Scalia 2010) jasno je da na svojstva mineralne komponente glinene geosintetičke barijere značajno utječu i uvjeti ugradnje odnosno uporabe što se u najvećoj mjeri očituje u promjenama hidrauličkih karakteristikama mineralne komponente ali također i na ostalim mehaničkim svojstvima.

Korelacijska veza koja opisuje odnos usisnih naprezanja i vlažnosti pri hidrataciji odnosno bubrenju poznatija je kao karakteristična krivulja retencije vode (engl.: *water retention curve*, krat. WRC). Slika 2-27 prikazuje dvije takve krivulje (Marcial et al. 2002). Jedna predstavlja karakterističnu krivulju retencije vode bentonitne gline tvorničke oznake MX 80, karakteristika: 85% Na-Ca smektita, granica tečenja 520%, granica plastičnosti 62%, specifična površina  $700 \text{ m}^2/\text{g}$  i kapacitet ionske izmjene 68 meq/100g. Kationi  $\text{Na}^+$  su dominantni na pozicijama zamjenjivih kationa. Druga je karakteristična krivulja retencije vode bentonitne gline Kunigel s približno 64% Na-smektita, granicom tečenja 474%, granicom plastičnosti 27%, specifičnom površinom  $687 \text{ m}^2/\text{g}$  i kapacitetom ionske izmjene 73,2 meq/100g. Može se uočiti da su pri početnoj tvorničkoj vlažnosti vrijednosti usisa iste za

oba uzorka i iznose oko 300 MPa. Hidratacijom uzorka, vrijednosti usisa se smanjuju. Usisna naprežanja od 1 kPa bi odgovarala potpuno zasićenom uzorku (Baddoe et al. 2011).



Slika 2-27 Karakteristične krivulje retencije vode dvije vrste bentonitne gline (Marcial et al. 2002)

Marcial et al. (2002) ističu da u polulogaritamskom mjerilu nagib krivulja opada s rastom usisnih naprežanja. Krivulja ima bilinearan oblik u rasponu usisnih naprežanja od 25 kPa do 305 MPa sa značajnom promjenom nagiba između usisnih naprežanja od 0,4-1MPa. Prema krivuljama retencije vode oba materijala se ponašaju slično s tim da je krivulja bentonitne gline komercijalnog naziva Kunigel blažeg karaktera što autori pripisuju nešto manjem sadržaju smektita. Navedeno bilinearno ponašanje opisano je promjenama koje se odvijaju u mikrostrukturi bentonitne gline tijekom procesa bubrenja. Naime, kod malih vrijednosti vlažnosti bentonitne gline (oko 1-15%) i pretpostavku da je relativna vlažnost zraka jednaka nuli, smektiti s kationima niske hidratacijske energije u međuslojnim prostorima (npr.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), imaju vezane molekule vode na površini silikatnih slojeva bez da molekule vode hidratiziraju međuslojne katione. Naprotiv, kod smektita s kationima velike hidratacijske energije (npr.  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ) molekule vode hidratiziraju međuslojne katione. Kod ovako niskih vlažnosti na strukturu adsorbirane vode dominantno djeluju električne sile silikatnih slojeva i međuslojni kationi. Ukoliko su u smektitima prisutni jednovalentni i dvovalentni međuslojni kationi, na ponašanje molekula vode u međuslojnim prostorima dominantno će utjecati kationi velike hidratacijske energije. Razmak slojeva je mali pa nema mogućnosti stvaranja dvostrukog difuznog sloja. Lu i Likos (2006) navode da razmak među česticama odnosno

jediničnim slojevima određuje posmičnu čvrstoću. Kod donje granice od približno 0,5 nm, što odgovara relativno suhom stanju bentonitne gline, postiže se vrlo visoko preklapanje elektronskih ljuski, a time je veća posmična čvrstoće ali i međučestična tlačna čvrstoća.

Yong (1999) i Kavur (2009) navode da je u početku hidratacije kretanje vode isključivo usmjereno prema mikrostrukturnim prostorima zbog vrlo velike adsorpcijske energije koja se javlja uslijed neuravnoteženih negativnih naboja na površinama jediničnih slojeva. Također, navode da će se na osnovi opisa mikrostrukture, rangiranja pornih prostora i afiniteta mikrostrukture prema vodi u ovoj fazi kretanje vode u nesaturiranoj bentonitnoj glini biti u vidu transporta graničnim područjem čestica odnosno kretanje vode bilo bi u obliku tankog filma na granicama čestica ili nakupina a ne u velikim pornim prostorima. Pretpostavljaju da će u ovoj fazi promjena volumena približno dostići volumen infiltrirane vode. Moguće je da se dio ekspanzije čestica i nakupina minerala glina obavlja na račun smanjenja makro pora. Međutim, pretpostavlja se da u tom slučaju porast tlaka zraka zarobljenog u makroporama može dijelom kompenzirati razliku između infiltrirane vode i promjene volumena. Ova faza se još naziva primarno bubrenje. Ulaskom vode u prostore mikrostrukture bentonitne gline dolazi do pada adsorpcijskog potencijala mikrostrukture a time i ukupnog usisa. Navedeno uzrokuje slabljenje gradijenata i naposljetku ulazak vode u makro pore. Ova faza se još naziva sekundarno bubrenje. Ako se ne uspostavi ravnoteža makro i mikro domene, proces bubrenja zbog osmotskog potencijala može se nastaviti. Ova faza se naziva tercijarnim bubrenjem.

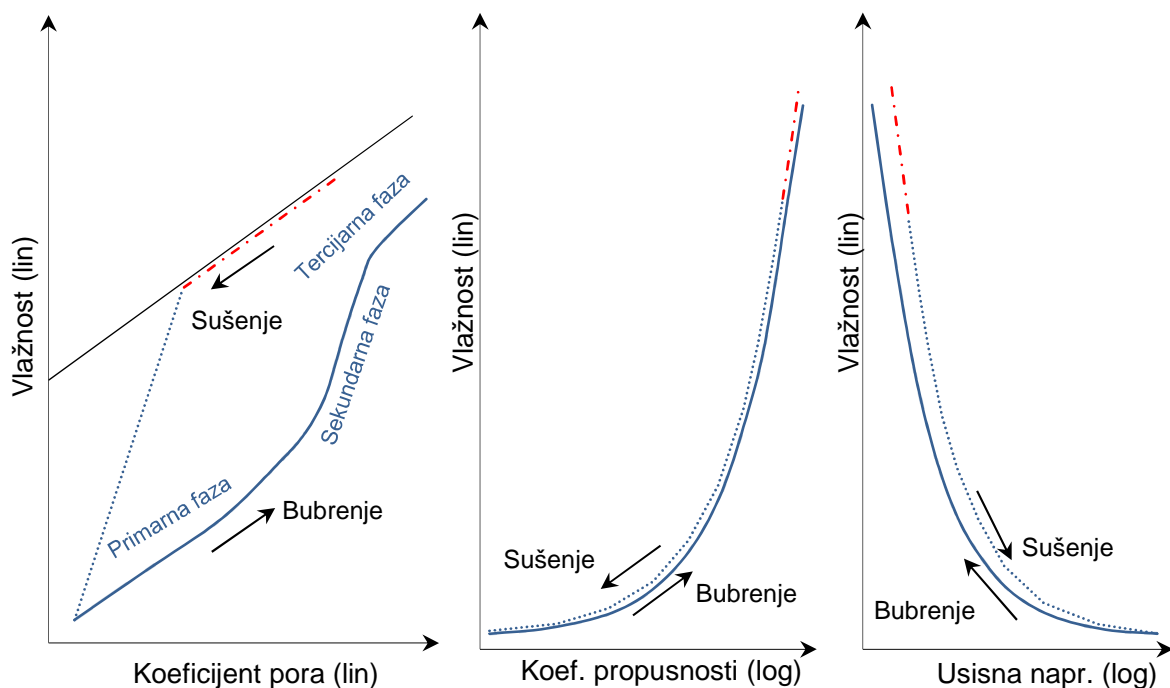
S druge strane, Marcial et al. (2002) i Ben Rhaiem et al. (1997) opisuju mikrostrukturu hidratiziranog natrijskog Wyoming bentonitne gline u suspenziji pri visokim vrijednostima koeficijenta pora ( $e = 15$ ) i malim vrijednostima usisnih naprežanja (3,2 kPa). Navode da se čestice sastoje od oko 4-10 paralelnih jediničnih paketa uz prisutne difuzne slojeve u međuprostorima jediničnih slojeva. Povećanjem usisnih naprežanja smanjuje se broj prisutnih difuznih slojeva u međuslojnim prostorima. Prisustvo dvostrukih difuznih slojeva vidljivo je do usisnih naprežanja od 1 MPa. Usisna naprežanja veća od 5 MPa imaju za posljedicu izlazak vezane vode iz međuslojnih prostora.

U poglavlju 2.1.3 je detaljnije objašnjena pojava bubrenja i stvaranja dvostrukog difuznog sloja. U primarnoj zoni dvostrukog difuznog sloja ili tzv. Sternov sloj molekule vode su čvrsto vezane uz površinu silikata i kao takve se mogu smatrati nepokretnima. U sekundarnoj zoni dvostrukog difuznog sloja ili tzv. difuznom sloju molekule vode su slabo vezane odnosno Pusch (2001) molekule vode u ovom sloju ne smatra vezanim već zonu difuznog sloja smatra zonom vode niže viskoznosti od slobodne vode. Sve ovo ukazuje da će

pojava difuznih slojeva u mikrostrukтури bentonitne gline vjerojatno značajno utjecati na njeno daljnje mehaničko ponašanje.

Hetzel et al. (1994) navode kako je jedna od bitnih čimbenika za razumijevanje bubrenja natrijskih smektita njihova struktura i međusobni položaj čestica u nakupinama. Bubrenjem dolazi do promjene međusobnog položaja jediničnih slojeva i čestica tako da one nastoje postići što veći međusobni paralelizam. Ovo također ukazuje da dolazi do promjene mikrostrukture bentonitne gline tijekom procesa bubrenja. Kraći osvrt na utjecaj promjene mikrostrukture na hidrauličku provodljivost bentonitne gline prikazan je u poglavlju 2.3.2 na temelju istraživanja Pusch & Schomburg (1999).

Slika 2-28 prikazuje konceptualni model ponašanja bubreve stijene tijekom bubrenja (Kavur 2009). Promjene matričnog usisa, hidrauličke provodljivosti i koeficijenta pora prikazane su u odnosu na vlažnost. Krivulje retencije vode i hidrauličke provodljivosti prikazane su u polulogaritamskom mjerilu, a krivulja bubrenja u linearnom mjerilu. Radi uvida u promjene ponašanja bubreve stijene, crtkano su prikazane krivulje retencije i stezanja u sušenju. Na osnovu krivulja može se zaključiti da model pretpostavlja opadanje vrijednosti usisa, porast hidrauličke provodljivosti i porast koeficijenta pora s porastom vlažnosti odnosno tijekom bubrenja.



Slika 2-28 Konceptualni model ponašanja bubreve stijene (modificirano iz Kavur 2009)

Pregledom postojećih spoznaja, općenito se može uočiti da se koeficijent konsolidacije bentonitne gline smanjuje s povećanjem normalnih naprezanja odnosno sa smanjenjem koeficijenta pora. Do promjene u ponašanju dolazi kod velikih opterećenja (Baille et al. 2010). Porastom opterećenja iznad 3 MPa koeficijent konsolidacije počinje rasti.

Ukoliko se promatraju pojedina mehanička i fizikalna svojstva bentonitnih glina može se uočiti da literatura spominje brojne međuovisnosti. Linearnu vezu između završne vlažnosti i završne visine uzoraka odnosno završnog koeficijenta pora uzoraka (za raspon vlažnosti od 58-464%) naglašava Petrov et al. (1997). Suzuki et al. (2005) dolaze do zaključka da se rezidualna posmična čvrstoća postepeno smanjuje s povećanjem glinene komponente u tlu. Promatrajući smektitna tla uočena je funkcijska veza rezidualnog kuta trenja s granicom tečenja i indeksom plastičnosti pri čemu su promatrana smektitna tla imala granicu tečenja u rasponu od oko 25-205%. Guyonnet et al. (2009) dolaze do zaključka da je kapacitet ionske izmjene dobar pokazatelj sadržaja smektita u bentonitnoj glini. Također prezentiraju linearnu vezu između indeksa slobodnog bubrenja i udjela natrija kao zamjenjivog kationa. Linearan odnos koeficijenta hidrauličke provodljivosti i koeficijenta pora u logaritamskom mjerilu navode mnogi autori za veliki raspon koeficijenta pora (1,2-10). Sve ovo upućuje na mogućnost korelacija pojedinih svojstava bentonitne gline pri čemu se može pretpostaviti da će sadržaj smektita i udio iona natrija na zamjenjivim pozicijama imati dominantnu ulogu na ponašanje bentonitne gline. Ovdje treba također imati na umu da na glinene geosintetičke barijere značajno utječu i uvjeti ugradnje odnosno uporabe što se u najvećoj mjeri očituje u promjenama hidrauličkih karakteristikama mineralne komponente ali također i na ostalim mehaničkim svojstvima. Naime, Benson i Scalia (2010) dolaze do zaključka da će tijekom vremena, vjerojatno doći do potpune izmjene jednovalentnih kationa dvovalentnima na pozicijama zamjenjivih kationa što će zatim imati i velik utjecaj na karakteristike bentonitne gline kao brtvene barijere. Usporedbom modela ponašanja bubre stijene (Kavur 2009) i karakterističnih krivulja retencije vode bentonitne gline za MX 80 (Marcial et al. 2002) može se uočiti da je bilinearan karakter krivulja retencije u skladu s konceptualnim modelom ponašanja bubrivih stijena.

### 3 KARAKTERIZACIJA BENTONITNE GLINE

Istraživanje u okviru izrade doktorskog rada provedeno je na bentonitnoj glini koja se na tržištu distribuira u obliku granula pod komercijalnim nazivom Volclay proizvođača CETCO. Radi se o prirodnoj natrijskoj bentonitnoj glini, prema porijeklu uobičajenog naziva "Wyoming bentonitna glina". U ovom poglavlju opisana su mineraloška, kemijska, fizikalna i indeksna svojstva bentonitne gline.

#### 3.1 Mineraloška svojstva bentonitne gline

##### 3.1.1 Mineraloški sastav

###### 3.1.1.1 Pregled literature o ispitivanjima mineraloškog sastava Wyoming bentonitne gline

Opsežna istraživanja mineraloških svojstava proizvoda Volclay i Volclay MX 80 proveli su Kumpulainen i Kiviranta (2010). Za oba proizvoda proizvođač CETCO navodi da su prirodne natrijske bentonitne gline u formi granula s mogućnošću različitih primjene. Volclay granule prvenstveno se upotrebljavaju kao komponenta glinenih geosintetičkih barijera te za popunjavanje otvora i šupljina prije postavljanja brtvenih sustava dok se Volclay MX80 upotrebljava u brtvenim sustavima odlagališta radioaktivnog otpada. Mineraloški sastav Volclay i Volclay MX 80 proizvoda autori su odredili kombinacijom rendgenske difrakcije na prahu (XRD), infracrvene spektroskopije s Fourierovom transformacijom (FTIR) i polarizacijskog mikroskopa. Tablica 3-1 prikazuje rezultate kvantitativne analize mineraloškog sastava dobivene Rietvaldovom metodom uz upotrebu više difrakcijskih slika uzoraka. Maseni udio smektita kretao se u rasponu od 77,6 do 79,2% kod proizvoda Volclay te u rasponu od 75,4-80,0% kod proizvoda Volclay MX 80.

Vidljivo je da oba proizvoda imaju praktično identičan mineraloški sastav. Ispitivanjem dobivene vrijednosti u skladu su s drugim literaturnim podacima dobivenim za Wyoming bentonitnu glinu. Karland (2010) na temelju istraživanja šest uzoraka Wyoming bentonitne gline (Volclay MX 80) dolazi do zaključka da se sadržaj smektita kreće u rasponu od 79,5 do 83,7%. Montes-Hernandez (2002) također za Volclay MX 80 navodi sadržaj smektita  $79,2 \pm 3\%$ , dok Guyonnet et al. (2009) navodi nešto niži sadržaj smektita u Wyoming bentonitnim glinama 68,8 i 71,3%.

Tablica 3-1 Rezultati rendgenske difrakcije uzoraka Volclay i Volclay MX 80 (Kumpulainen &amp; Kiviranta 2010)

Mineral	Volclay Maseni udio (%)	Volclay MX 80 Maseni udio (%)
Smektit	77,6-79,2	75,4-80,0
Illit	0,1-3,1	0,1-3,7
Kalcit	0,8-1,3	0,1-1,3
Muskovit	6,0-8,3	6,6-10,9
Kvarc	4,0-4,8	4,7-4,8
Plagioklas	1,4-2,1	2,1-2,5
Kristobalit	0,4-0,6	0,0-0,7
Tridimit	1,4-2,5	1,2-2,1
Gips	1,1-1,5	1,1-1,3
Hematit	0,0-0,2	0,3-0,6
Magnetit	0,7-1,5	1,2-1,6
Pirit	0,4-0,7	0,6-1,0
Ostalo – minerali u tragovima		

### 3.1.1.2 Ispitivanja mineraloškog sastava provedena na uzorcima bentonitne gline

Ispitivanje mineraloškog sastava bentonitne gline provedeno je na Geološkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Za faznu analizu korištena je metoda difrakcije rendgenskih zraka na praškastim uzorcima na Philipsovom vertikalnom rendgenskom goniometru (tip X-Pert), uz upotrebu  $C_u$ -cijevi (40 kV, 40 mA) čije je zračenje monokromatizirano grafitnim monokromatorom. Za registraciju zračenja korišten je proporcionalni brojač. Snimanje je bilo kontinuirano brzinom  $0,02^\circ/\text{s}$ . Pukotine na instrumentu bile su kako slijedi: maska 10 mm, divergentna pukotina  $1/2^\circ$ , pukotine od  $1^\circ$  za sprečavanje raspršenja i na strani cijevi i ispred brojača te ulazna pukotina 0,2 mm. Pri snimanju korišten je klasični aluminijski nosač. Kao rezultat dobivene su difrakcijske linije originalnog, netretiranog uzorka (Slika 3-1), linije uzorka tretiranih s etilen glikolom te uzorka žarenog na  $550^\circ\text{C}$ . Na slici 3.1 prikazana je difrakcijska slika originalnog netretiranog uzorka.

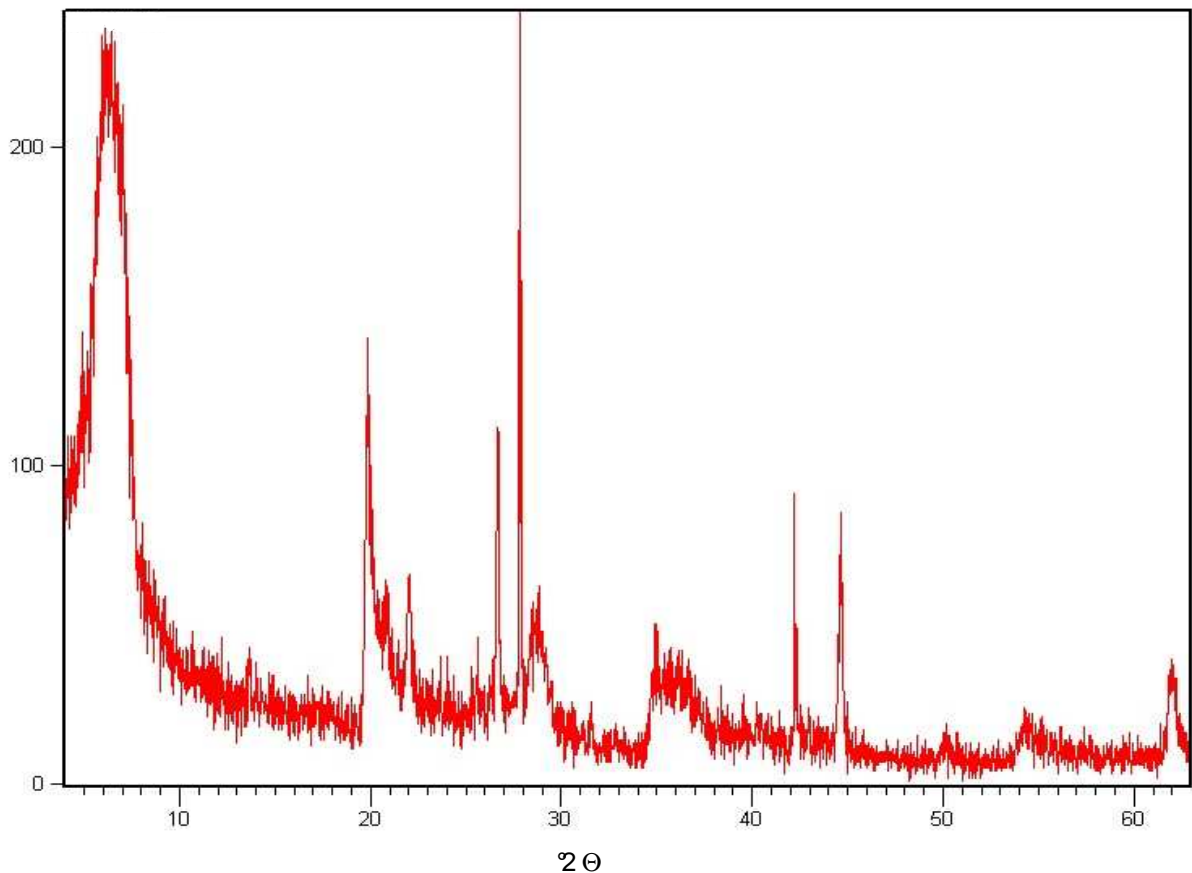
Rezultati kvalitativne i semikvantitativne rendgenske fazne analize pokazali su da je dominantan sastojak u uzorku dioktaedrijski smektit, montmorillonit (80-85%). Sporedni sastojci su cristobalit (oko 5%), kvarc (oko 5%) i plagioklasi (oko 5%). Uz standardne uvjete snimanja na rendgenogramu nisu bili vidljivi maksimumi illita, gipsa, kalcita i piritita. Tablica 3-2 prikazuje rengenografske podatke istraživane bentonitne gline.

Tablica 3-2 Rendgenografski podaci za bentonitnu glinu

Položaj maksimuma ( $^{\circ}2\theta$ )	d-vrijednost ( $\text{\AA}$ )	Rel. int. (%)	Mineral
6,38	13,8486	76	montmorillonit
13,65	6,4801	14	plagioklas
19,84	4,4722	44	montmorillonit
20,89	4,2492	27	kvarc
22,00	4,0372	19	cristobalit
23,63	3,7621	4	plagioklas
25,59	3,4782	6	plagioklas
26,65	3,3426	40	kvarc
27,81	3,2052	100	plagioklas-krupnija čestica
28,69	3,1086	14	montmorillonit
31,53	2,8352	2	plagioklas, cristobalit
34,94	2,5660	11	montmorillonit
36,09	2,4867	9	montmorillonit; cristobalit
37,19	2,4157	6	montmorillonit
40,25	2,2388	4	kvarc
42,20	2,1395	35	plagioklas-krupnija čestica
44,59	2,0304	25	nosač uzorka
50,07	1,8203	5	kvarc
54,46	1,6834	5	montmorillonit
61,95	1,4968	12	montmorillonit

Usporedbom s prethodno navedenim literaturnim podacima za uzorke Volclay i Volclay MX 80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010) vidljiva je podudarnost u mineraloškom sastavu posebice ako se promatra sadržaj smektita.





Slika 3-1 Difrakcijske linije originalnog, netretiranog uzoraka

### 3.1.2 Kemijski sastav bentonitne gline

#### 3.1.2.1 Pregled literature o ispitivanjima kemijskog sastava Wyoming bentonitne gline

Istraživanja kemijskog sastava (Tablica 3-3) uzoraka Volclay i Volclay MX 80 proveli su Kumpulainen i Kiviranta (2010) te Montes-Hernandez (2002). Vidljiva je sličnost kemijskog sastava uzoraka. Najveća se razlika uočava kod ispitivanja gubitka žarenjem (LOI).

Izračunom na temelju mineralošskog sastava i kemijske analize Kumpulainen & Kiviranta (2010) predlažu strukturne formule smektita za uzorke Volclay i Volclay MX 80 (Tablica 3-4). Na temelju predloženih strukturnih formula smektita, u uzorku Volclay udio  $\text{Na}^+$  na pozicijama zamjenjivih kationa iznosi 71,1%,  $\text{Ca}^{+2}$  21,1% i  $\text{Mg}^{+2}$  7,9%. U uzorku Volclay MX 80 udio  $\text{Na}^+$  na pozicijama zamjenjivih kationa iznosi 69,9%,  $\text{Ca}^{+2}$  23,3% i  $\text{Mg}^{+2}$  6,9%. Do sličnih podataka istraživanjem dolazi i Guyonnet et al. (2009) koji navode podatke od

65,1% i 66,9% udjela  $\text{Na}^+$  na pozicijama zamjenjivih kationa za dva uzorka Wyoming bentonitne gline.

Tablica 3-3 Literaturni podaci o kemijskim analizama na uzorcima Volclay i Volclay MX80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010 i Montes-Hernandez 2002)

	Volclay* (%)	Volclay MX 80* (%)	Volclay MX 80** (%)
$\text{SiO}_2$	64,32	64,88	58,17±0,53
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19,00	18,92	17,75±0,63
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,30	3,28	4,04±0,13
FeO	0,48	0,37	-
MgO	2,56	2,41	2,17±0,07
CaO	1,66	1,23	1,45±0,07
$\text{Na}_2\text{O}$	2,03	2,05	2,18±0,03
$\text{K}_2\text{O}$	0,62	0,59	0,62±0,01
$\text{TiO}_2$	0,15	0,15	0,14±0,01
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	-	0,27±0,03
MnO	-	-	0,02±0,01
Ukupni C	1,14	0,75	-
Ukupni S	0,26	0,29	-
LOI	5,70	5,9	13,85±1,02

\* izvor Kumpulainen & Kiviranta (2010)

\*\* izvor Montes-Hernandez (2002)

Tablica 3-4 Predložena strukturna formula smektita za uzorke Volclay i Volclay MX 80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010)

	Pozicije zamjenjivih kationa	Oktaedrijske pozicije	Tetraedrijske pozicije	
Volclay	$\text{Na}_{0,54}\text{Ca}_{0,16}\text{Mg}_{0,06}$	$\text{Al}_{3,09}\text{Fe}^{+3}_{0,38}\text{Fe}^{+2}_{0,03}\text{Mg}_{0,56}$	$\text{Si}_{7,65}\text{Al}_{0,35}$	$\text{O}_{20}(\text{OH})_4$
Volclay MX 80	$\text{Na}_{0,51}\text{Ca}_{0,17}\text{Mg}_{0,05}$	$\text{Al}_{3,11}\text{Fe}^{+3}_{0,39}\text{Fe}^{+2}_{0,03}\text{Mg}_{0,52}$	$\text{Si}_{7,70}\text{Al}_{0,30}$	$\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

### 3.1.2.2 Ispitivanja kemijskog sastava provedena na uzorcima bentonitne gline

Ispitivanje kemijskog sastava bentonitne gline provedeno je u analitičkom laboratoriju ACMELabs u Kanadi.

Sadržaj glavnih kemijskih elemenata u uzorku bentonitne gline dobiven je metodom induktivno spregnute plazme emisijske spektrometrije (ICP-OES) nakon taljenja 0,2 grama

uzorka litijevim metaboratom/tetraboratom i otapanja taline razrijeđenom dušičnom kiselinom. Ukupni udio ugljika i sumpora određen je pomoću analizatora za ugljik i sumpor Leco. Gubitak žarenjem (LOI) u analiziranim uzorcima izražen je kao maseni postotak. Dobiven je iz razlike mase prije i nakon žarenja na 1000°C. Tablica 3-5 prikazuje rezultate kemijske analize.

Usporedbom s prethodno navedenim literaturnim podacima za uzorke Volclay i Volclay MX 80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010 i Montes-Hernandez 2002) uočena je velika podudarnost u kemijskom sastavu uzoraka. Najveća se razlika uočava kod ispitivanja gubitka žarenjem (LOI). Gubitak mase žarenjem u provedenoj kemijskoj analizi ima vrlo slične vrijednosti onima navedenim u radu Montes-Hernandez (2002), oko 15%, dok kod Kumpulainen i Kiviranta (2010) gubitak žarenjem iznosi oko 5,5%. Kao razlog navedene razlike u pripremi uzorka.

Tablica 3-5 Rezultati kemijske analize bentonitne gline

Sadržaj glavnih elemenata (mas. % oksida)			
SiO <sub>2</sub>	57,25	K <sub>2</sub> O	0,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,41	TiO <sub>2</sub>	0,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,37	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05
MgO	2,20	MnO	0,01
CaO	1,50	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,002
Na <sub>2</sub> O	2,03		
Sadržaj elemenata u tragovima (ppm)			
Ba	297	Y	37
Ni	< 20	Nb	33
Sr	224	Sc	5
Zr	195		
Sadržaj sumpora, ugljika i gubitak žarenjem (mas.%)			
Ukupni sumpor		0,16	
Ukupni ugljik		0,63	
Gubitak žarenjem LOI		15,40	

### 3.1.3 Sposobnost ionske izmjene i ukupne površine bentonitne gline

U okviru ovog poglavlja ukratko će se navesti rezultati ispitivanja sposobnosti ionske izmjene i specifične površine bentonitne gline provedenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Određivanje sposobnosti ionske izmjene bentonitne gline provedeno je metodom s metilenskim plavilom. Sposobnost ionske izmjene bentonitne gline iznosi: 88,63±6,51 meq/100g.

Određivanje ukupne površine bentonitne gline napravljeno je prema EGME proceduri. Ova procedura za određivanje ukupne površine uzorka bentonitne gline provodi se pomoću etilenglikol monoetiletera (EGME,  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) koji se koristi za saturaciju uzoraka. Ukupna površina bentonitne gline iznosi: 780,77 m<sup>2</sup>/g.

## 3.2 Fizikalna svojstva bentonitne gline

Ispitivanja fizikalnih svojstava bentonitne gline provedena su u Geomehaničkom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta sukladno međunarodnim normama. Navedene međunarodne norme uobičajene u geomehaničkim ispitivanjima akreditiranih geomehaničkih laboratorija. Njihov izbor ovisi o karakteristikama opreme te o praksi pojedinog ispitnog laboratorija.

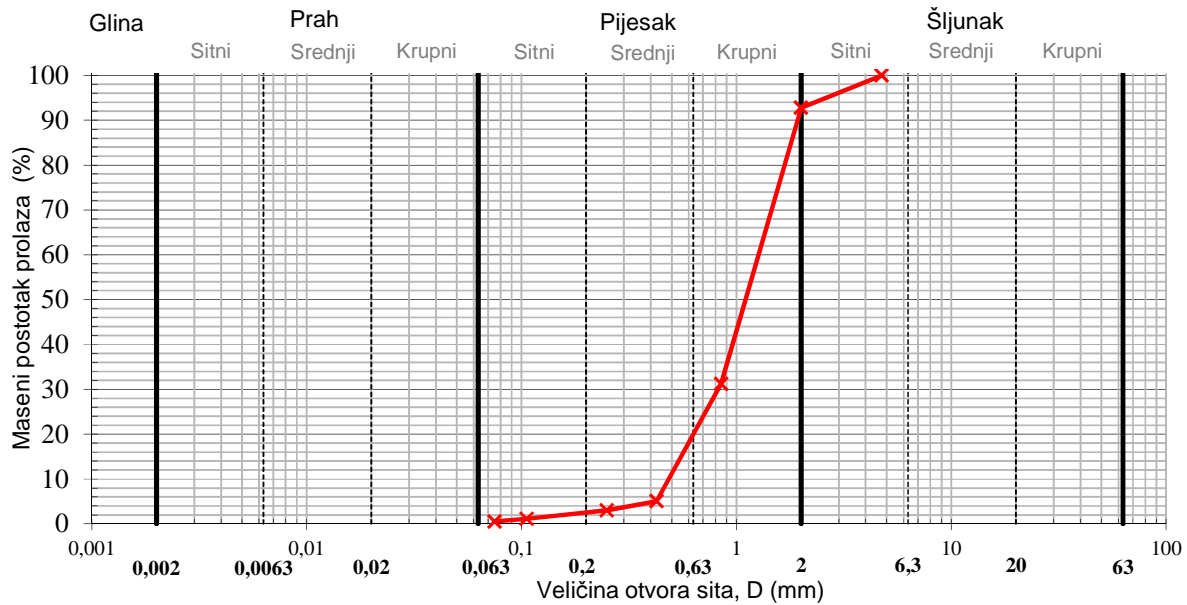
### 3.2.1 Granulometrijski sastav granula

Ispitivanje granulometrijskog sastava granula bentonitne gline proveden je postupkom sisanja uzorka mase 167,9 g osušenog na temperaturi od 60°C tijekom 48 sati. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ASTM D 422. Tablica 3-6 prikazuje rezultate sisanja. Na temelju rezultata sisanja prikazana je dobivena granulometrijska krivulja granula bentonitne gline (Slika 3-2).

Tablica 3-6 Rezultati sisanja granula bentonitne gline

Otvor sita (mm)	Masa uzorka na situ (g)	Postotak ostatka na situ	Kumulativni postotak prolaza
4,750	0,00	0,00%	100,00%
2,000	12,08	7,21%	92,79%
0,850	103,20	61,58%	31,22%
0,425	43,82	26,15%	5,07%
0,250	3,44	2,05%	3,02%
0,106	3,19	1,90%	1,12%
0,075	1,07	0,64%	0,48%
Prosjev	0,80	0,48%	0,00%
Ukupno	167,60		

Analiza granulometrijskog sastava prema BS EN ISO 14688-1 pokazuje da granule bentonitne gline sadrže 7,2% zrna veličine sitnog šljunka. Količina od 92,35% zrna je veličine pijeska, od toga 76,95% veličine krupnog pijeska, 13,48% veličine srednje krupnog pijeska i 1,91% veličine sitnog pijeska. Zrna veličine praha i gline sadrži 0,45%. Na temelju oblika granulometrijske krivulje izračunat je koeficijent zakrivljenosti  $c_c$  (1,79) i koeficijent jednoličnosti  $c_u$  (2,6). Prema tome radi se o jednoliko graduiranom materijalu s dominantnim zrnima veličine krupnog pijeska.



Slika 3-2 Granulometrijska krivulja granula bentonitne gline

### 3.2.2 Gustoća čvrstih čestica

Ispitivanje gustoće čvrstih čestica bentonitne gline provedeno je pomoću piknometra sukladno normi ASTM D 854. Pri tome su korišteni piknometri obujma 250 ml. Uzorci bentonitne gline osušeni su na 60°C tijekom 48 sati. U svaki piknometar stavljeno je po 9,0 g osušenog uzorka te je dodana demineralizirana voda. Nakon toga su piknometri ostavljeni u desikatoru minimalno 24 sata kako bi se pomoću vakuuma uklonili mjehurići zraka iz suspenzije. Gustoća čvrstih čestica bentonitne gline izračunata je pomoću izraza:

$$\rho_s = \frac{m_s \rho_{w,t}}{m_s + m_{pw,t} - m_{pws,t}} \quad (3-1)$$

gdje je:  $m_s$  masa suhog uzorka odnosno čvrstih čestica (g),  $\rho_{w,t}$  gustoća vode pri temperaturi mjerenja ( $\text{Mg/m}^3$ );  $m_{pw,t}$  masa piknometra napunjenog vodom pri temperaturi mjerenja (g);  $m_{pws,t}$  masa piknometra s uzorkom i vodom pri temperaturi mjerenja (g). Uz ispitivanje treba napomenuti da je u odnosu na zahtjev norme ( $30 \pm 5$ g) ispitivanje provedeno sa znatno manjom masom suhog uzorka od propisane. Naime, obzirom na svojstvo bubrivosti bentonitne gline, upotrebom veće mase nije bilo moguće provesti postupaka deaeracije suspenzije.

Provedena su četiri mjerenja te je dobivena prosječna vrijednost gustoće čvrstih čestica uzorka bentonitne gline korištenog u ovoj studiji od  $2,707 \text{ Mg/m}^3$  (Tablica 3-7).

Tablica 3-7 Mjerenja gustoće čvrstih čestica bentonitne gline

		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Mjerenje 4
Masa piknometra	(g)	79,62	81,89	81,02	81,02
Masa piknometra i vode $m_{pw,t}$	(g)	330,09	329,53	329,46	329,46
Volumen piknometra	(ml)	251,356	248,513	249,326	249,326
Masa suhog uzorka $m_s$	(g)	9,0	9,0	9,0	9,0
Masa piknometra, vode i uzorka $m_{pws,t}$	(g)	335,76	335,21	335,18	335,11
Temperatura suspenzije pri mjerenju	(°C)	27,2	27,1	27,2	22,2
Gustoća čvrstih čestica pri temp. mjerenja	(Mg/m <sup>3</sup> )	2,707	2,711	2,742	2,685
Gustoća čvrstih čestica pri 20°C	(Mg/m <sup>3</sup> )	2,702	2,707	2,737	2,683
Prosječna gustoća čvrstih čestica	(Mg/m <sup>3</sup> )		<b>2,707</b>		

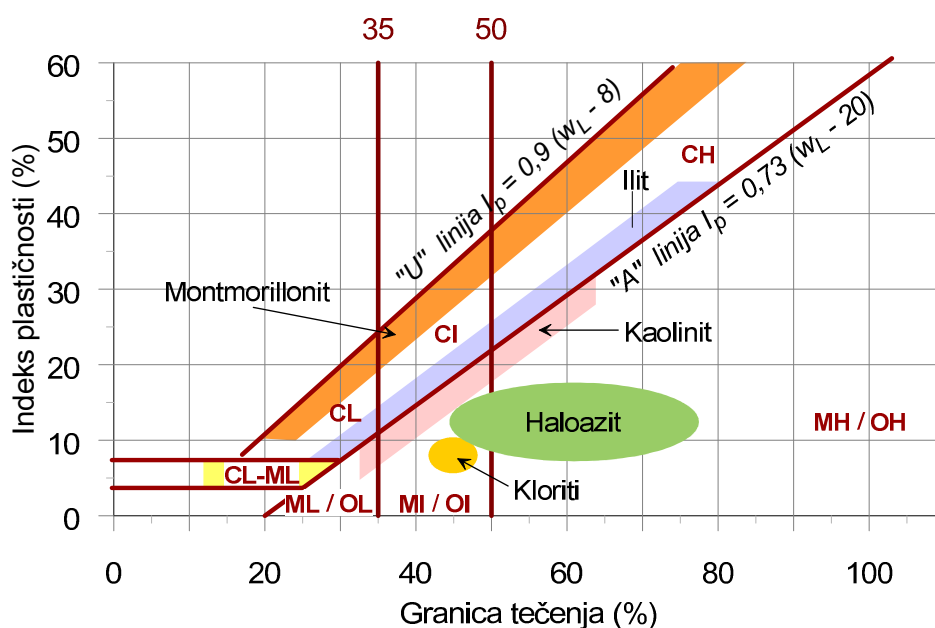
### 3.3 Indeksna svojstva bentonitne gline

Određivanja granica plastičnosti, indeksa slobodnog bubrenja i sposobnosti upijanja vode bentonitne gline provedena su u Geomehničkom laboratoriju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta sukladno odgovarajućim međunarodnim normama. Određivanja indeksa gubitka fluida provedeno je u akreditiranom geomehničkom laboratoriju tvrtke Geokon-Zagreb također prema odgovarajućoj međunarodnoj normi.

#### 3.3.1 Granica plastičnosti i granica tečenja

Atterbergove granice plastičnosti koriste se za identifikaciju i klasifikaciju sitnozrnatih tala. Također često, temeljem različitih korelacijskih krivulja, mogu poslužiti za procjenu njihovih mehanička svojstva. Naime, granice plastičnosti koje se utvrđuju relativno jednostavnim postupcima ovise o istim fizičkim faktorima o kojima ovise i čvrstoća i hidrauličke provodljivost (oblik čestica, veličina čestica i sl.). Klasifikacija sitnozrnatog tla na temelju granica plastičnosti provodi se pomoću dijagrama plastičnosti (Slika 3-3) koji prikazuje indeks plastičnosti  $I_p$  kao funkciju granice tečenja  $w_L$ .

Dijagram plastičnosti kakav je predložio Holtz & Kovacs (1981) također može poslužiti za procjenu mineralošskog sastava tla (Slika 3-3). Kod bentonitnih gline granica tečenja je primarno kontrolirana s debljinom dvostrukog difuznog sloja te veća debljina dvostrukog difuznog sloja ima za posljedicu veću granicu tečenja.



Slika 3-3 Dijagram plastičnosti (modificirano Holtz & Kovacs 1981)



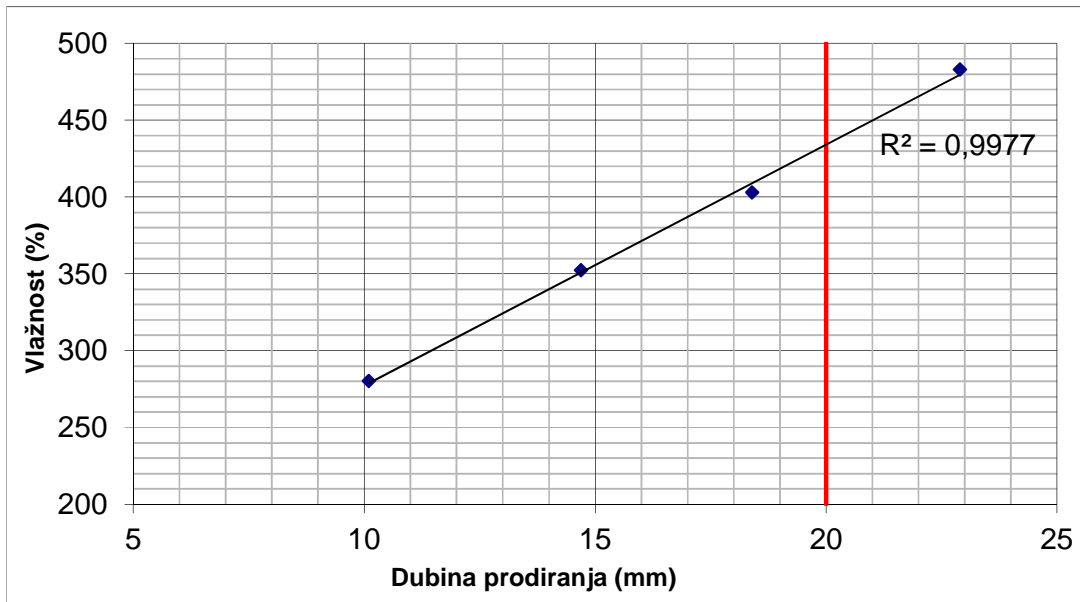
Ispitivanja granice tečenja i granice plastičnosti  $w_p$  provedena su na samljevenim uzorcima pri čemu je 100% uzorka prošlo kroz sito veličine otvora 70  $\mu\text{m}$ . Ispitivanje je provedeno sukladno normi BS 1377: Dio 2. Pri tome je granica tečenja određena pomoću stožastog penetrometra sa stošcem karakteristika 30°/80 g. Korištena je metoda s više točaka pri čemu je nakon nanošenja vrijednosti dubine prodora uzorka i pripadajuće vlažnosti, granica tečenja određena kao vrijednost vlažnosti pri prodoru stošca od 20 mm (Slika 3-4). Granica plastičnosti određena je valjanjem valjčića i to kao prosječna vrijednost nakon dva ispitivanja. Indeks plastičnosti  $I_p$  dobiven je kao razlika granice tečenja  $w_L$  i granice plastičnosti  $w_p$ .

Tablica 3-8 prikazuje rezultate ispitivanja granice tečenja i granice plastičnosti bentonitne gline. Slika 3-5 prikazuje klasifikaciju bentonitne gline na temelju dobivenih granica plastičnosti.

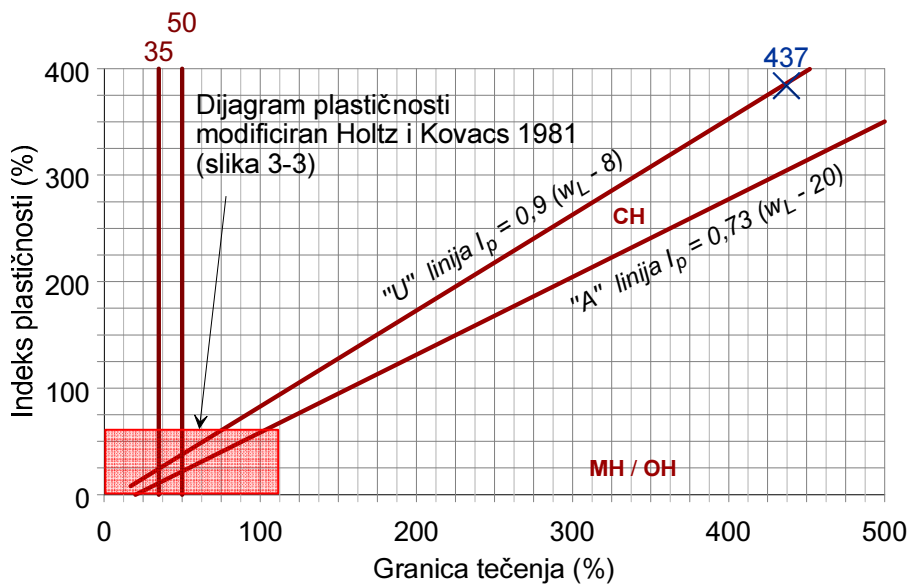
Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja granice tečenja i granice plastičnosti

		Točka 1	Točka 2	Točka 3	Točka 4
Prosječno prodiranje	(mm)	10,1	14,7	18,4	22,9
Vlažnost	(%)	280,14	352,28	402,94	482,89
<b>Granica tečenja <math>w_L</math></b>	(%)	<b>437,0</b>			
		Mjerenje 1		Mjerenje 2	
Granica plastičnosti	(%)	52,39		53,33	
<b>Granica plastičnosti <math>w_p</math></b>	(%)	<b>52,86</b>			
<b>Indeks plastičnosti <math>I_p</math></b>	(%)	<b>384,14</b>			

Prema tome, radi se o bentonitnoj glini s granicom tečenja 437,0%, granicom plastičnosti 52,86% i indeksom plastičnosti 384,14%. Na temelju navedenih svojstava te uz upotrebu dijagrama plastičnosti navedeni materijal je klasificiran kao glina visoke plastičnosti klasifikacijske oznake CH. Usporedbom sa slikom 3-3, vidljivo je da uzorak pripada skupini tala s montmorillonitom kao dominantnim mineralom.



Slika 3-4 Određivanje granice tečenja



Slika 3-5 Klasifikacija bentonitne gline

### 3.3.2 Indeks slobodnog bubrenja

Indeks slobodnog bubrenja koristi se za ispitivanje svojstava glinenih materijala povezanih s njihovim brtvenim svojstvima te za kontrolu kvalitete proizvodnje glinenih geosintetičkih barijera. Određivanje indeksa slobodnog bubrenja bentonitne gline provedeno je na pripremljenom samljevenom uzorku pri čemu je 100% uzorka prošlo kroz sito veličine otvora 70  $\mu\text{m}$ . Uzorak je pripremljen sušenjem na temperaturi od 60°C tijekom 48 sati. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ASTM D 5890. Ukupna masa uzorka od 2,00 g dodaje se postupno po 0,1 g svakih 10 minuta u menzuru kapaciteta 100 ml ispunjenu demineraliziranim vodom. Nakon što je prošlo ukupno 18 sati od završetka usipanja očitani su volumeni nabubrenog uzorka. Tablica 3-9 prikazuje rezultate ispitivanja volumena slobodnog bubrenja bentonitne gline. Prosječni volumen bubrenja na temelju tri ispitivanja iznosio je 31,0 ml/2 g.

Tablica 3-9 Određivanje volumena slobodnog bubrenja

		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3
Očitani volumen	(ml/2 g)	30,0	31,0	32,0
Temperatura suspenzije tijekom očitavanja volumena	°C	24,1	24,1	24,1
Prosječni volumen bubrenja	(ml/2 g)	<b>31,0</b>		

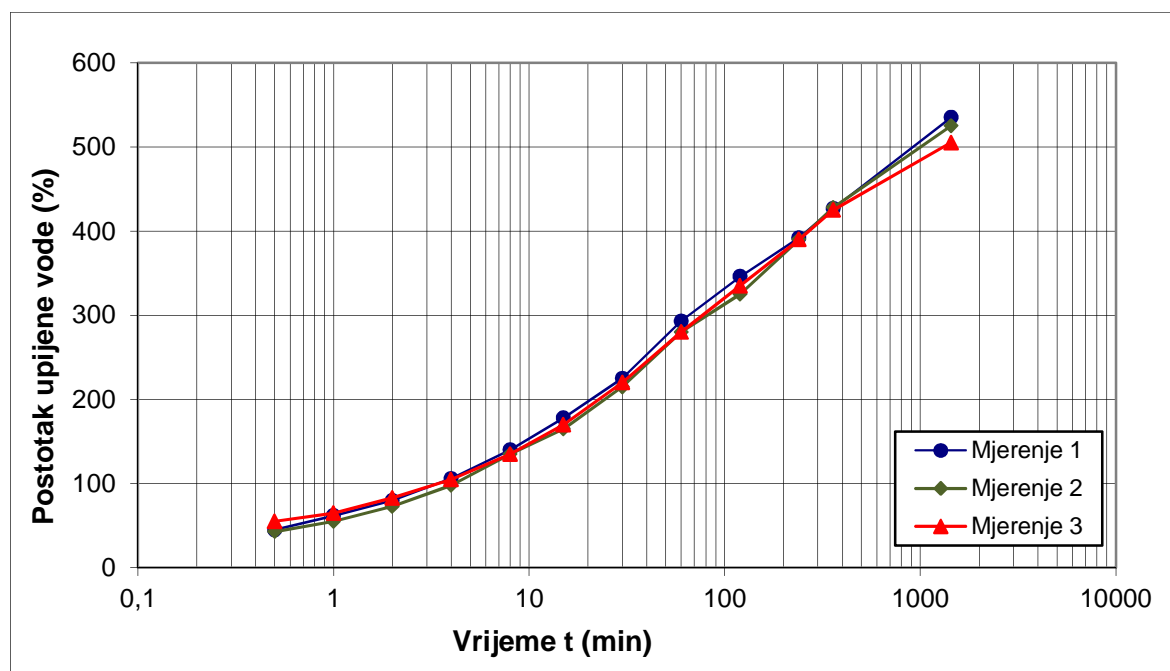
### 3.3.3 Sposobnost upijanja vode

Sposobnost upijanja vode također služi za ispitivanje svojstava glinenih materijala povezanih s njihovim brtvenim svojstvima. Određivanje sposobnosti upijanja vode bentonitne gline provedeno je na samljevenom uzorku sa 100% prolaza kroz sito veličine otvora 70  $\mu\text{m}$  osušenom na temperaturi od 60°C tijekom 48 sati. Ispitivanje je provedeno sukladno normi DIN 18132, što znači da je 0,1 g pripremljenog uzorka usipano na staklenu filter pločicu uređaja. Volumen upijanja mjeren je u intervalima od 30 sekundi do 24 sata. Obzirom da dolazi i do isparavanja vode iz uređaja, prilikom mjerenja se koristi i referentni uređaj kojim se mjeri volumen isparene tekućine. Postotak upijene vode definiran je kao odnos mase upijene vode i mase suhog uzorka. Sposobnost upijanja vode predstavlja postotak upijene vode nakon 24 sata (1440 min). Kao ispitna tekućina upotrijebljena je demineralizirana voda. Tablica 3-10 prikazuje rezultate ispitivanja sposobnosti upijanja vode.

Tablica 3-10 Rezultati ispitivanja sposobnosti upijanja vode

Vrijeme očitavanja (min)	Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3
	Maseni postotak upijene vode (%)		
0,5	45	55	43
1	62	65	55
2	80	83	73
4	106	105	98
8	140	135	135
15	178	170	165
30	225	220	215
60	293	280	280
120	346	435	325
240	392	390	390
360	427	425	428
1440	535	505	525
Sposobnost upijanja vode		<b>521,7%</b>	

Na temelju tri ispitivanja sposobnost upijanja vode uzorka bentonitne gline iznosila je 521,7%. Slika 3-6 prikazuje vremenske krivulje upijanja vode bentonitne gline.



Slika 3-6 Vremenske krivulje upijanja vode bentonitne gline

### 3.3.4 Indeks gubitka fluida

Indeks gubitka fluida indeksni je pokazatelj koji služi za ispitivanje svojstava glinenih materijala povezanih s njihovim brtvenim svojstvima te za kontrolu kvalitete proizvodnje glinenih geosintetičkih barijera. Određivanje indeksa gubitka fluida bentonitne gline provedeno je na pripremljenom samljevenom uzorku sa 100% prolaza kroz sito veličine otvora 70  $\mu\text{m}$  osušenom na temperaturi od 60°C tijekom 48 sati. Ispitivanje je provedeno sukladno normi ASTM 5891, što znači da je 22,5 $\pm$ 0,01 g pripremljenog uzorka izmiješano sa 350 $\pm$ 5 ml demineralizirane vode u menzuri kapaciteta 500 ml. Nakon 16 sati suspenzija je prelivena u cilindar s filter papirom. Nakon uspostavljanja tlaka u cilindru od približno 700 kPa, započinje se mjeriti vrijeme i količina tekućine u menzuri. Nakon što je proteklo 7,5 minuta, prva menzura koja se nalazi ispod cilindra se zamjenjuje drugom. U drugoj menzuri sakupljana je tekućina daljnjih 22,5 minute. Volumen gubitka fluida se dobije kao dvostruka vrijednost volumena tekućine očitnog u drugoj menzuri. Tablica 3-11 prikazuje rezultate ispitivanja indeksa gubitka fluida bentonitne gline. Na temelju tri ispitivanja dobivena je prosječna vrijednost indeksa gubitka fluida od 12,0 ml.

Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja gubitka fluida bentonitne gline

		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3
Tlak u cilindru	(kPa)	684	650	665
Volumen tekućine nakon 7,5 min	(ml)	6,0	5,0	5,0
Volumen tekućine nakon 22,5 min	(ml)	6,0	6,0	6,0
Indeks gubitka fluida	(ml)	12,0	12,0	12,0
Prosječna vrijednost indeks gubitka fluida	(ml)		<b>12,0</b>	

### 3.4 Zaključak

Temeljem provedenih ispitivanja mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- Uzorak bentonitne gline sadrži 80-85% smektita što odgovara navedenim literaturnim podacima o mineraloškom sastavu proizvoda Volclay MX 80 i Volclay (76,2-83,7% smektita). Usporedbom literaturnih podataka o kemijskom sastavu uzoraka Volclay i Volclay MX 80 s vlastitim kemijskim analizama vidljiva je velika podudarnost u kemijskom sastavu uzoraka. Na osnovu opisanih literaturnih podataka i provedenih vlastitih istraživanja može se zaključiti da se radi o natrijskoj bentonitnoj glini koja kao glavnu mineralnu fazu sadrži dioktaedrijski smektit, montmorillonit.
- Promatranjem fizikalnih osobina uzorak granula bentonitne gline ima gustoću čvrstih čestica  $2,707 \text{ Mg/m}^3$ . Količina od 7,2% zrna bentonitne gline je veličine sitnog šljunka, 92,35% zrna je veličine pijeska (od toga 76,95% krupnog pijeska) a 0,45% zrna je veličine praha i gline.
- Rezultati ispitivanja indeksnih svojstava pokazuju da se radi o bentonitnoj glini granice tečenja 437,0%, granice plastičnosti 52,86% i indeksa plastičnosti 384,14% što se prema dijagramu plastičnosti klasificira kao glina visoke plastičnosti. Prema modificiranom dijagramu plastičnosti (Holtz & Kovacs 1981) uzorak pripada skupini bubrivih stijena s montmorillonitom kao dominantnim mineralom.
- Izmjerene prosječne vrijednosti volumena slobodnog bubrenja uzorka bentonitne gline iznose 31,0 ml/2 g, sposobnosti upijanja vode 521,7% te indeksa gubitka fluida 12,0 ml. Uz to sposobnost ionske izmjene iznosi  $88,63 \pm 6,51 \text{ meq/100g}$  i ukupna površina bentonitne gline  $780,77 \text{ m}^2/\text{g}$ . Može se zaključiti da vrijednosti indeksnih svojstava kao i sposobnosti ionske zamjene i ukupne površine također ukazuju da se radi o uzorku natrijske bentonitne gline.

## 4 MJERENJE HIDRAULIČKE PROVODLJIVOSTI BENTONITNE GLINE U TROOSNOJ ĆELIJI

### 4.1 Program ispitivanja

Ispitivanja koeficijenta hidrauličke provodljivosti i koeficijenta izotropne konsolidacije su za različite stupnjeve opterećenja provedena u troosnoj ćeliji. Uzorci su formirani postupkom hidratacije granula bentonitne gline u kalupu. Ispitivanja su provedena u uvjetima potpunog zasićenja metodom stalne razlike tlakova prema normi ASTM D 5084. Kao manja odstupanja od preporuka norme može se navesti korištenje demineralizirane vode kao ispitne tekućine umjesto standardne ispitne tekućine (vodovodna voda ili u slučaju vodovodne vode vrlo velike tvrdoće, otopina soli  $\text{CaCl}_2$  koncentracije 0,01 mol/l). Također, primijenjeni su nešto veći gradijenti u odnosu na preporučene vrijednosti. Za tla hidrauličke provodljivosti manje od  $10^{-9}$  m/s preporučena vrijednost hidrauličkog gradijenta trebala bi biti manja od 30. Međutim, Shackelford et al. (2000) su došli do zaključka da na hidrauličku provodljivost, kada su u pitanju glinene geosintetičke barijere, dominantan utjecaj imaju efektivna naprezanja, te se pri ispitivanjima hidrauličke provodljivosti uobičajeno koriste hidraulički gradijenti od 50-600.

Ispitivanje je započelo ugradnjom pripremljenog uzorka u troosnu ćeliju nakon čega su uslijedile dvije faze saturacije (saturacija I i saturacija II). Saturacija I provedena je uz ćelijski tlak od 170 kPa dok su vrijednosti povratnog i pornog tlaka iznosile 150 kPa. Nakon toga, izmjeren je B parametar. Saturacija II provedena je uz ćelijski tlak od 220 kPa te vrijednosti povratnog i pornog tlaka od 200 kPa. Nakon ove faze saturacije također je izmjeren B parametar. Dakle, u obje faze saturacije efektivna naprezanja u uzorku iznosila su 20 kPa, i nakon svake, izmjerene su vrijednosti B parametra. Nakon saturacije uslijedilo mjerenje koeficijenta hidrauličke provodljivosti u 4 serije (Tablica 4-1). U seriji I uzorak je stavljen na konsolidaciju povećanjem ćelijskog tlaka na 250 kPa. Dakle, uzorak je konsolidiran pri inkrementu ćelijskog tlaka od 30 kPa i ukupnom efektivnom naprezanju od 50 kPa. Nakon faze konsolidacije, pristupilo se mjerenju koeficijenta hidrauličke provodljivosti odnosno porni tlak na dnu uzorka povećan je na 220 kPa. Uslijed razlike u vrijednostima pornog i povratnog tlaka na krajevima uzorka dolazi do tečenja vode kroz uzorak. Tijekom ispitivanja mjeren je volumen vode koji uđe i izađe iz uzorka u nekom vremenu. U seriji II ćelijski tlak je povećan za 50 kPa tj. na 300 kPa. Nakon toga provedena je faza konsolidacije i mjerenje koeficijenta hidrauličke provodljivosti. U seriji III ćelijski tlak je povećan za 100 kPa tj. na

ukupno 400 kPa nakon čega je provedena faza konsolidacije i mjerenja koeficijenta hidrauličke provodljivosti. U seriji IV ćelijski tlak je povećan za dodatnih 100 kPa tj. na 500 kPa nakon čega je provedena faza konsolidacije i mjerenja koeficijenta hidrauličke provodljivosti. Nakon završetka ispitivanja, izmjerene su dimenzije uzorka te je određena završna vlažnost.

Ispitivanja su provedena u uređaju za troosni posmik tvrtke Wykeham Farrance pri čemu je korištena ćelija za uzorke promjera 70 mm. Sustav je omogućavao neovisnu regulaciju ćelijskog, povratnog i pornog tlaka na uzorku (Slika 4-1). Tijekom ispitivanja praćeni su slijedeći parametri ispitivanja: vrijednosti ćelijskog, povratnog i pornog tlaka te količina ispitne tekućine koja ulazi i izlazi iz uzorka. Mjerenje ćelijskog tlaka provedeno je pomoću elektroničkog mjerila tlaka priključenog na izvod iz ćelije. Na izvode s donje i gornje strane uzorka također su bila priključena elektronička mjerila tlaka kao i uređaji za mjerenje promjene volumena istisnute odnosno utisnute ispitne tekućine.

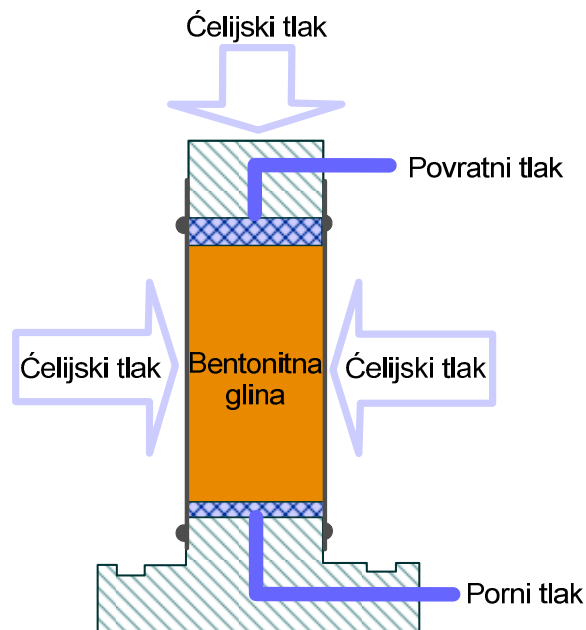
Tablica 4-1 Program ispitivanja u troosnoj ćeliji

	Ćelijski tlak (kPa)	Povratni tlak (kPa)	Porni tlak (kPa)	Inkrement naprezanja (kPa)	Efektivno naprezanje (kPa)
Seriya I	250	200	220	30	50
Seriya II	300	200	220	50	100
Seriya III	400	200	220	100	200
Seriya IV	500	200	220	100	300

U odnosu na ispitivanja provedena u uređaju za izravni posmik i edometru sam postupak ugradnje je bio nešto različit. Naime, ugradnja usipanjem granula tvorničke vlažnosti oko 12% bi predstavljala problem. Kao uvjet da bi se moglo provesti ispitivanje, uzorke je bilo potrebno saturirati do minimalno 95% zasićenosti. Saturacija praktički suhog uzorka bila bi vrlo dugotrajna a i pitanje je da li bi bilo moguće postići zadovoljavajući stupanj zasićenosti pri tlakovima koje omogućuje oprema. Stoga se postupak ugradnje sastojao od dodavanja granula na filter papir i poroznu pločicu koji su se nalazili u kalupu promjera 70 mm. Dodane su granule bentonitne gline tako da je visina sloja granula u kalupu približno iznosila 10 mm. Nakon toga, na uzorak bentonitne gline stavljen je filter papir, porozna pločica i na kraju uteg kojim se osiguralo vertikalno opterećenje od 3 kPa što je omogućilo ravnomjerno bubrenje.



Na kraju je dodana demineralizirana voda i uzorak je ostavljen u tim uvjetima tijekom narednih 7 dana.



Slika 4-1 Troosna ćelija

Nakon 7 dana, uzorak je izvađen iz kalupa, izmjerene su dimenzije i masa te je ovako pripremljen uzorak ugrađen u troosnu ćeliju (Slika 4-2).

U tablici 4-2 prikazane su vrijednosti početnih karakteristika uzorka prije ugradnje u troosnu ćeliju. Prikazane su početna masa i vlažnost bentonitne gline koja će se upotrijebiti za pripremu u cilindru. Zatim su prikazane karakteristike uzorka nakon pripreme što su ujedno svojstva s kojima je uzorak ugrađivan u troosnu ćeliju. Dakle, u troosnu ćeliju je ugrađen hidratizirani uzorak visine 41,87 mm, vlažnosti 231,77%, suhe gustoće  $0,366 \text{ Mg/m}^3$  i koeficijenta pora 6,396.

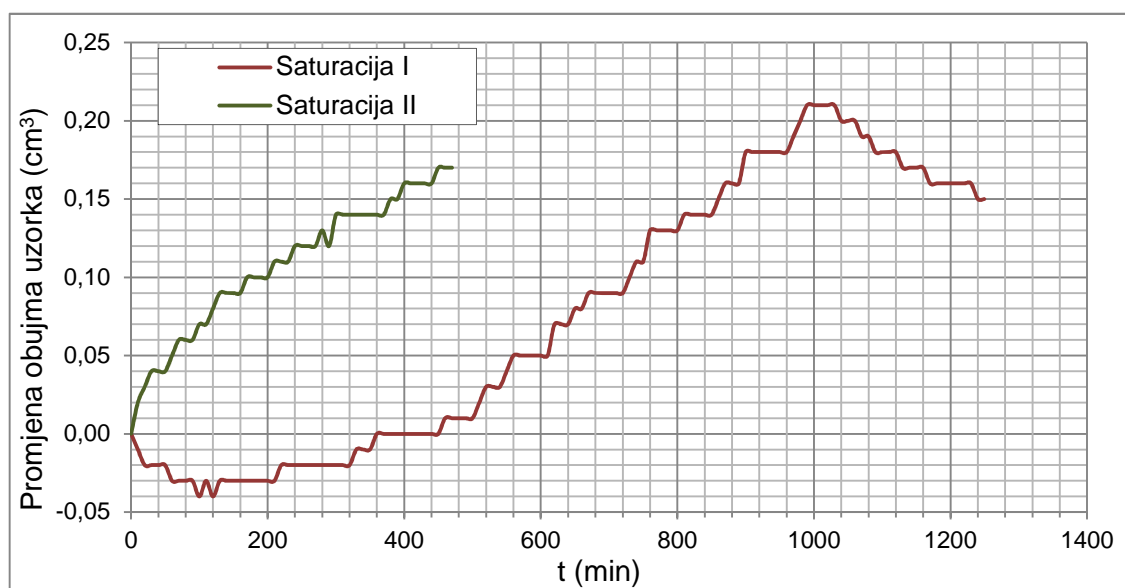


Slika 4-2 Uzorak pripremljen za ugradnju u troosnu ćeliju

Tablica 4-2 Početne karakteristike uzorka

Početna masa uzorka (g)	67,68
Početna masa suhog uzorka (g)	60,69
Početna visina uzorka (mm)	10
Početna vlažnost uzorka	11,51%
Visina uzorka nakon pripreme (mm)	41,87
Promjer uzorka nakon pripreme (mm)	71,01
Masa uzorka nakon pripreme (g)	201,37
Suha gustoća uzorka nakon pripreme ( $\text{Mg/m}^3$ )	0,366
Vlažnost uzorka nakon pripreme	231,77%
Koeficijent pora uzorka nakon pripreme	6,396
Stupanj saturacije nakon pripreme	96,21%

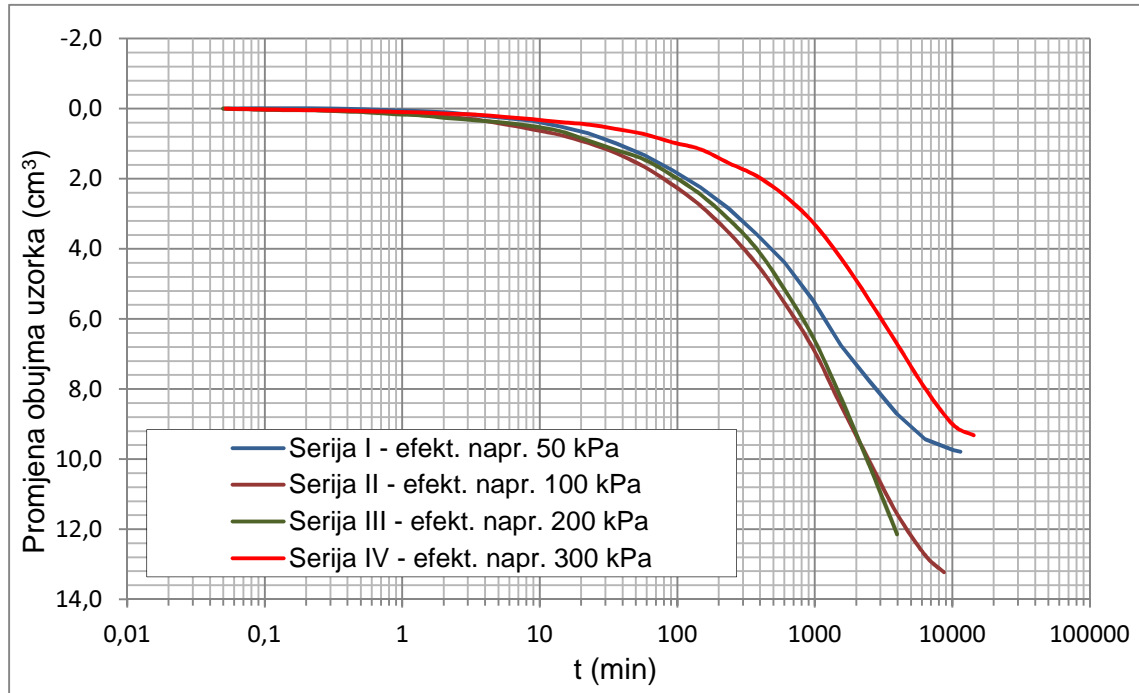
Zbog pripreme uzorka prije ugradnje, faze saturacije u ćeliji su bile kratkotrajne. Saturacija je provedena u dvije faze, saturacija I i saturacija II. Saturacija I je provedena pri ćelijskom tlaku 170 kPa i povratnom tlaku 150 kPa, odnosno pri efektivnom naprežanju 20 kPa. Saturacija II je provedena pri ćelijskom tlaku 220 kPa i povratnom tlaku 200 kPa, odnosno pri istom efektivnom naprežanju. Slika 4-3 prikazuje promjenu volumena uzorka u fazama saturacije. Može se uočiti da je u dvije provedene faze saturacije ukupno upijanje uzorka iznosilo  $0,32 \text{ cm}^3$ . Mala količina upijene tekućine ukazuje da je uzorak zasićen, što je potvrđeno i mjerenjem B parametra koji je na kraju faze saturacija II iznosio  $B = 0,98$ .



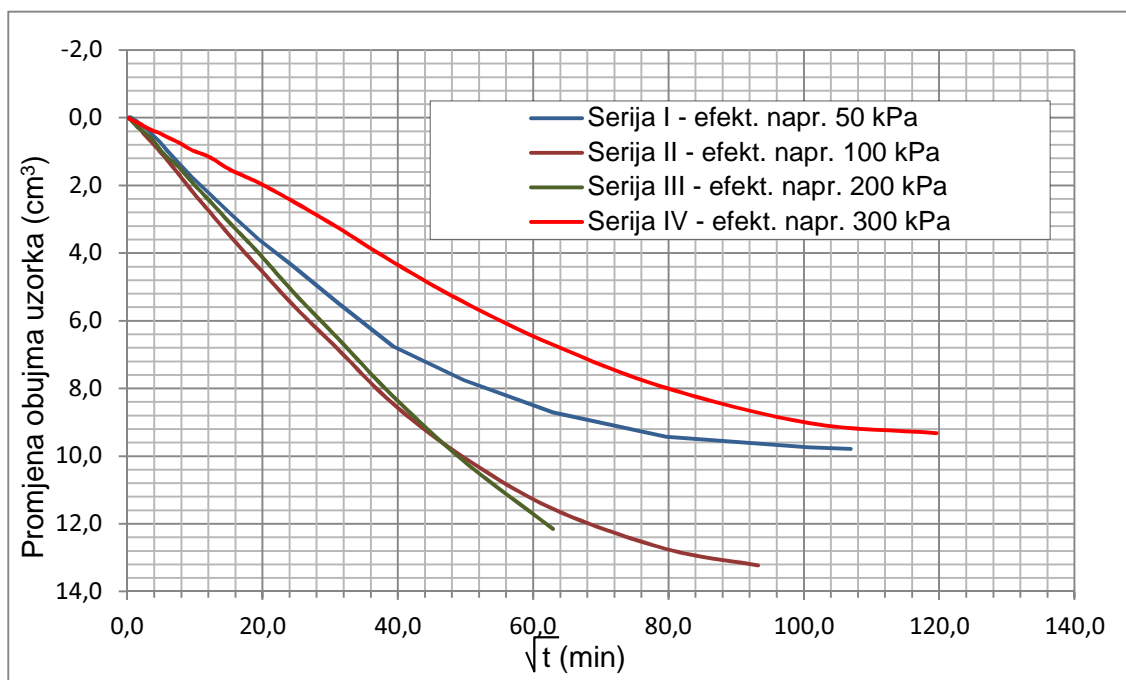
Slika 4-3 Saturacija uzorka u troosnoj ćeliji

## 4.2 Koeficijent izotropne konsolidacije

Promjene obujma uzorka u pojedinim serijama tijekom izotropne konsolidacije prikazane su u ovisnosti o logaritamskom mjerilu vremena (Slika 4-4) te dijagramom promjene obujma uzoraka u odnosu na  $\sqrt{t}$  (Slika 4-5). U seriji III je zbog nestanka struje došlo do prekida mjerenja u fazi konsolidacije te na krivulji nije vidljiv završetak primarne konsolidacije.



Slika 4-4 Promjena obujma uzorka u logaritamskom mjerilu vremena



Slika 4-5 Promjena obujma uzorka u ovisnosti o  $\sqrt{t}$

Kang i Shackelford (2010) dolaze do zaključka da je Terzaghijevu teoriju jednodimenzionalne konsolidacije moguće primijeniti i u uvjetima izotropne kompresije obzirom da je pri obujamskoj deformaciji uzoraka vertikalna komponenta zabilježena kao dominantna. Stoga su na temelju konsolidacijskih krivulja (Slika 4-4 i Slika 4-5) određene vrijednosti koeficijenta konsolidacije  $c_v$ .

Koeficijent konsolidacije određen je dvjema metodama: Casagrande-ovom metodom na temelju promjene obujma u logaritamskom mjerilu vremena (Slika 4-4) prema izrazu (4-1) i Taylor-ovom metodom na temelju prikaza promjene obujma uzorka u ovisnosti o  $\sqrt{t}$  (Slika 4-5) prema izrazu (4-2).

Izraz za koeficijent konsolidacije prema Casagrande-u:

$$c_v = \frac{0,197 \cdot d^2}{t_{50}} \quad (4-1)$$

Izraz za koeficijent konsolidacije prema Taylor-u:

$$c_v = \frac{0,848 \cdot d^2}{t_{90}} \quad (4-2)$$

gdje su:

$d$  – prosječni put dreniranja u određenom ciklusu opterećenja, (mm)

$t_{50}$  – vrijeme potrebno za ostvarenje 90% primarne konsolidacije, (min)

$t_{90}$  – vrijeme potrebno za ostvarenje 50% primarne konsolidacije, (min).

Tablica 4-3 prikazuje rezultate proračuna provedenih na temelju konsolidacijskih krivulja. Prikazane su vrijednosti koeficijenta izotropne konsolidacije  $c_{vi}$  te vrijednosti modula stišljivosti  $M_v$  za pojedine cikluse opterećenja. Za raspon efektivnih naprežanja od 50-300 kPa dobivene su vrijednosti  $1,80 \cdot 10^{-9}$ - $4,25 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s koeficijenta izotropne konsolidacije prema Casagrande-u te  $2,53 \cdot 10^{-9}$ - $4,25 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s prema Taylor-u. Iz podataka se može vidjeti da su koeficijenti izotropne konsolidacije dobiveni Casagrande-ovom metodom u pravilu nešto manjih vrijednosti u odnosu na vrijednosti dobivene Taylor-ovom metodom.

Tablica 4-3 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije

Inkrement opterećenja (kPa)	E (MPa)	Casagrande		Taylor	
		$e_{50}$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$e_{90}$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)
50	0,57	5,924	$1,80 \cdot 10^{-9}$	5,804	$2,53 \cdot 10^{-9}$
100	0,65	5,474	$1,23 \cdot 10^{-9}$	5,357	$2,07 \cdot 10^{-9}$
300	1,50	4,538	$4,25 \cdot 10^{-10}$	4,382	$4,05 \cdot 10^{-10}$

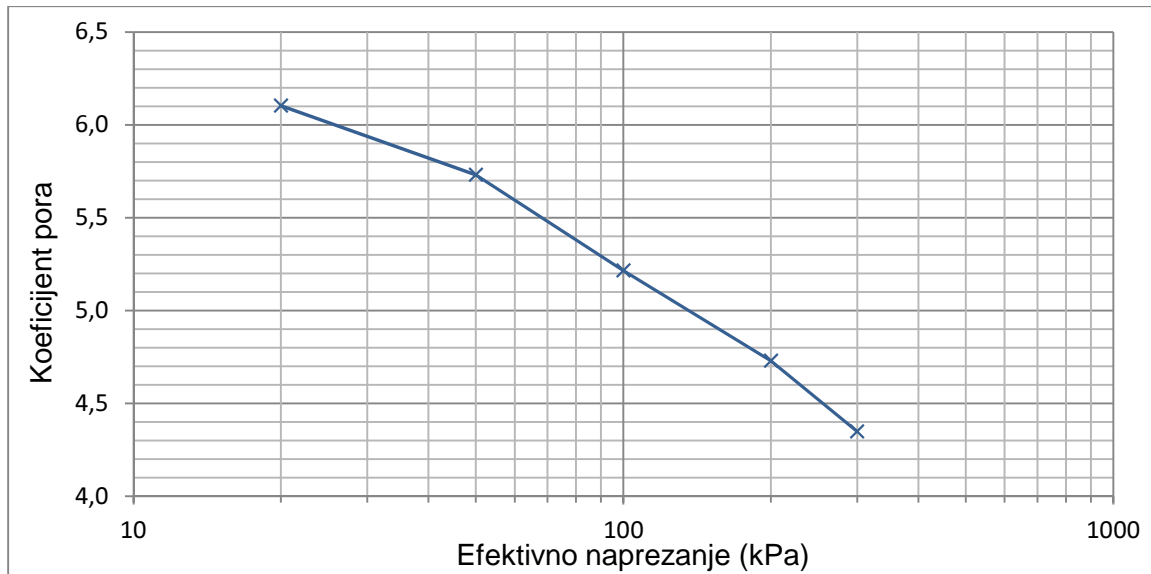
### 4.3 Mjerenje koeficijenta hidrauličke provodljivosti

Tablica 4-4 prikazuje rezultate ispitivanja hidrauličke provodljivosti. Može se uočiti da se vrijednosti hidrauličkog gradijenta tijekom ispitivanja kreću od 40,4 do 54,55 što je nešto više od preporuka norme ASTM D 5084 ali u granicama preporučenim u literaturi (Shackelford et al. 2000). Dobivene su vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti od  $1,30 \cdot 10^{-11}$  m/s pri efektivnim napreznjima od 50 kPa do  $4,61 \cdot 10^{-12}$  pri efektivnim napreznjima od 300 kPa.

Tablica 4-4 Rezultati ispitivanja hidrauličke provodljivosti

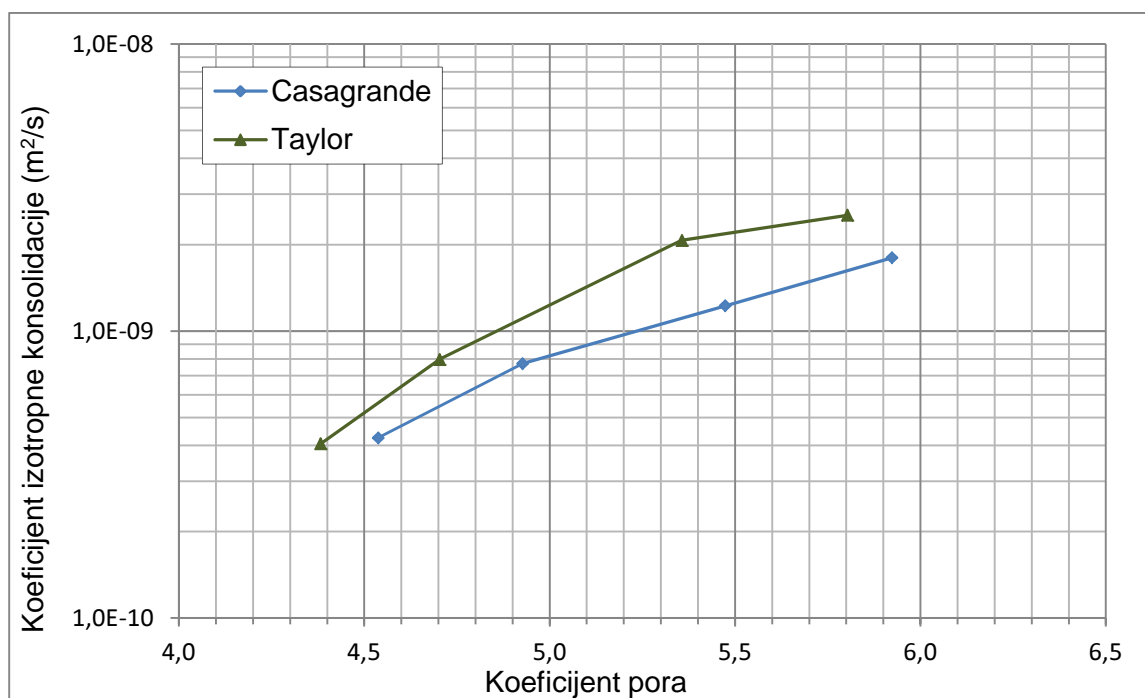
Efektivno napreznje (kPa)	42,5	92,5	193,0	291,0
Visina uzorka (mm)	38,11	35,19	32,44	30,28
Promjer uzorka (mm)	69,48	67,61	65,76	64,23
Ćelijski tlak (kPa)	250,0	300,0	400,0	500,0
Povratni tlak (kPa)	200,0	200,0	200,0	200,0
Porni tlak (kPa)	215,0	215,0	214,0	218,0
Razlika tlakova kod ispitivanja hidrauličke provodljivosti (kPa)	15	15	14	18
Hidraulički gradijent	40,40	45,16	43,73	54,55
B parametar	0,98	1,00	1,00	1,00
Koeficijent pora	5,731	5,216	4,730	4,348
Koeficijent hidrauličke provodljivosti (m/s)	$1,30 \cdot 10^{-11}$	$1,04 \cdot 10^{-11}$	$6,29 \cdot 10^{-12}$	$4,61 \cdot 10^{-12}$

Slika 4-6 prikazuje vrijednosti koeficijenta pora pri različitim efektivnim napreznjima. Koeficijent pora se kretao od 6,104 nakon faze saturacije do 4,348 pri efektivnim napreznjima od 300 kPa. Ove vrijednosti koeficijenta pora su nešto veće u odnosu na dobivene u edometru ali to je očekivano obzirom na drugačiji način pripreme uzoraka.



Slika 4-6 Ovisnost koeficijenta pora o efektivnim napreznjima

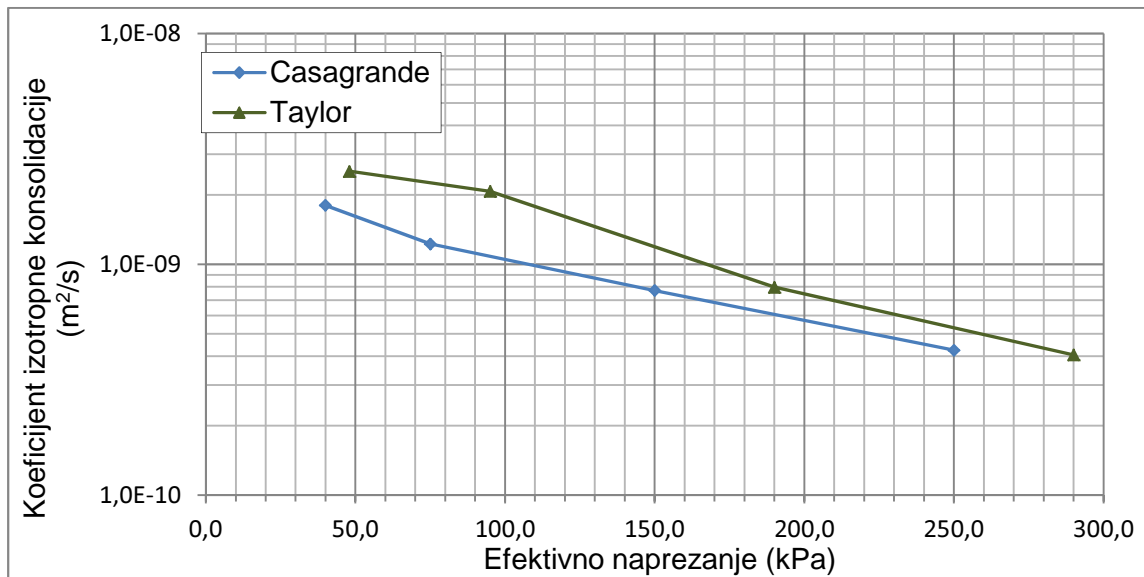
Slika 4-7 prikazuje ovisnost koeficijenta konsolidacije o koeficijentu pora. Može se uočiti da se sa smanjenjem koeficijenta pora smanjuje i koeficijent izotropne konsolidacije. Također, slika 4-8 prikazuje odnos koeficijenta izotropne konsolidacije i efektivnih napreznja. Vidljiv je isti trend, s porastom efektivnih napreznja smanjuje se i koeficijent konsolidacije.



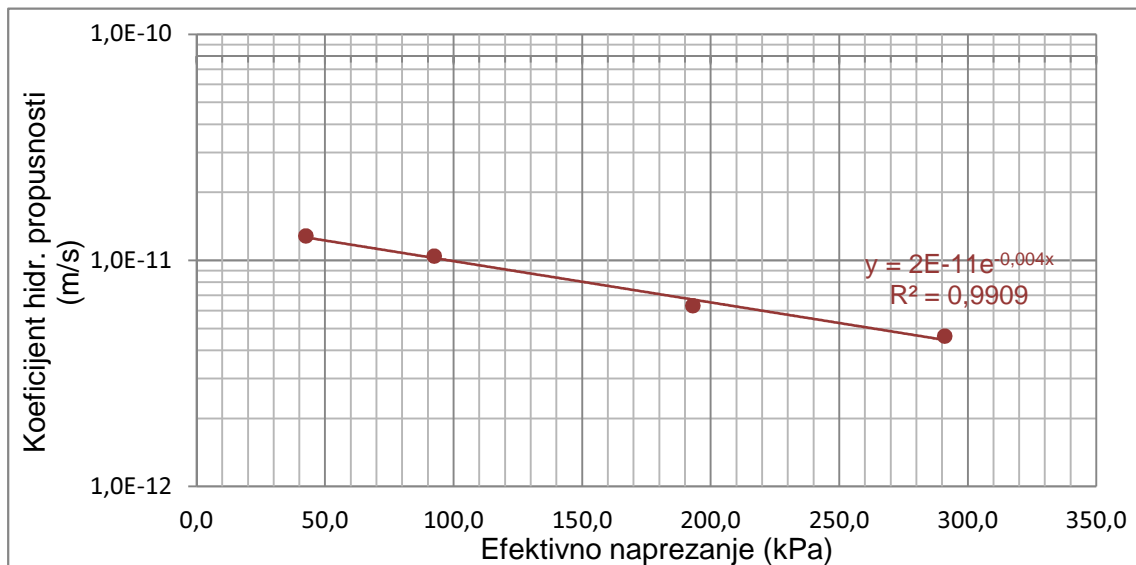
Slika 4-7 Ovisnost koeficijenta izotropne konsolidacije o koeficijentu pora

Na slikama 4-9 i 4-10 prikazan je odnos koeficijenta hidrauličke provodljivosti i efektivnog napreznja odnosno koeficijenta hidrauličke provodljivosti i koeficijenta pora. Porast efektivnih napreznja ima za posljedicu smanjenje koeficijenta hidrauličke

provodljivosti odnosno porastom koeficijenta pora koeficijent hidrauličke provodljivosti se povećava.

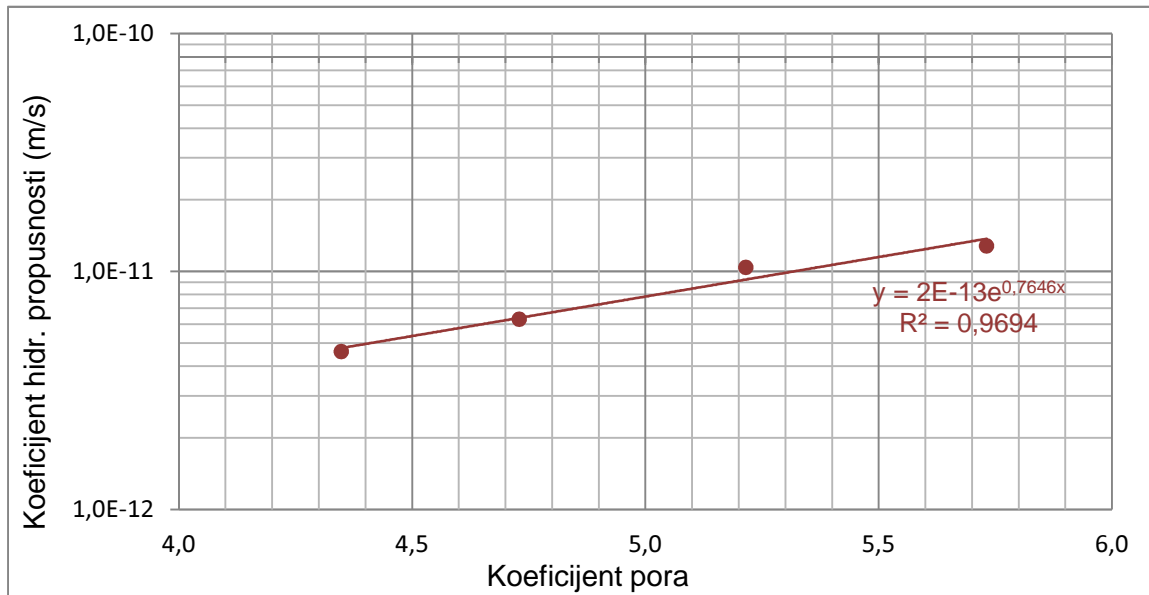


Slika 4-8 Ovisnost koeficijenta izotropne konsolidacije o efektivnim naprežanjima



Slika 4-9 Ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti o efektivnim naprežanjima





Slika 4-10 Ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti o koeficijentu pora

## 5 1D KONSOLIDACIJA I BUBRENJE BENTONITNE GLINE

### 5.1 Program ispitivanja

Pokusi bubrenja i 1-D konsolidacije bentonitne gline provedeni su u edometru na uzorku bentonitne gline u obliku granula, bez uključivanja geosintetičke komponente. Provedene su 2 serije ispitivanja (Tablica 5-1) koje su se sastojale od po 3 uzorka opterećena različitim vrijednostima normalnih naprezanja u fazi bubrenja, identičnih vrijednosti kao i pri ispitivanjima izravnog posmika (50, 100 i 200 kPa). Prva serija uzoraka puštena je da bubri tijekom perioda od 276 dana. Nakon završetka ispitivanja uzorak je izvađen iz uređaja te je određena završna vlažnost. Drugom serijom ispitivanja određivane su konsolidacijske karakteristike bentonitne gline, na uzorcima koji su tijekom 7 dana bujali uz opterećenje od 50, 100 i 200 kPa. Nakon sedam dana, provedeni su pokusi 1-D konsolidacije ciklusima opterećenja i rasterećenja. Završetkom ispitivanja i vađenja uzorka određena je završna vlažnost pojedinog uzorka.

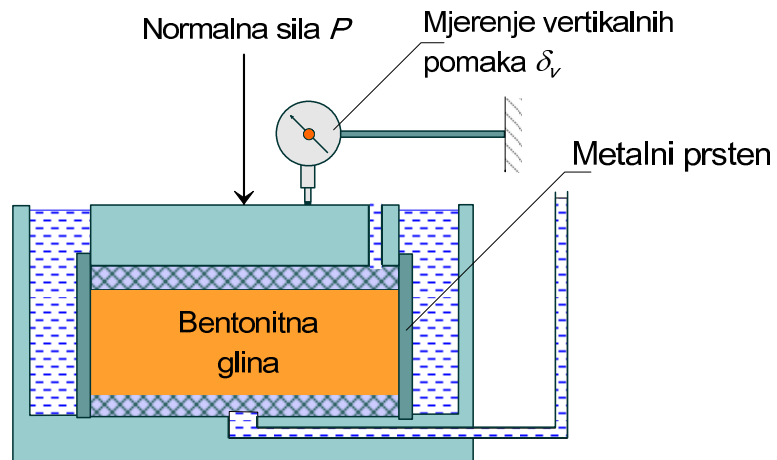
Tablica 5-1 Program ispitivanja u edometru

	Bubrenje		Konsolidacija
	Normalno naprezanje (kPa)	Period (dana)	Ciklusi opterećenja i rasterećenja (kPa)
Seriya I		276	-
Seriya II	50, 100 i 200	7	50-100-200-400-200 100-200-400-800-200 200-400-800-400-200

Za provođenje pokusa korišten je standardni edometar s ćelijama promjera 74 i visine 20 mm. Slika 5-1 shematski prikazuje poprečni presjek edometarske ćelije. Sustav je omogućavao automatsko praćenje vertikalnih pomaka  $\delta$ , tijekom ispitivanja dok je normalna odnosno vertikalna sila  $P$  nanošena upotrebom utega.

Postupak ugradnje bio je gotovo identičan kao i prilikom ispitivanja u izravnom posmiku. Bentonitna glina je dodana u edometarsku ćeliju pri čemu nije posebno pripremana, već su usipane granule vlažnosti oko 12%. Pri ugradnji uvijek je usipana ista masa granula bentonitne gline (50,0 g) pri čemu bentonitna glina nije zbijana već je samo lagano poravnata. Nakon ugradnje, uzorci su opterećeni odgovarajućim normalnim naprezanjem, nakon čega je

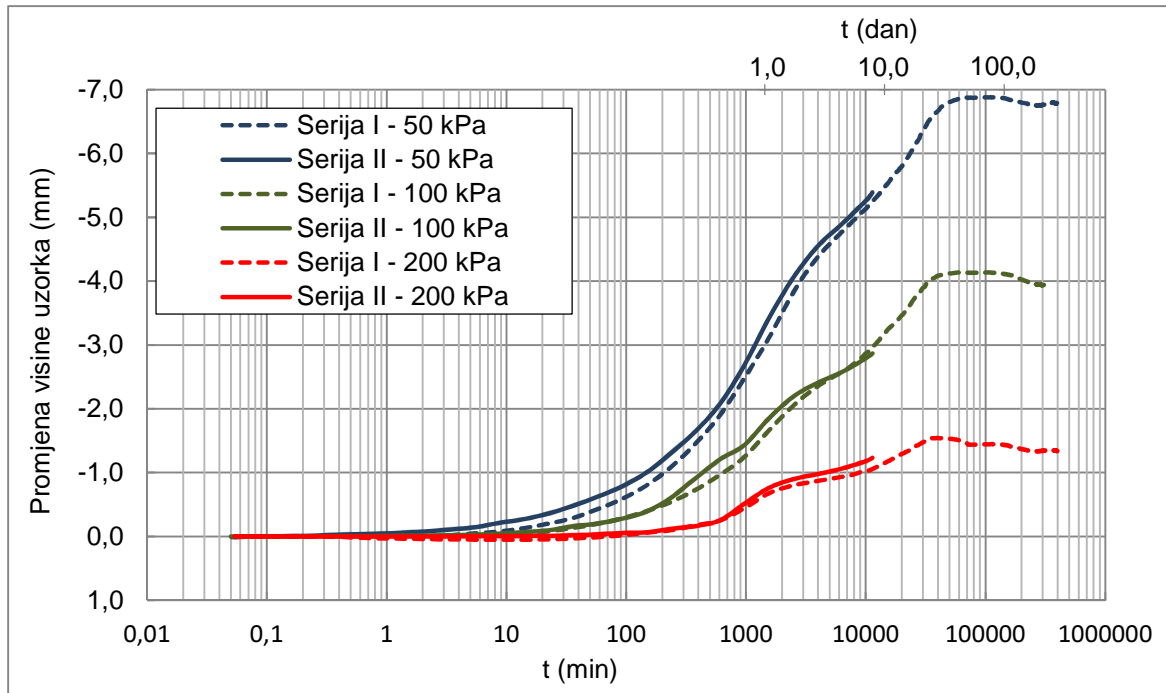
dodana demineralizirana voda te je uzorak ostavljen da bubri pri odgovarajućem normalnom naprezanju.



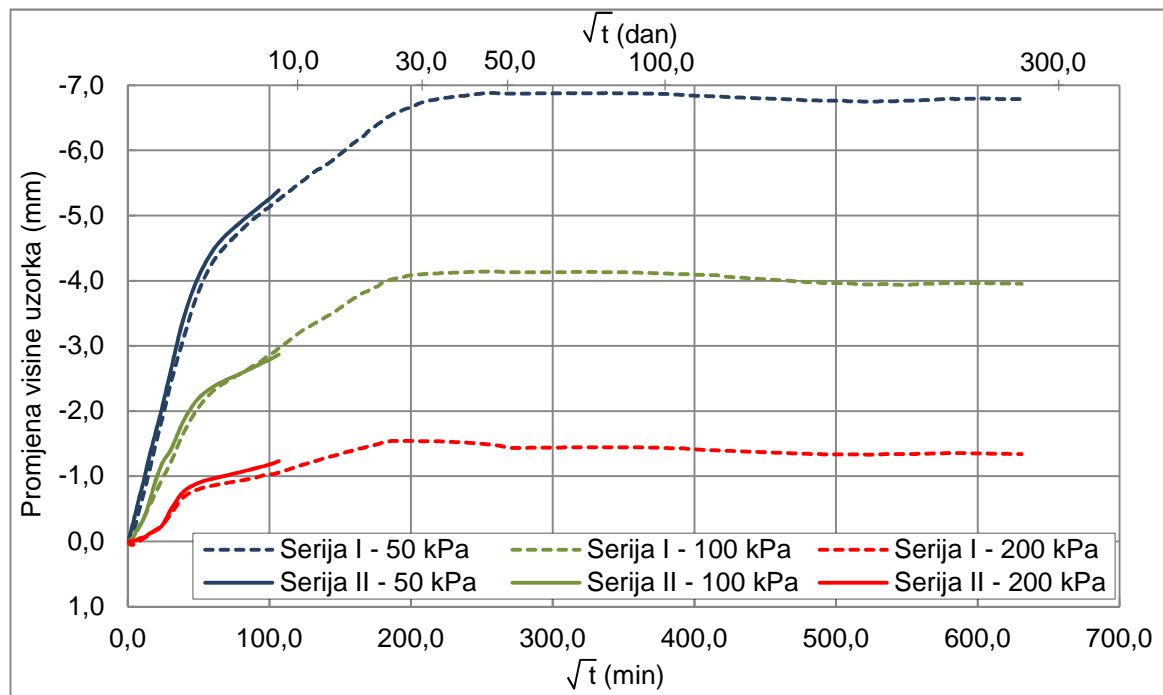
Slika 5-1 Poprečni presjek edometarske ćelije

## 5.2 Ispitivanja bubrivosti

Rezultati ispitivanja bubrivosti bentonitne gline prikazani su na dijagramu ovisnosti promjene visine uzorka u logaritamskom mjerilu vremena (Slika 5-2) te dijagramu promjene visine uzorka u ovisnosti o  $\sqrt{t}$  (Slika 5-3).



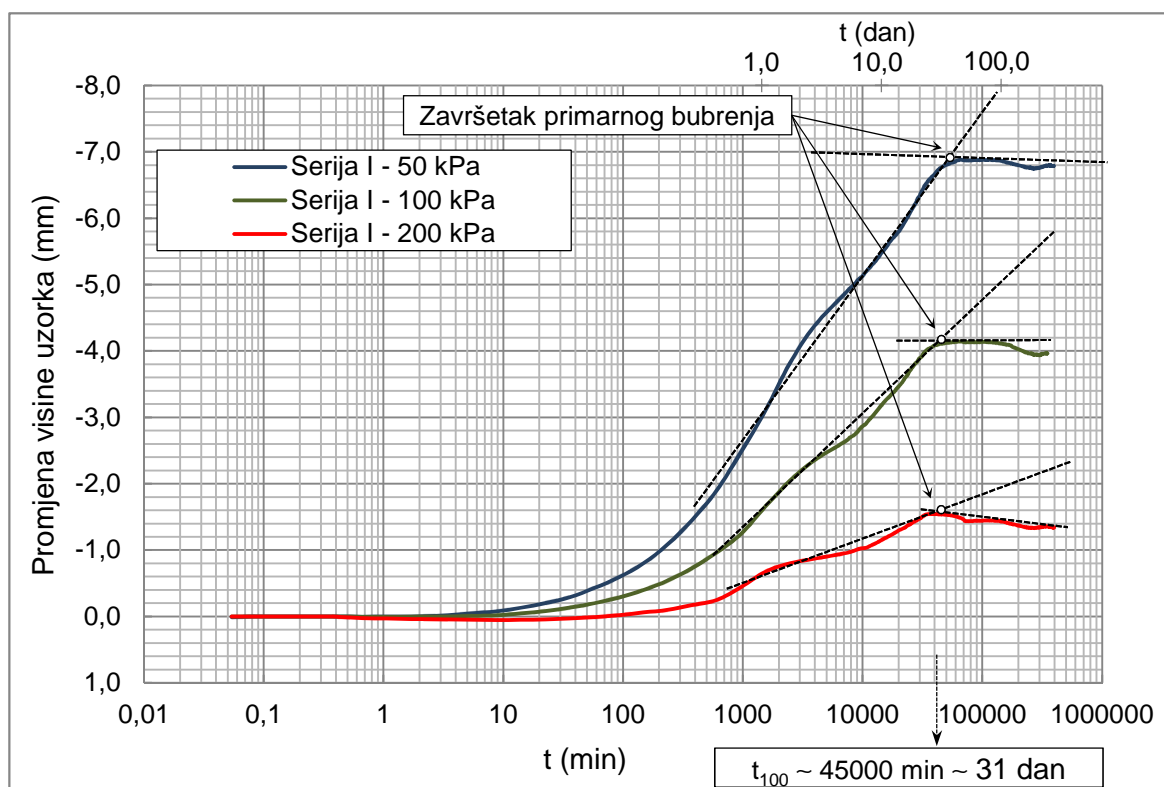
Slika 5-2 Promjene visine uzorka u logaritamskom mjerilu vremena



Slika 5-3 Promjene visine uzorka u ovisnosti o  $\sqrt{t}$

Analizom podataka o bubrenju bentonitne gline vidljivo je da se, očekivano, najveće bubrenje i relativna vertikalna deformacija javljaju kod uzoraka opterećenih najmanjim normalnim naprezanjem. S porastom normalnih naprezanja intenzitet bubrenja opada. Na temelju krivulja bubrenja može se uočiti da relativna vertikalna deformacija (bubrenje) uzoraka nakon perioda od 276 dana iznosi 65,80% (6,787 mm) pri normalnom naprezanju 50 kPa, 38,54% (3,945 mm) pri normalnom naprezanju 100 kPa i 13,93% (1,339 mm) pri normalnom naprezanju 200 kPa. Prema tome, iznos vertikalne deformacije ovisi o veličini normalnog naprezanja.

Analizom vremena koje je potrebno da bi završilo primarno bubrenje, može se uočiti da su vremena završetka primarnog bubrenja ista pri svim normalnim naprezanjima (Slika 5-4). Dakle, u ovom konkretnom slučaju, vrijeme proteklo do završetka primarnog bubrenja iznosilo je približno 31 dan promatrajući sve tri serije.



Slika 5-4 Prikaz vremena potrebnog za završetak primarnog bubrenja

Na temelju razvoja vertikalne deformacije uzoraka nakon protoka vremena završetka primarnog bubrenja, može se uočiti da se u preostalom vremenskom periodu uzorak sekundarno sliježe. Promatrajući vertikalne deformacije u vremenskom periodu od 245 dana u kojem dolazi do sekundarnog slijeganja uzorka, može se uočiti sljedeće:

- Kod uzorka opterećenog normalnim naprežanjem intenziteta 50 kPa, u navedenom periodu dolazi do slijeganja uzorka od 0,092 mm što predstavlja vertikalnu deformaciju od 0,54%.
- Uzorak opterećen normalnim naprežanjem od 100 kPa u navedenom periodu se sliježe 0,196 mm što predstavlja vertikalnu deformaciju od 1,36%.
- Uzorak opterećen normalnim naprežanjem od 200 kPa u navedenom periodu se sliježe 0,203 mm što predstavlja vertikalnu deformaciju uzorka u dijelu sekundarne kompresije od 1,82%.

Dakle, kao i kod primarnog bubrenja, vertikalna deformacija u fazi sekundarne konsolidacije i njen vremenski razvoj također ovise o normalnim naprežanjima s tim da je u ovom slučaju, djelovanje suprotno, s porastom normalnih naprežanja raste i intenzitet sekundarne kompresije.

Uzorci su bili izloženi tijekom prilično dugog vremenskog razdoblja sekundarnoj konsolidaciji pa je na krivuljama razvoja vertikalnih deformacija u djelu sekundarne kompresije vidljiv utjecaj promjene temperature u laboratoriju. Naime, kombinacija vrlo malih vertikalnim deformacijama kod sekundarnog slijeganja te promjene temperature u laboratorijskom prostoru tijekom mjerenja dovela je do promjene brzine prirasta vertikalnih deformacija tijekom sekundarne kompresije. Male promjene temperature u laboratorijskom prostoru su očekivane te se pretpostavlja da one djeluju na mjerna osjetila koja su korištena prilikom ispitivanja.

Usporedbom krivulja uzoraka serija I i II pri istim normalnim naprežanjima može se uočiti njihovo dobro preklapanje pa se može reći da je vremenski razvoja vertikalne deformacije kod ove dvije serije usporediv.

Tablica 5-2 prikazuje početne karakteristike ugrađenih uzoraka u edometar. Prikazane su početne vrijednosti visina uzoraka iskazane prije nanošenja vertikalnog opterećenja, vlažnosti, suhe gustoće, koeficijenta pora te stupnja saturacije. Tablica 5-3 prikazuje promjenu visine uzoraka ostvarenu tijekom bubrenja, završnu visinu uzorka nakon bubrenja, izračunate vrijednosti koeficijent pora nakon bubrenja, završne vlažnosti uzoraka mjerene nakon završetka ispitivanja te izračunate vrijednosti završnog stupnja zasićenosti uzoraka. Valja napomenuti da, kod uzoraka serije II, iskazana završna vlažnost predstavlja vlažnost uzorka dobivenu nakon završetka ispitivanja odnosno nakon provedenih ciklusa opterećenja i rasterećenja.

Tablica 5-2 Početne karakteristike uzoraka

Uzorak	Normalno naprezanje (kPa)	Visina (mm)	Vlažnost (%)	Suha gustoća (Mg/m <sup>3</sup> )	Koef. pora	Stupanj zasićenosti (%)
Seriya I	50	10,315	11,61	0,994	1,724	18,22
Seriya I	100	10,235	11,61	0,996	1,718	18,29
Seriya I	200	9,615	11,61	1,060	1,553	20,23
Seriya II	50	9,760	12,94	1,038	1,609	21,78
Seriya II	100	9,865	12,94	1,021	1,651	21,23
Seriya II	200	9,730	12,94	1,035	1,614	21,43

Tablica 5-3 Rezultati pokusa bubrenja

Uzorak	Normalno naprezanje (kPa)	Promjena visine (mm)	Završna visina (mm)	Završni koeficijent pora	Završna vlažnost (%)	Završni stupanj zasićenosti (%)
Seriya I	50	-6,787	17,102	3,419	125,81	99,6
Seriya I	100	-3,945	14,180	2,560	93,93	99,5
Seriya I	200	-1,339	10,954	1,776	65,64	100,0
Seriya II	50	-5,388	15,148	3,049	100,09*	88,9
Seriya II	100	-2,867	12,732	2,421	76,45*	85,5
Seriya II	200	-1,232	10,962	1,946	54,59*	75,9

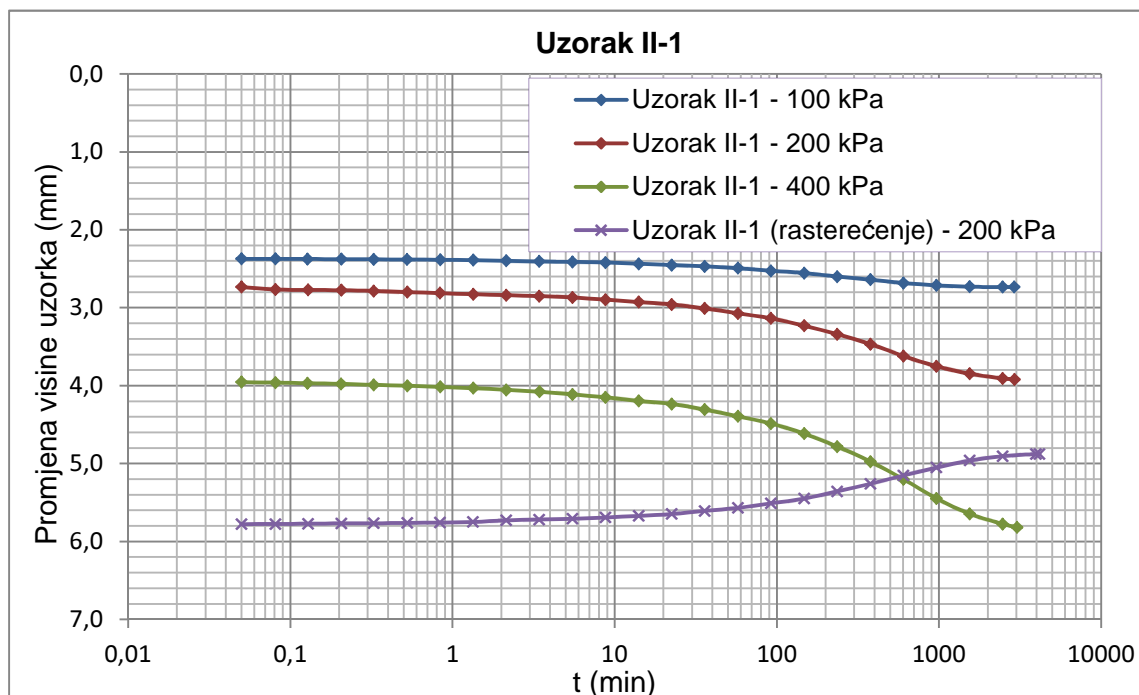
\* vrijednosti dobivene nakon ciklusa opterećenja i rasterećenja

### 5.3 Ispitivanja 1-D konsolidacije

Kako je prethodno navedeno, na uzorcima serije II, nakon početne faze bujanja tijekom 7 dana, provedena su ispitivanja konsolidacijskih karakteristika bentonitne gline. Stoga su uzorci serije II dodatno su označeni oznakama uzorak II-1, uzorak II-2 i uzorak II-3. Uzorak II-1 je tijekom bubrenja bio opterećen normalnim naprezanjem 50 kPa, uzorak II-2 normalnim naprezanjem 100 kPa i uzorak III-3 normalnim naprezanjem 200 kPa. Uzorci su pri navedenim normalnim naprezanjima ostavljeni da bubre tijekom perioda od 7 dana. Nakon 7 dana bubrenja, na uzorcima su provedeni pokusi 1-D konsolidacije primjenom ciklusa opterećenja i rasterećenja. Ispitivanja su provedena sukladno normi ASTM D 2435. Duljina pojedinih ciklusa opterećenja i rasterećenja iznosila je 48 sati. Pri tome su, ciklusi opterećenja kod 1-D konsolidacije bili slijedeći:

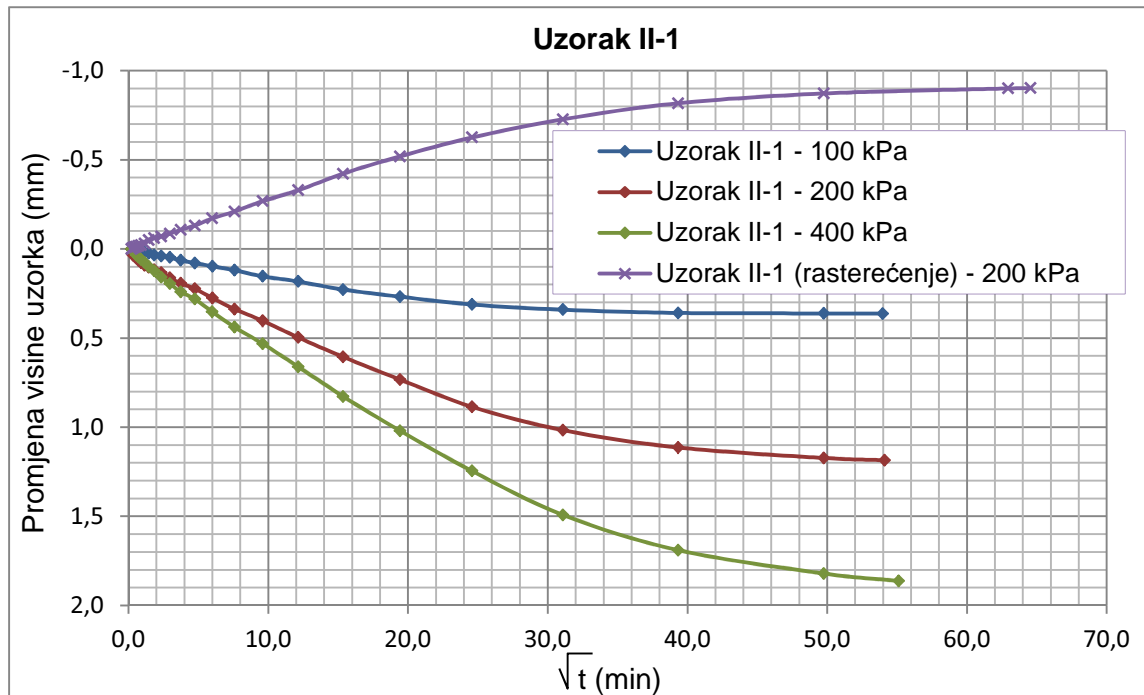
- Uzorak II-1: 50-100-200-400-200 kPa,
- Uzorak II-2: 100-200-400-800-200 kPa,
- Uzorak II-3: 200-400-800-400-200 kPa.

Rezultati ispitivanja konsolidacijskih karakteristika bentonitne gline prikazani su na dijagramima ovisnosti promjene visine uzorka u logaritamskom mjerilu vremena za uzorke II-1 (Slika 5-5), II-2 (Slika 5-7) i II-3 kPa (Slika 5-9) te dijagramima ovisnosti promjene visine uzorka u  $\sqrt{t}$  za uzorke II-1 (Slika 5-6), II-2 (Slika 5-8) i II-3 (Slika 5-10).

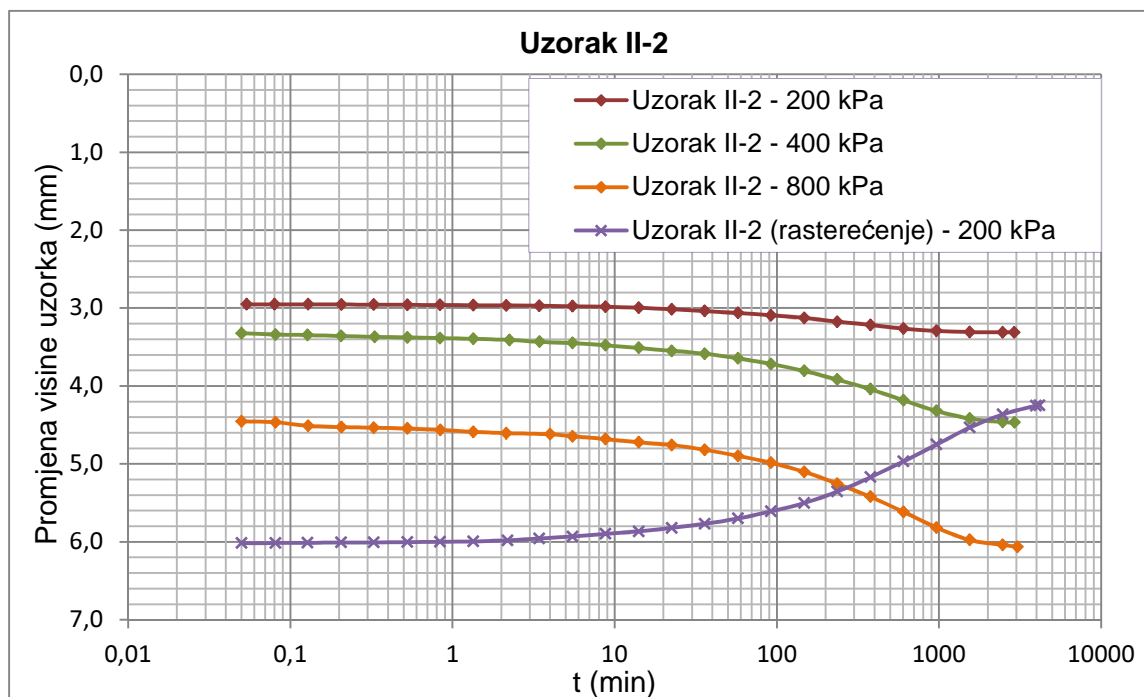


Slika 5-5 Promjena visine uzorka II-1 u vremenu

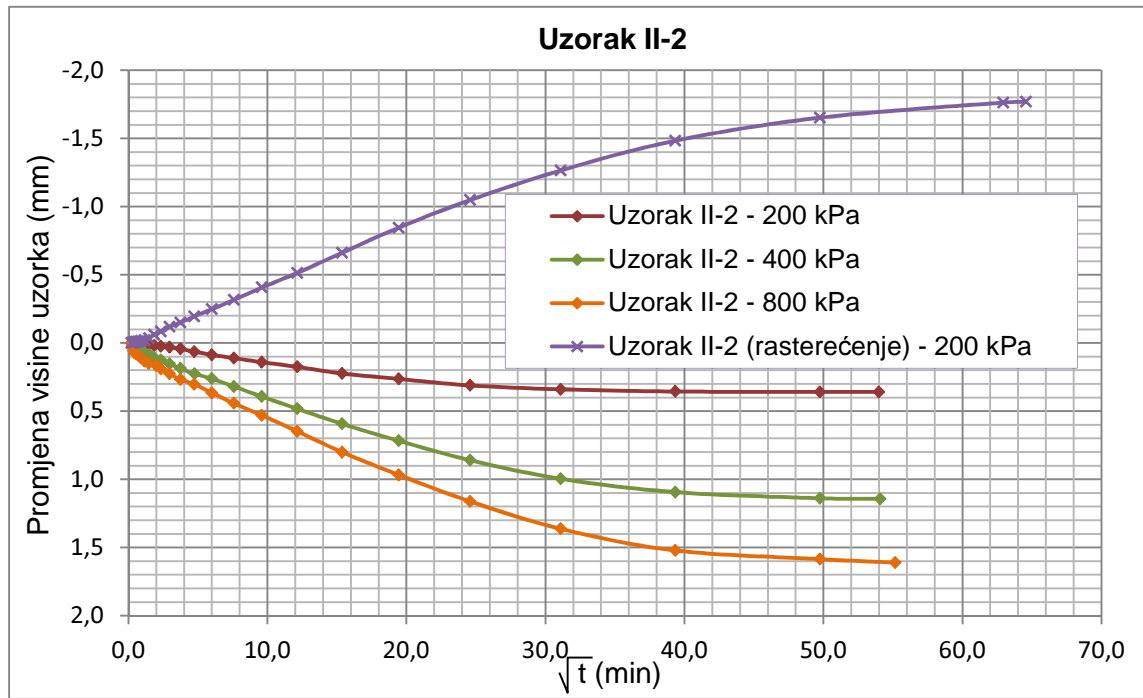




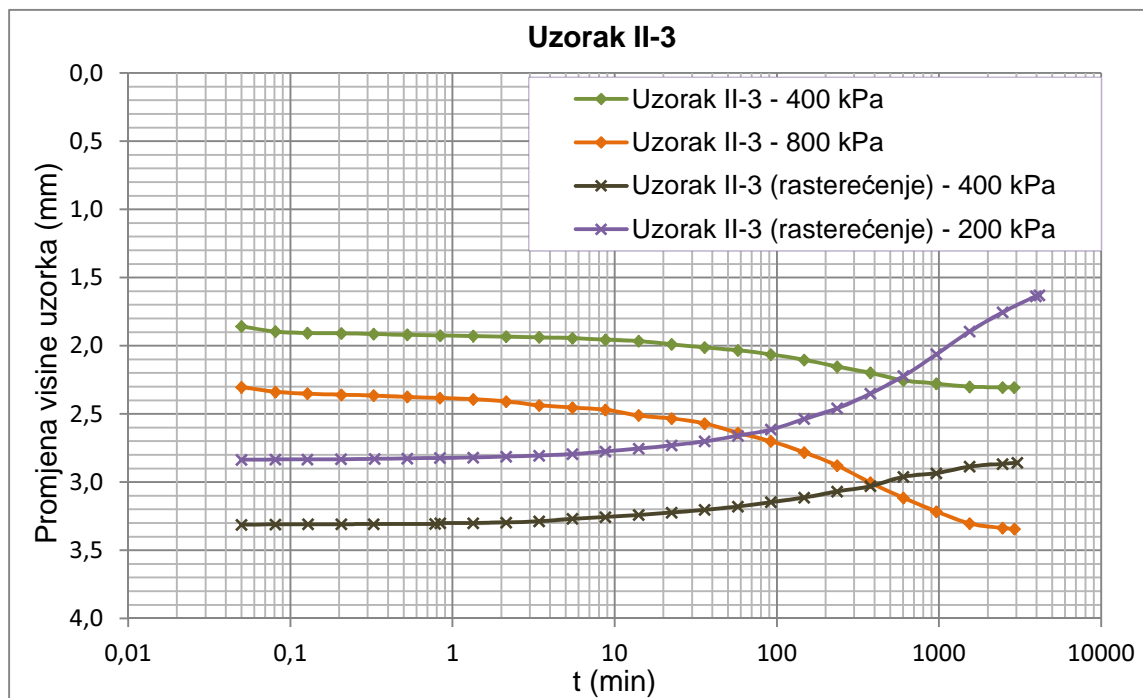
Slika 5-6 Promjena visine uzorka II-1 u odnosu na  $\sqrt{t}$



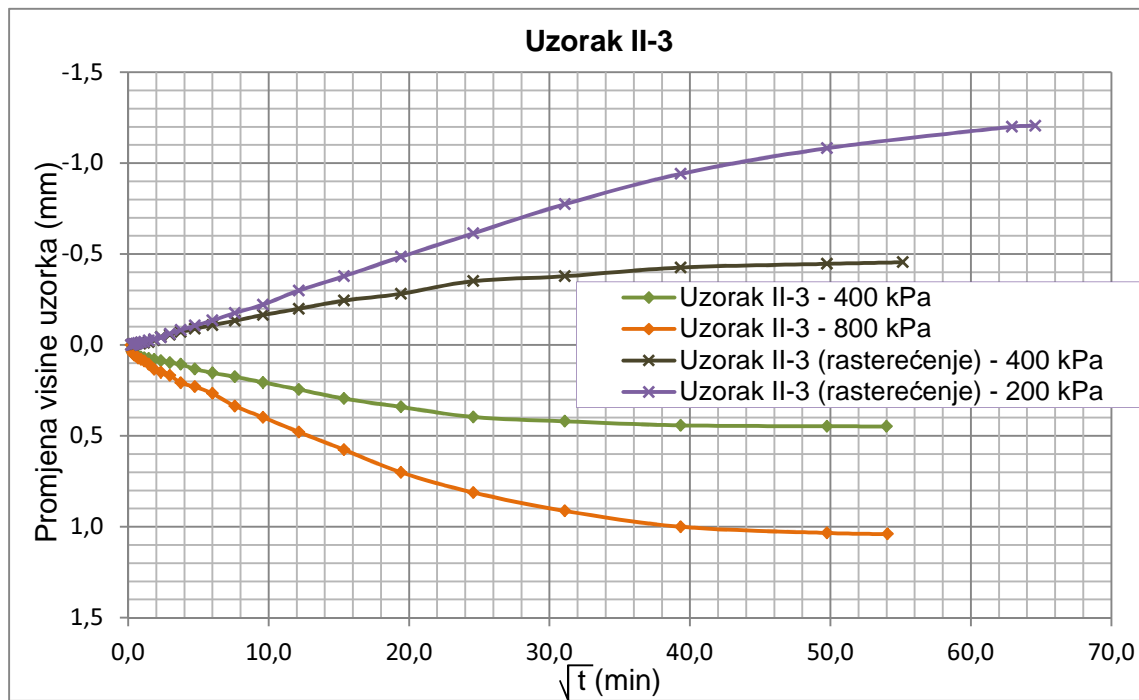
Slika 5-7 Promjena visine uzorka II-2 u vremenu



Slika 5-8 Promjena visine uzorka II-2 u odnosu na  $\sqrt{t}$



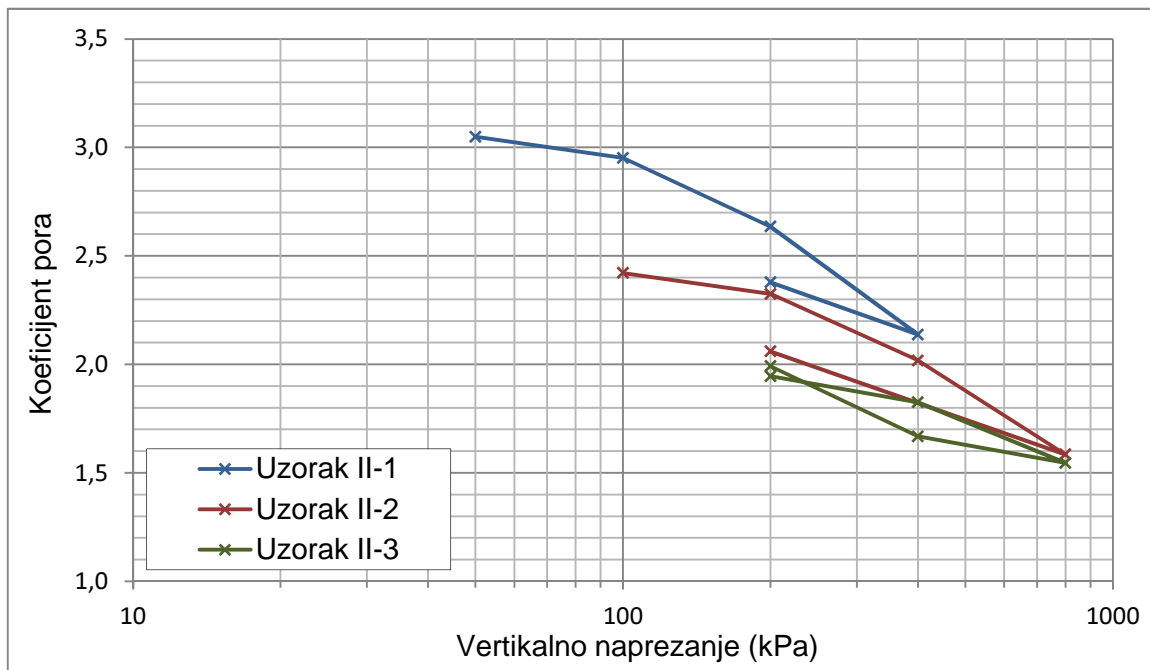
Slika 5-9 Promjena visine uzorka II-3 u vremenu

Slika 5-10 Promjena visine uzorka II-3 u odnosu na  $\sqrt{t}$ 

Slika 5-11 prikazuje ovisnosti koeficijenta pora o efektivnim normalnim naprezanjima. Uočava se da koeficijent pora ovisi o intenzitetu opterećenja u pojedinom ciklusu (normalnim naprezanjima) ali također i o postupku hidratacije. Tako primjerice uzorak II-1 opterećen efektivnim normalnim naprezanjem od 200 kPa u fazi kompresije ima koeficijent pora 2,635, uzorak II-2 2,325 i uzorak II-3 1,946. Također se može uočiti da ova razlika u koeficijentu pora opada s porastom efektivnih normalnih napreznja te se na temelju uočenog trenda može pretpostaviti da bi razlika u koeficijentu pora uzoraka pri efektivnom normalnom napreznju od 1600 kPa bila neznatna. Odnosno, za ove uvjete hidratacije, na koeficijent pora ne bi utjecao sam proces hidratacije pri efektivnim normalnim napreznjima većim od 1600 kPa.

Dijelovi krivulja koji prikazuju rasterećenje imaju podjednak nagib za sva tri uzorka. Indeks bubrenja  $c_s$  uzorka II-1 iznosi 0,625, uzorka II-2 0,854 i uzorka II-3 0,664. Promatranjem krivulje rasterećenja uzorka II-3 može se uočiti da je prilikom rasterećenja uzorka na isto početno efektivno normalno napreznje (200 kPa) dobiven veći završni koeficijent pora (1,946) od početnog (1,992). Pretpostavlja se da uzrok navedene pojave leži u dvije činjenice. Prva činjenica je da je bentonitna glina bubriv medij. Druga činjenica leži u postupku hidratacije. Naime, konsolidacijske karakteristike bentonitne gline ispitivane su nakon faze hidratacije koja je trajala 7 dana. Serijom I ispitivanja u edometru potvrđeno je da primarno bubrenje završava nakon 31 dana neovisno o normalnom napreznju. Dakle, pretpostavlja se da je uzorak kroz dva ciklusa rasterećenja što vremenski predstavlja 96 sati

ponovno počeo bubriti. Ovu pretpostavku potvrđuje i stupanj zasićenosti koji je iznosio 75,9%.



Slika 5-11 Ovisnost koeficijenta pora o normalnim efektivnim napreznjima

Na temelju pokusa 1-D konsolidacije određene su vrijednosti koeficijenta konsolidacije  $c_v$  za različite cikluse opterećenja i rasterećenja te na temelju dobivenog koeficijenta konsolidacije izračunat koeficijent hidrauličke provodljivosti  $k_{oed}$ .

Koeficijent hidrauličke provodljivosti  $k_{oed}$  izračunat na temelju koeficijenta konsolidacije određen je prema izrazu:

$$k_{oed} = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{E_{oed}} \quad (5-1)$$

gdje su:

$\gamma_w$  – zapreminska težina vode, ( $\text{kN/m}^3$ )

$E_{oed}$  – edometarski modul, ( $\text{kN/m}^2$ ).

Koeficijent konsolidacije određen je dvjema metodama: Casagrandeovom metodom iz log t dijagrama (Slika 5-5, Slika 5-7 i Slika 5-9) prema izrazu (4-1) i Taylorovom metodom iz  $\sqrt{t}$  dijagrama (Slika 5-6, Slika 5-8 i Slika 5-10) prema izrazu (4-2).

Tablice 5-4, 5-5 i 5-6 prikazuju, za pojedine uzorke, proračunom dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti te vrijednosti edometaskog modula za pojedine cikluse opterećenja. Za raspon efektivnih normalnih naprezanja od 100-800 kPa dobivene su vrijednosti  $1,27 \cdot 10^{-9}$ -  $3,70 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeu te  $1,77 \cdot 10^{-9}$ - $4,89 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s prema Taylor-u. Iz podataka se može vidjeti da su koeficijenti konsolidacije dobiveni Casagrandeovom metodom u pravilu nešto manjih vrijednosti u odnosu na vrijednosti dobivene Taylorovom metodom. Smatra se da je razlog navedenoj pojavi leži u činjenici da Casagrandeova metoda za proračun koristi središnji dio konsolidacijske krivulje dok Taylorova metoda za proračun koristi početni dio konsolidacijske krivulje.

Tablica 5-4 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti za uzorak II-1

Inkrement opterećenja (kPa)	$E_{oed}$ (MPa)	Casagrande			Taylor		
		$e_{50}$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$k_{oed}$ (m/s)	$e_{90}$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$k_{oed}$ (m/s)
100	2,09	3,001	$1,27 \cdot 10^{-9}$	$5,96 \cdot 10^{-12}$	2,974	$1,77 \cdot 10^{-9}$	$8,33 \cdot 10^{-12}$
200	1,25	2,791	$6,88 \cdot 10^{-10}$	$5,41 \cdot 10^{-12}$	2,695	$8,61 \cdot 10^{-10}$	$6,77 \cdot 10^{-12}$
400	1,46	2,386	$4,39 \cdot 10^{-10}$	$2,95 \cdot 10^{-12}$	2,245	$5,79 \cdot 10^{-10}$	$3,89 \cdot 10^{-12}$
200	2,60	-	-	-	-	-	-

Tablica 5-5 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti za uzorak II-2

Inkrement opterećenja (kPa)	$E_{oed}$ (MPa)	Casagrande			Taylor		
		$e_{50}$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$k_{oed}$ (m/s)	$e_{90}$	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$k_{oed}$ (m/s)
200	3,55	2,375	$9,25 \cdot 10^{-10}$	$2,56 \cdot 10^{-12}$	2,343	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$3,13 \cdot 10^{-12}$
400	2,17	2,169	$5,19 \cdot 10^{-10}$	$2,35 \cdot 10^{-12}$	2,080	$6,37 \cdot 10^{-10}$	$2,89 \cdot 10^{-12}$
800	2,79	1,795	$3,70 \cdot 10^{-10}$	$1,30 \cdot 10^{-12}$	1,695	$5,26 \cdot 10^{-10}$	$1,85 \cdot 10^{-12}$
200	3,26	-	-	-	-	-	-

Dobivene vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti kreću se od  $5,96 \cdot 10^{-12}$ - $9,87 \cdot 10^{-13}$  m/s u slučaju kada je za proračun korišten koeficijent hidrauličke provodljivosti dobiven prema Casagrandeu te  $8,33 \cdot 10^{-12}$ - $1,19 \cdot 10^{-12}$  m/s prema Tayloru. Trend je sličan kao i

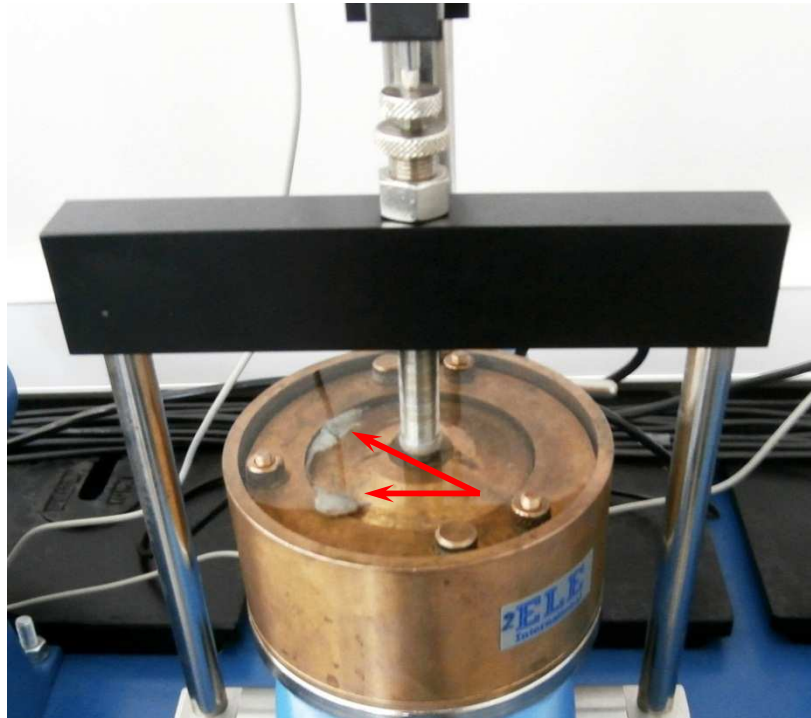
kod koeficijenta konsolidacije tj., prema Casagrandeu su dobiveni nešto manji koeficijenti hidrauličke provodljivosti.

Iskazane vrijednosti obje promatrane veličine ulaze u dostupne raspone literaturnih podataka za prirodne natrijske Wyoming bentonitne gline opterećene navedenim rasponima efektivnih naprežanja.

Tablica 5-6 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti za uzorak II-3

Inkrement opterećenja (kPa)	$E_{oed}$ (MPa)	Casagrande			Taylor		
		$e_{50}$	$c_v$ ( $m^2/s$ )	$k_{oed}$ (m/s)	$e_{90}$	$c_v$ ( $m^2/s$ )	$k_{oed}$ (m/s)
400	4,89	1,881	$6,51 \cdot 10^{-10}$	$1,30 \cdot 10^{-12}$	1,843	$7,48 \cdot 10^{-10}$	$1,50 \cdot 10^{-12}$
800	4,04	1,676	$4,07 \cdot 10^{-10}$	$9,87 \cdot 10^{-13}$	1,599	$4,89 \cdot 10^{-10}$	$1,19 \cdot 10^{-12}$
400	8,33	-	-	-	-	-	-
200	1,65	-	-	-	-	-	-

Tijekom pokusa 1-D konsolidacije pojavili su se problemi u vidu istiskivanja male količine hidratiziranog uzorka iz ćelije prilikom nanošenja opterećenja (Slika 5-12). Problem se pojavio kod sva tri uzorka. Međutim, prilikom vađenja uzorka iz ćelije, procijenjeno je da je istisnuto do 2% ukupne mase hidratiziranog uzorka te da navedeno nema utjecaj na rezultate ispitivanja. Ispitivanja nisu ponavljana jer se pretpostavilo da bi se vrlo vjerojatno navedena pojava ponovila. Slika 5-13 prikazuje uzorak nakon ispitivanja.

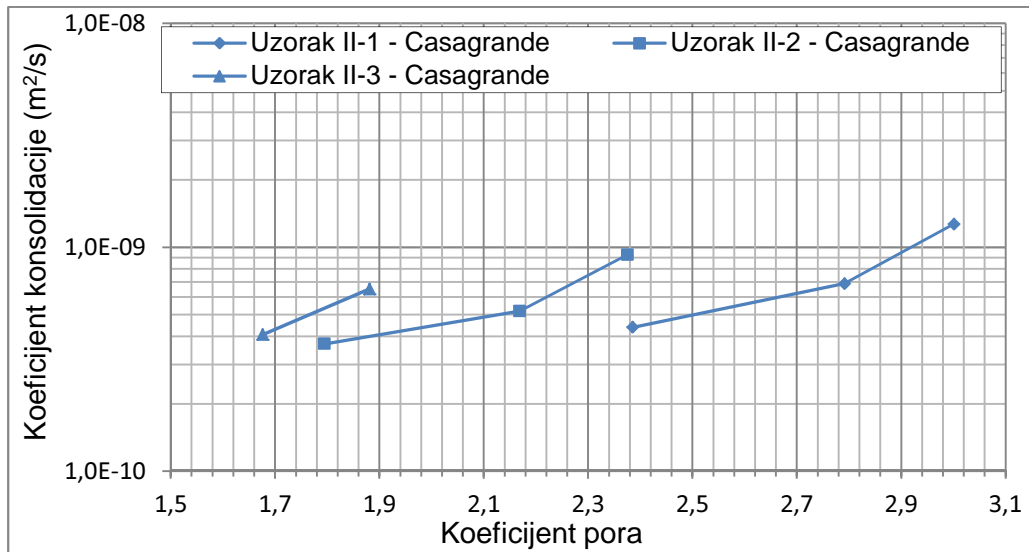


Slika 5-12 Istiskivanje uzorka iz edometarske ćelije

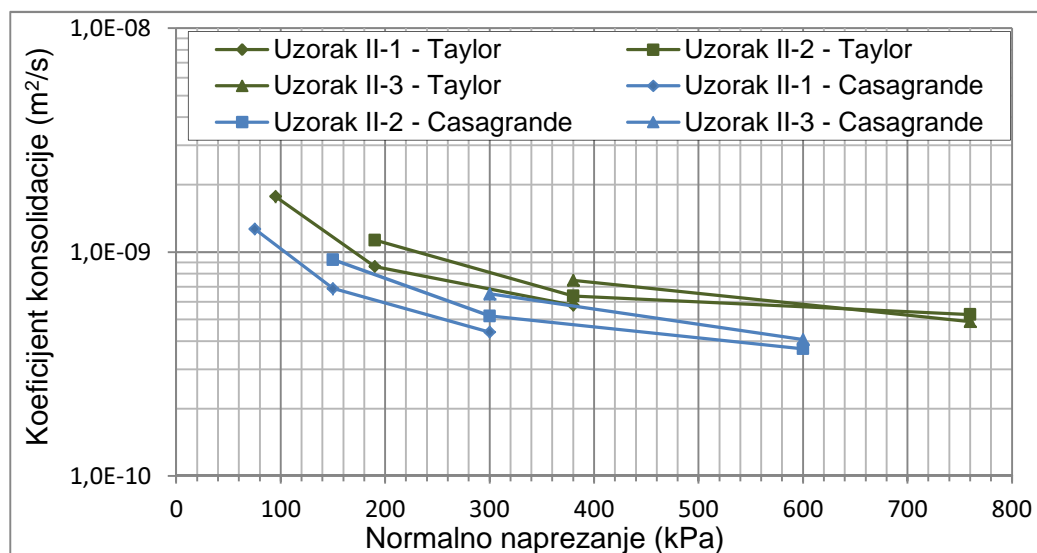


Slika 5-13 Uzorak nakon ispitivanja

Iz odnosa dobivenih koeficijenata konsolidacije i koeficijenta pora može se uočiti opći trend rasta koeficijenta konsolidacije s porastom koeficijenta pora. Detaljnijim promatranjem koeficijenata konsolidacije dobivene Casagrandeovom metodom može se uočiti da osim trenda smanjena koeficijenta konsolidacije sa smanjenjem koeficijenta pora na dobiveni koeficijent konsolidacije također utječu i uvjeti hidratacije (Slika 5-14). Navedeno se može uočiti i iz odnosa koeficijenta konsolidacije i efektivnih normalnih napreznja (Slika 5-15).



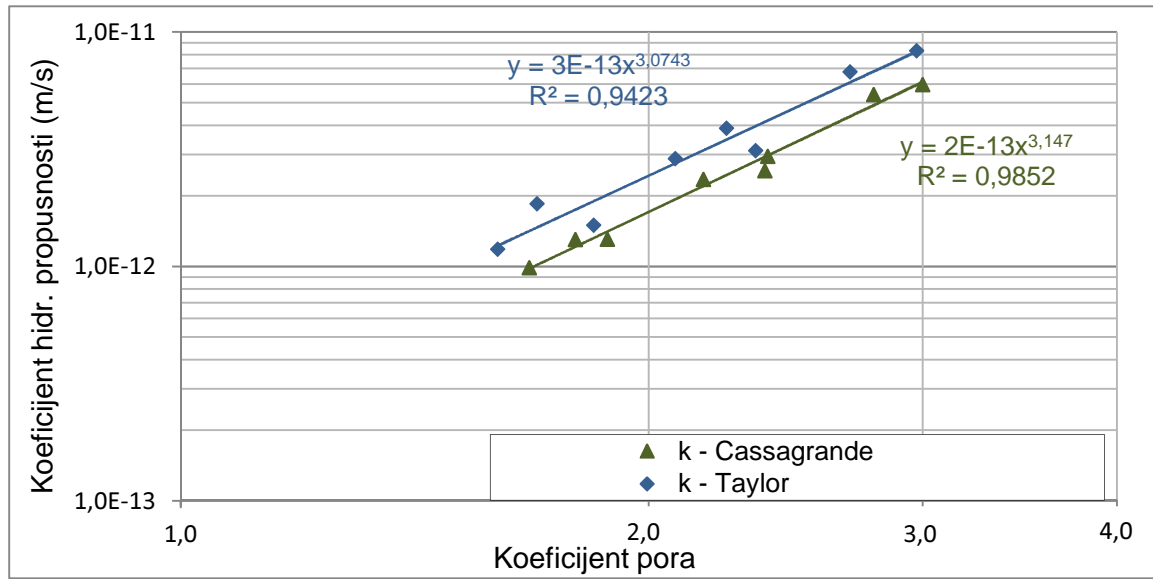
Slika 5-14 Ovisnost koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeu o koeficijentu pora



Slika 5-15 Ovisnost koeficijenta konsolidacije o efektivnim normalnim naprezanjima

Ako se promatra odnos koeficijenta hidrauličke provodljivosti o koeficijentu pora (Slika 5-16) vidljiv je linearan odnos logaritama vrijednosti ove dvije veličine s visokim stupnjem točnosti korelacije. Također, koeficijenti hidrauličke provodljivosti dobiveni prema Casagrandeu osiguravaju točniju korelaciju.





Slika 5-16 Ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti o koeficijentu pora

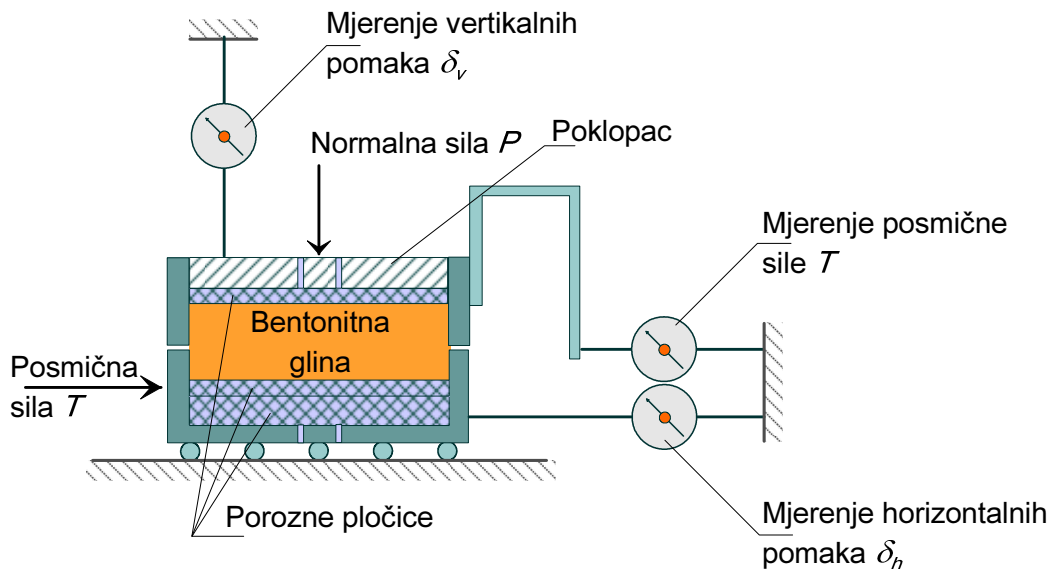
## **6 MJERENJE POSMIČNE ČVRSTOĆE BENTONITNE GLINE**

Glinene geosintetičke barijere su kompozitni materijali, čija unutarnja posmična čvrstoća ovisi o čvrstoći komponenata: posmičnoj čvrstoći bentonitne gline i vlačnoj čvrstoći sintetičkih niti. Tehnike ispitivanja posmične čvrstoće tala danas su dobro poznate te se provode u različitim standardiziranim uređajima (izravni, kružni, jednoosni i troosni posmik). Obzirom na specifični oblik glinenih geosintetičkih barijera koji je posljedica kompozitnog sastava, njihova posmična čvrstoća najčešće se ispituje u prilagođenim uređajima za izravni posmik.

Ovim istraživanjem se želi kvantificirati djelovanje bentonitne gline unutar glinene geosintetičke barijere te je stoga za razjašnjenje problematike vezane uz ispitivanje posmične čvrstoće glinenih geosintetičkih barijera, posmična čvrstoća bentonitne gline istraživana u uređaju za izravni posmik. Pregledom literature u poglavlju 2.3 ustanovljeno je da pri ispitivanju posmične čvrstoće nearmiranih te posebno armiranih glinenih geosintetičkih barijera potrebno posebno voditi pažnju o veličini uzorka. Obzirom da su u ovom istraživanju ispitivanja provedena na uzorku bentonitne gline u obliku granula, bez uključivanja geosintetičke komponente, smatra se da veličina uzorka nije kritično pitanje te je za istraživanja korišten standardni uređaj za izravni posmik.

## 6.1 Program ispitivanja

Za provođenje pokusa izravnog smicanja uzoraka bentonitne gline korišten je standardni uređaj s kutijom za smicanje dimenzija 60×60×20 mm. Slika 6-1 shematski prikazuje poprečni presjek kutije za smicanje.



Slika 6-1 Poprečni presjek uređaja za smicanje

Sva ispitivanja posmične čvrstoće provedena su u istom uređaju. Pri tome je sustav omogućavao automatsko praćenje vertikalnih pomaka  $\delta_v$  u fazi hidratacije te automatsko praćenje vertikalnih i horizontalnih pomaka  $\delta_h$  kao i posmične sile  $T$  u fazi posmika. Normalna odnosno vertikalna sila  $P$  nanošena je upotrebom utega.

Postupak ugradnje sastojao se od dodavanja bentonitne gline u kutiju za smicanje. Bentonitna glina nije posebno pripremana, već su dodane granule vlažnosti oko 12% (tzv. *as received* stanje) (Slika 6-2). Pri ugradnji uvijek je usipana ista masa granula bentonitne gline (33,61 g) pri čemu bentonitna glina nije zbijana već je samo lagano poravnata. Navedenim postupkom ugradnje osigurane su približno iste početne debljine, suhe mase i suhe gustoće ugrađenih uzoraka odnosno ugrađivani su uzorci debljine približno 8 mm. Smatrano je da će navedeni postupak ugradnje dosta vjerno simulirati uvjete ugradnje bentonitne gline u glinenim geosintetičkim barijerama. Nakon ugradnje, uzorci su opterećeni odgovarajućim normalnim naprezanjem, nakon čega je dodana ispitna tekućina čime je započela faza hidratacije uzoraka. Nakon predviđene hidratacije (periodi od 7, 14 i 21 dan), uzorci su posmaknuti u fazi posmika. U obje faze normalna naprezanja su ostala ista.

Kao ispitna tekućina je upotrijebljena demineralizirana voda. Naime, vodovodne vode mogu biti različitih tvrdoća. Kako je smektitna komponenta bentonitnih gline osjetljiva na

kemijsko djelovanje, s ciljem sprečavanja promjene mineraloškog-kemijskog sastava bentonitne gline tijekom ispitivanja upotrijebljena je demineralizirana voda.



Slika 6-2 Reprezentativni uzorak bentonitne gline u formi granula

Pregledom literature o ispitivanjima posmične čvrstoće utvrđeno je da će na ponašanje bentonitne gline ključan utjecaj imati pojava bubrenja odnosno vlažnost uzorka. Kako bi se odredio utjecaj bubrenja bentonitne gline na njenu posmičnu čvrstoću napravljen je program ispitivanja, prikazana u tablici 6-1. Uzorci su ispitani u tri serije uz tri veličine normalnih napreznja (50, 100 i 200 kPa) i tri različite duljine hidratacije (7, 14 i 21 dan). Oznake odgovarajućih uzoraka koje će se koristiti dalje u tekstu dane su u navedenoj tablici. Brzina posmika iznosila je 1,0 mm/min. Ova je brzina odabrana iz razloga što se željelo da stupanj hidratacije ostane nepromijenjen tijekom faze posmika.

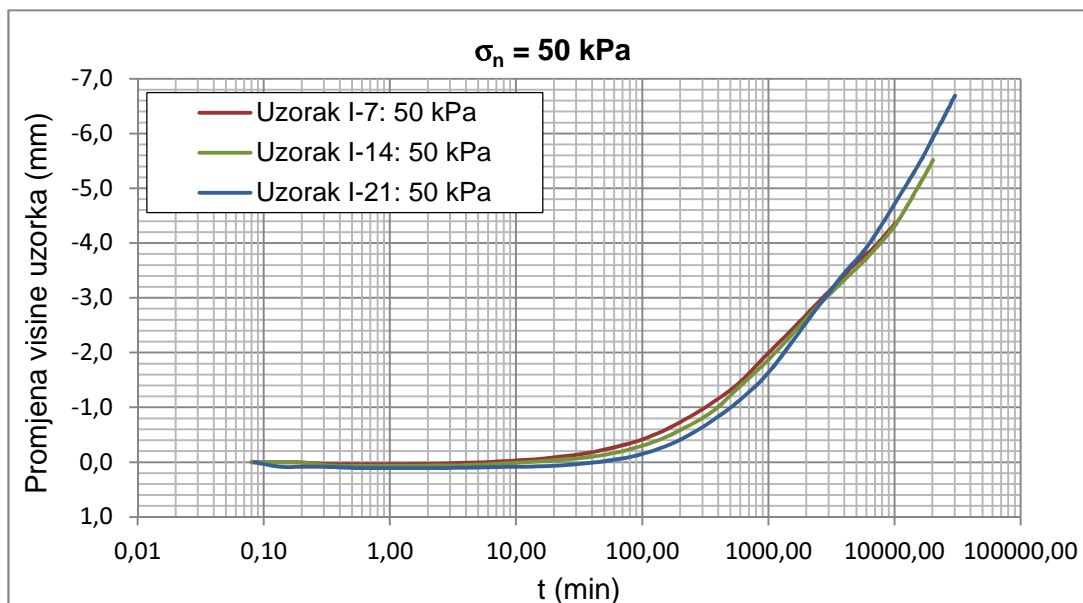
Kutija za smicanje standardno je predviđena za uzorke tla visine 20 mm. Zbog male debljine ugrađenih uzoraka bentonitne gline (oko 8 mm) u odnosu na predviđenu uzoraka u kutiji za smicanje, ugrađivane su dodatne porozne pločice čija je debljina ovisila o primijenjenoj vertikalnoj sili odnosno o očekivanom iznosu bubrenja bentonitne gline.

Tablica 6-1 Program ispitivanja u uređaju za izravni posmik

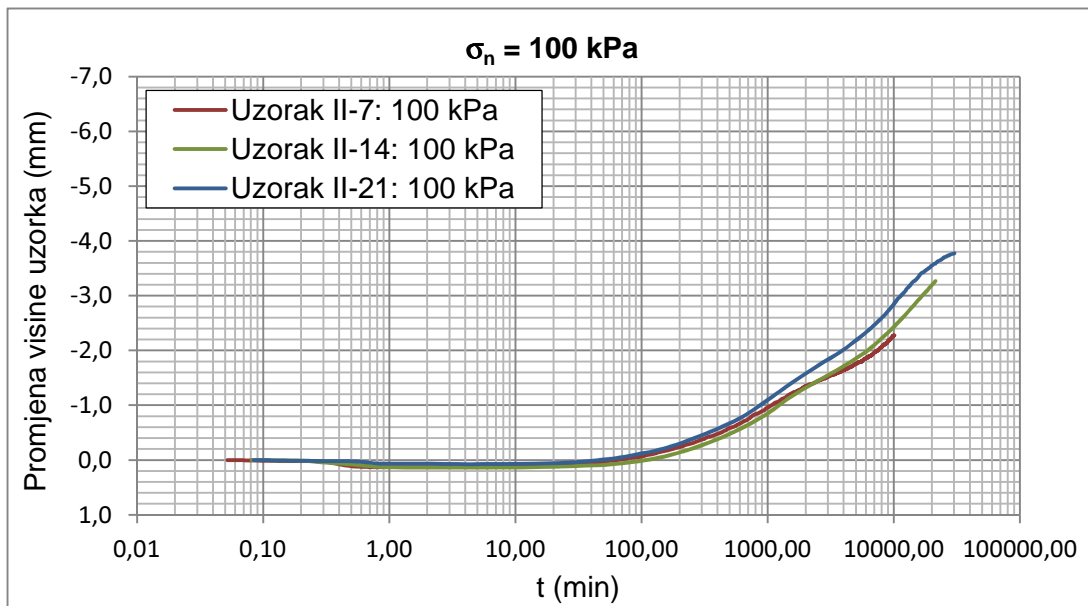
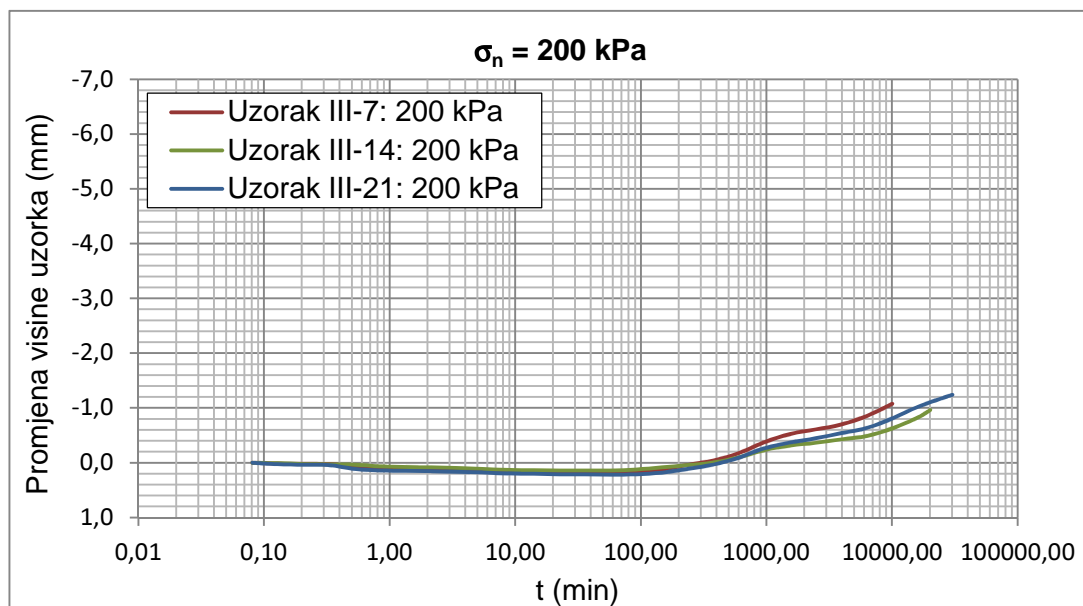
	Normalno napreznje (kPa)	Hidratacija 7 dana	Hidratacija 14 dana	Hidratacija 21 dan
Seriya I	50	I-7	I-14	I-21
Seriya II	100	II-7	II-14	II-21
Seriya III	200	III-7	III-14	III-21

## 6.2 Odnosi naprezanja i deformacija

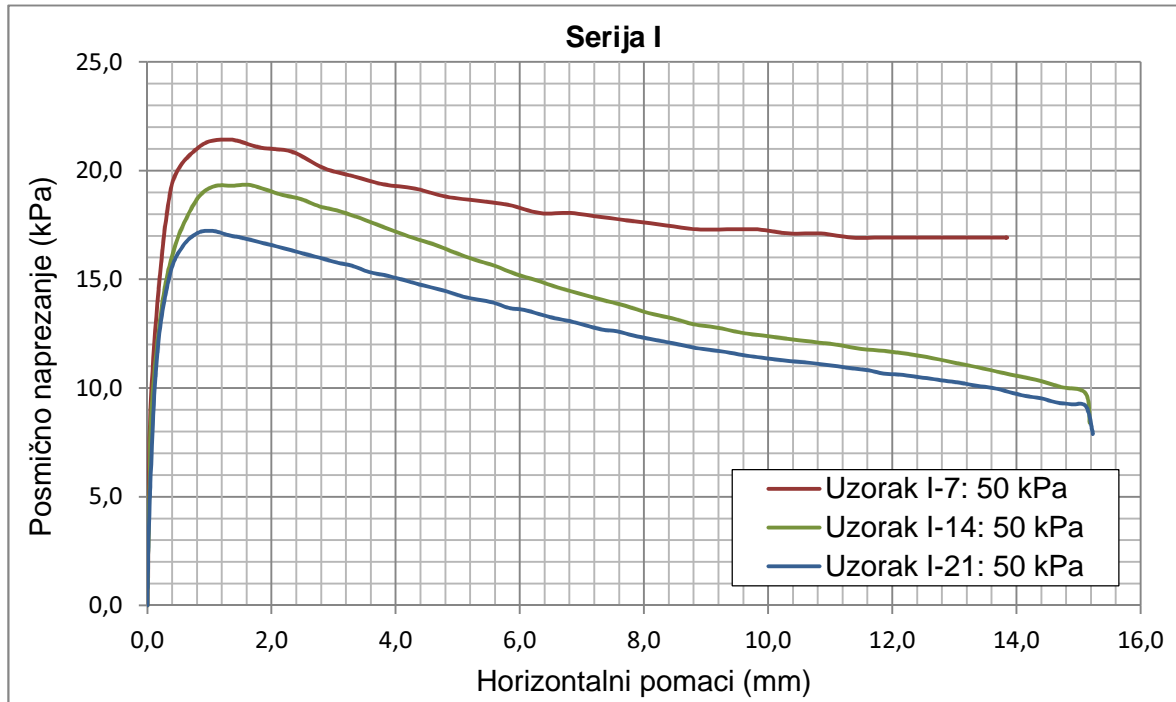
Rezultati faze hidratacije uzoraka prikazani su na dijagramima ovisnosti promjene visine uzoraka u logaritamskom mjerilu vremena pri normalnom napreznju od 50 kPa (Slika 6-3), 100 kPa (Slika 6-4) i 200 kPa (Slika 6-5). Analizom vertikalnih pomaka u fazi hidratacije može se zaključiti slijedeće. Pri normalnim napreznjima 50 kPa i 100 kPa, najviše su bubrili uzorci koji su ujedno imali najdulju fazu hidratacije (21 dan) dok su najmanje bubrenje pokazali uzorci s vremenski najkraćom fazom hidratacije (7 dana). Pri normalnim napreznjima od 200 kPa, neovisno o duljini hidratacije, bubrenje je bilo sličnog intenziteta, s tim da je najmanje bubrio uzorak oznake III-14, hidratiziran 14 dana. Pretpostavlja se da je uzrok smanjenog bubrenja uzorka III-14 njegova nešto veća početna vlažnost. Naime, u tablici 6-2 prikazane su početne karakteristike uzoraka ugrađivanih u izravni posmik. Raspon vrijednosti početnih vlažnosti kreće se od 11,13-11,62% osim u slučaju uzorka III-14, čija je početna vlažnost tijekom ugradnje iznosila 13,47%. Pri normalnim napreznjima od 200 kPa promjene visine uzoraka tijekom hidratacije su male, oko 1 mm, pa veća početna vlažnost može znatno utjecati na intenzitet bubrenja.



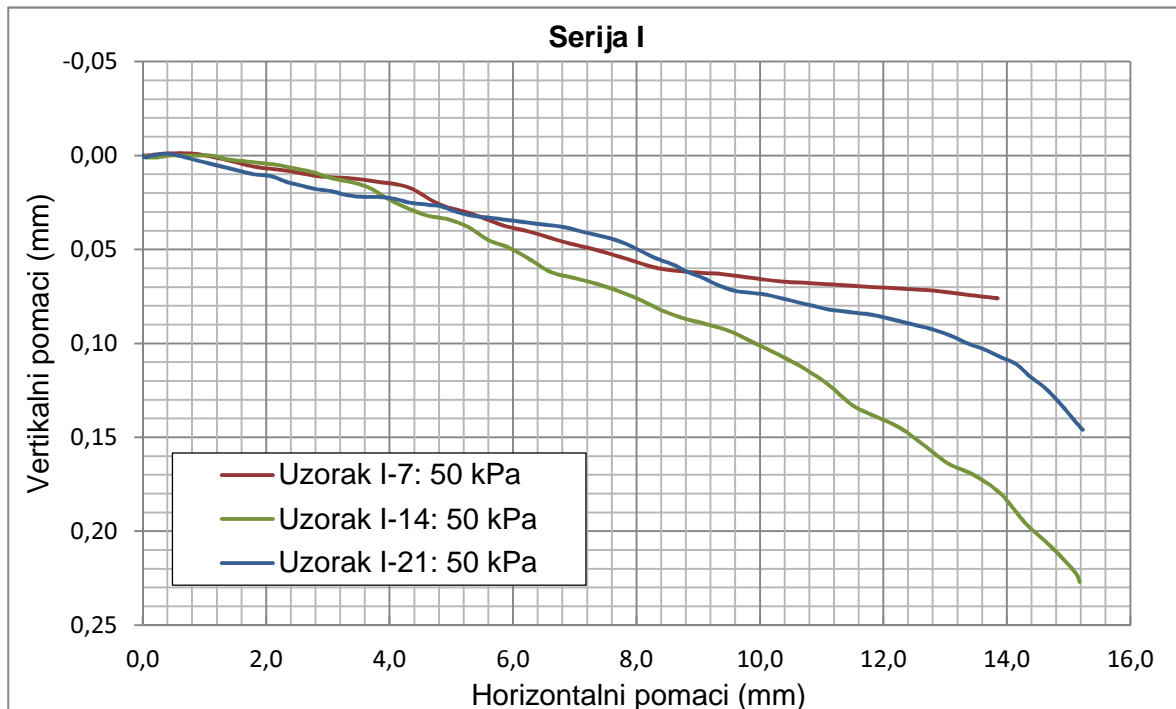
Slika 6-3 Promjene visine uzoraka tijekom hidratacije uz normalno napreznje  $\sigma_n = 50$  kPa

Slika 6-4 Promjene visine uzorka tijekom hidratacije uz normalno naprežanje  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ Slika 6-5 Promjene visine uzorka tijekom hidratacije uz normalno naprežanje  $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ 

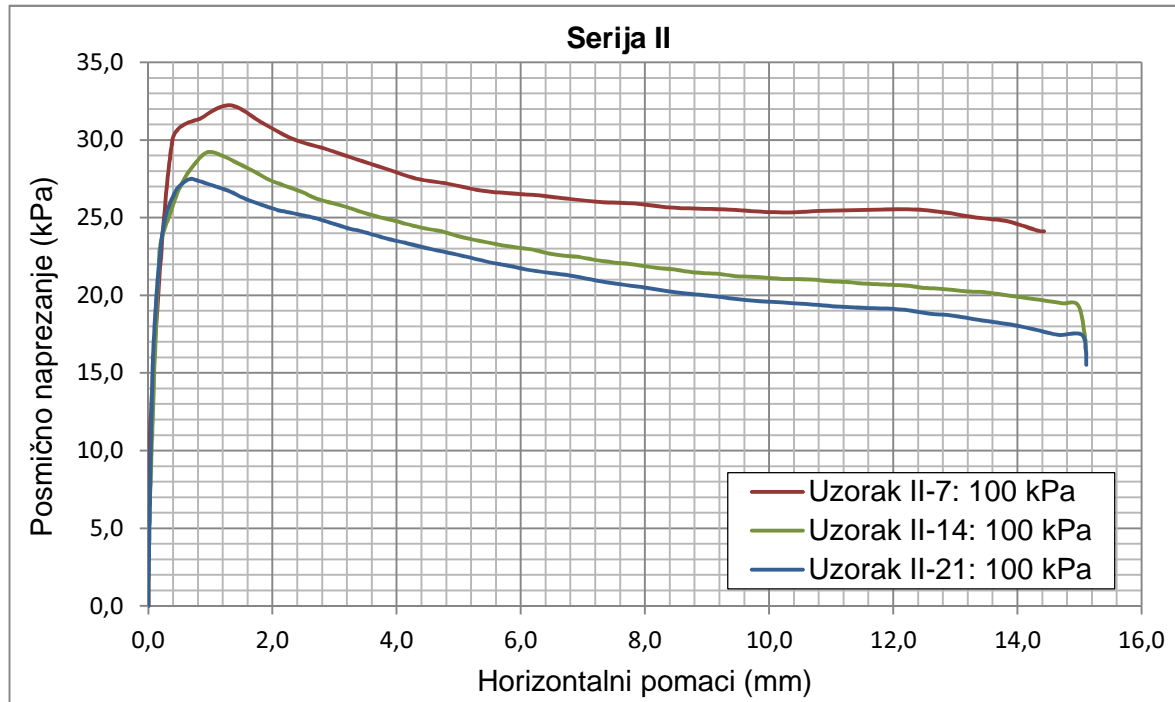
Rezultati ispitivanja dobiveni u fazi posmika prikazani su dijagramima ovisnosti posmičnih naprežanja i vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima. Slika 6-6 i slika 6-7 prikazuje rezultate serije I (normalno naprežanje 50 kPa), slika 6-8 i slika 6-9 rezultate serije II (normalno naprežanje 100 kPa) te slika 6-10 i slika 6-11 rezultate serije III (normalno naprežanje 200 kPa).



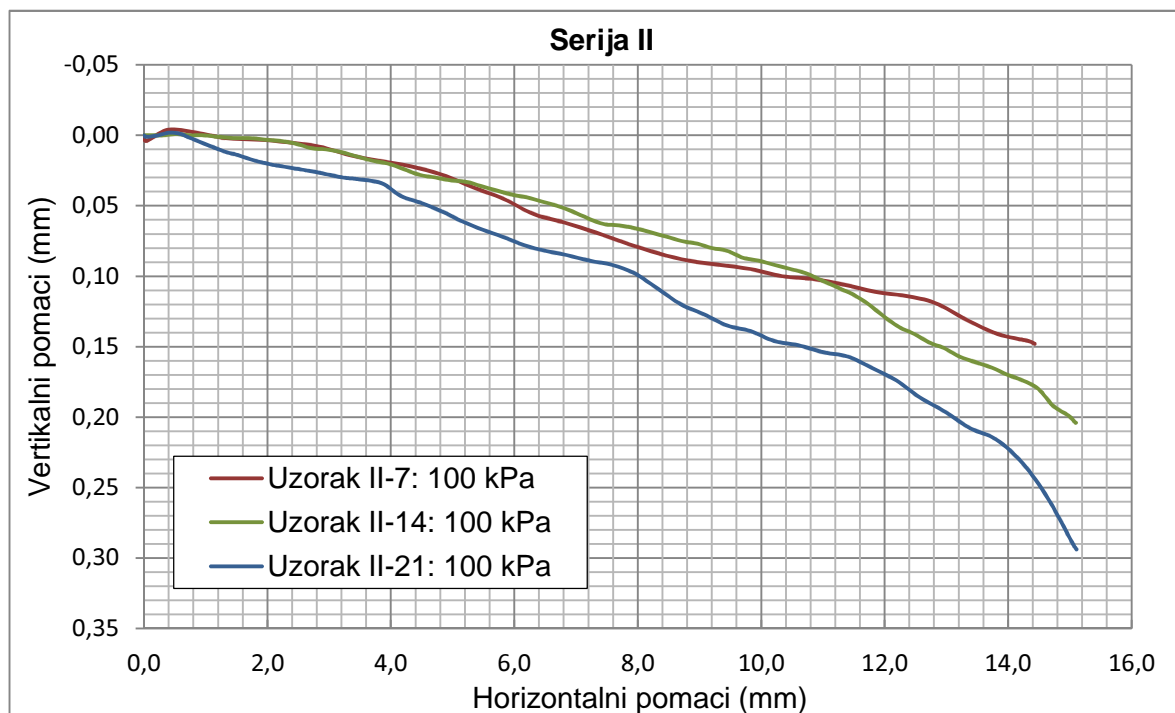
Slika 6-6 Ovisnost posmične čvrstoće o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprezanjem od 50 kPa



Slika 6-7 Ovisnost vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprezanjem od 50 kPa

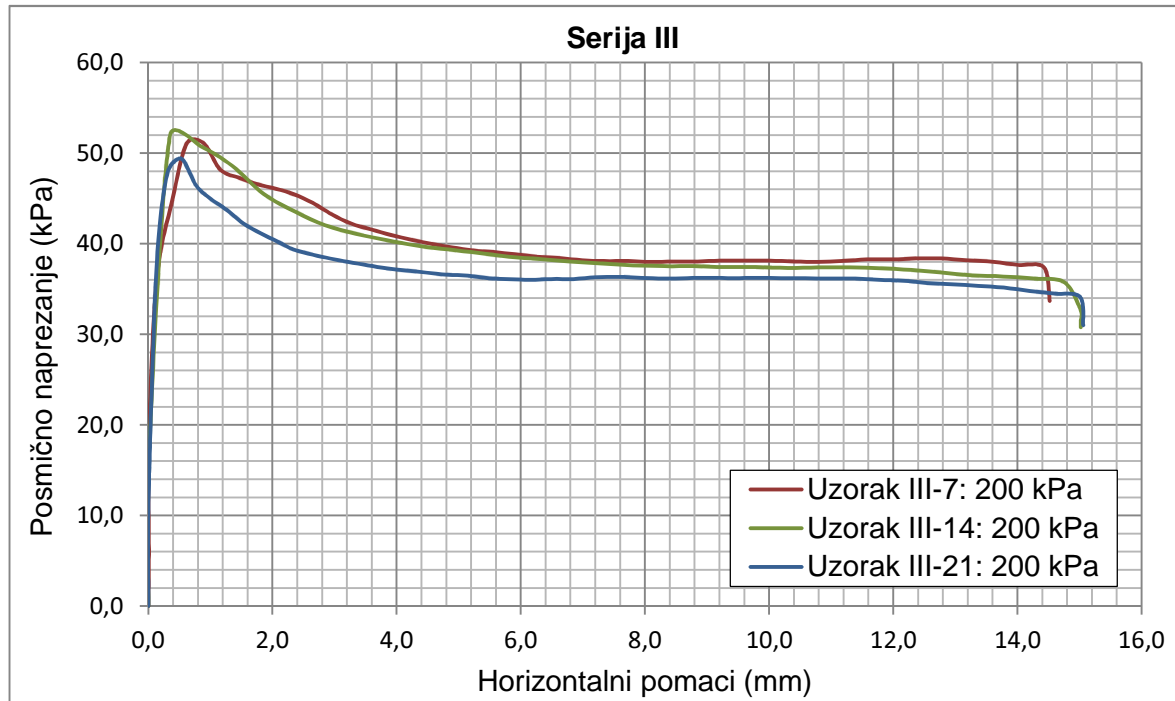


Slika 6-8 Ovisnost posmične čvrstoće o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 100 kPa

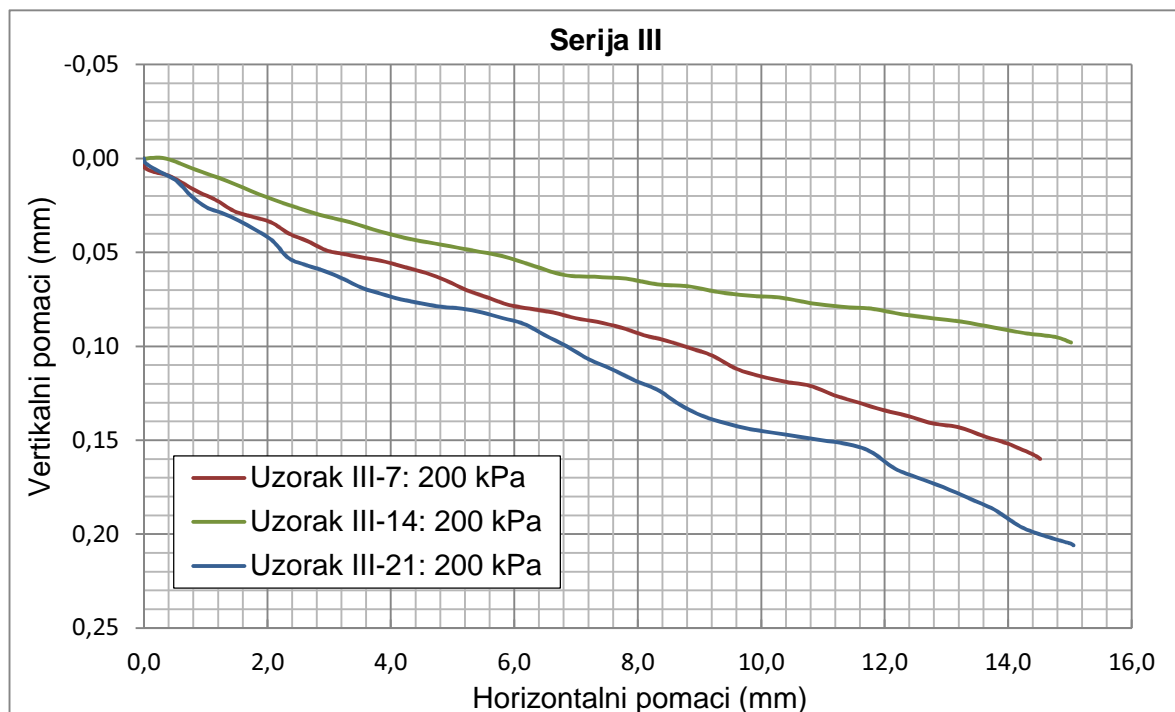


Slika 6-9 Ovisnost vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 100 kPa





Slika 6-10 Ovisnost posmične čvrstoće o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 200 kPa



Slika 6-11 Ovisnost vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 200 kPa

Analizom vertikalnih pomaka u fazi smicanja može se uočiti isti trend kod svih serija ispitivanja. Do slijeganja dolazi kod svih normalnih naprezanja i svih duljina hidratacija. Obzirom da se smicanje provodi brzinom od 1 mm/min, može se pretpostaviti da će slijeganje tijekom smicanja dovesti do rasta pornog tlaka unutar uzorka.

Tablica 6-2 prikazuje početne karakteristike ugrađenih uzoraka. Prikazane su početne vrijednosti visine uzorka prije nanošenja vertikalnog opterećenja, vlažnosti, suhe gustoće, koeficijenta pora te stupnja saturacije ugrađenih uzoraka. Tablica 6-3 prikazuje izmjerenu promjenu visine uzorka ostvarenu u fazi hidratacije te izračunate vrijednosti visina uzorka i koeficijent pora nakon završetka faze hidratacije.

Tablica 6-2 Početne karakteristike uzoraka

Uzorak	Normalno naprezanje (kPa)	Visina (mm)	Vlažnost (%)	Suha gustoća (Mg/m <sup>3</sup> )	Koef. pora	Stupanj zasićenosti (%)
I-7	50	8,25	11,46	1,026	1,639	18,9
I-14	50	8,01	11,37	1,058	1,558	19,7
I-21	50	8,06	11,13	1,053	1,570	19,2
II-7	100	8,11	11,55	1,043	1,595	19,6
II-14	100	8,12	11,42	1,043	1,595	19,4
II-21	100	8,03	11,22	1,057	1,561	19,5
III-7	200	8,09	11,62	1,045	1,592	19,6
III-14	200	8,67	13,47	0,959	1,712	19,6
III-21	200	8,13	11,37	1,043	1,597	19,5

Tablica 6-3 Rezultati faze hidratacije

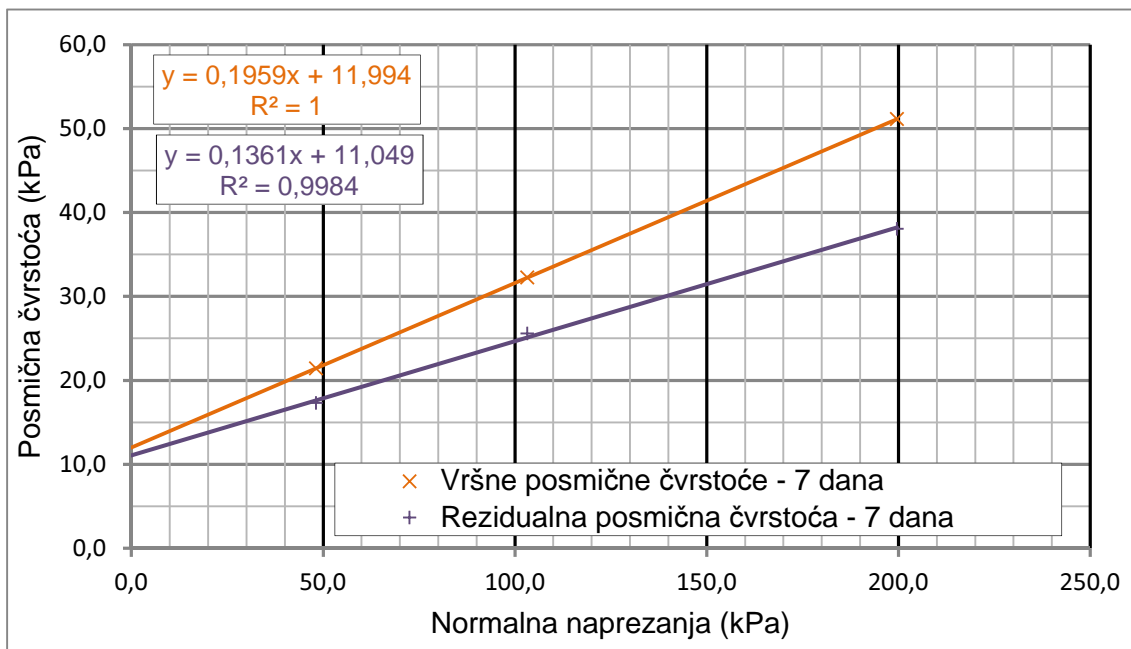
Uzorak	Normalno naprezanje (kPa)	Promjena visine (mm)	Visina (mm)	Koef. pora nakon hidratacije
I-7	50	-4,357	12,61	3,032
I-14	50	-5,516	13,52	3,321
I-21	50	-6,692	14,75	3,704
II-7	100	-2,277	10,39	2,324
II-14	100	-3,265	11,38	2,639
II-21	100	-3,774	11,80	2,766
III-7	200	-1,076	9,17	1,936
III-14	200	-0,999	9,63	2,137
III-21	200	-1,240	9,37	1,993

Tablica 6-4 prikazuje rezultate ispitivanja iz faze posmika. Prikazane su vrijednosti vršne posmične čvrstoće te vrijednosti horizontalnih pomaka pri kojima su ostvarene vršne posmične čvrstoće, vrijednosti rezidualne posmične čvrstoće dobivene pri deformaciji uzoraka od 15%, te ukupna promjena vlažnosti uzoraka kroz ispitivanje, završna vlažnost uzoraka te završna vrijednost stupnja zasićenosti uzoraka.

Tablica 6-4 Rezultati faze smicanja

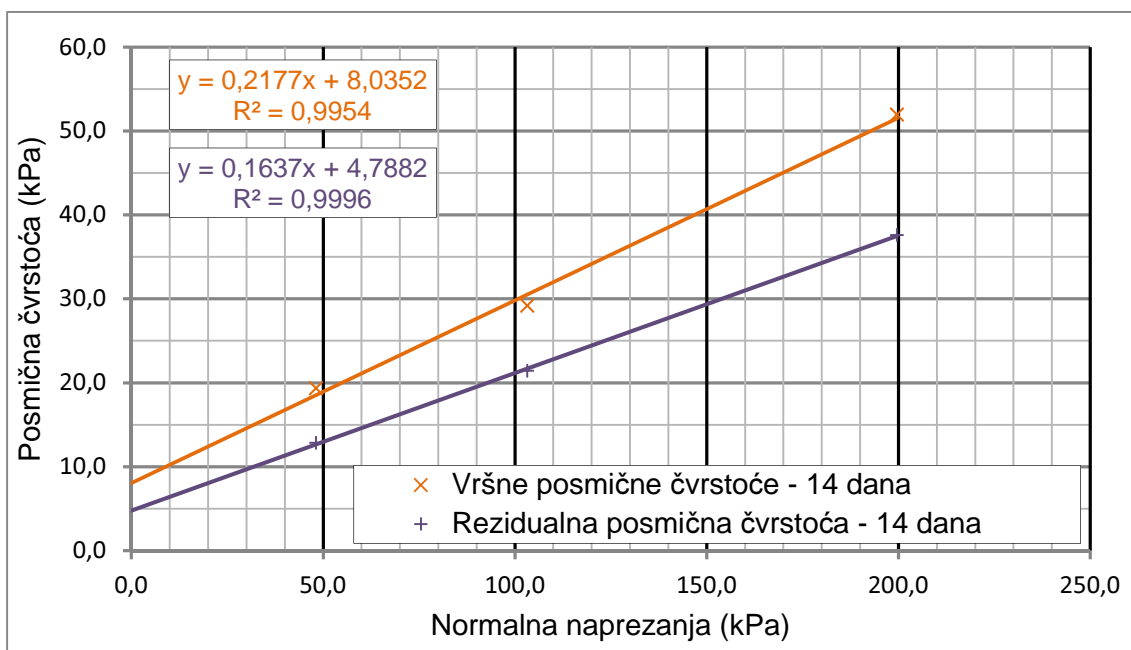
Uzorak	Normalno naprezanje (kPa)	Vršna posmična čvrstoća (kPa)	Vršni pomak (mm)	Rezidualna posmi. čvrstoća (kPa)	Promjena vlažnosti (%)	Završna vlažnost (%)	Završni stup. zasićenosti (%)
I-7	50	21,4	1,31	17,3	101,66	113,12	100,0
I-14	50	19,4	1,63	12,9	112,96	124,32	100,0
I-21	50	17,2	1,05	11,8	129,13	140,26	100,0
II-7	100	32,2	1,32	25,6	73,81	85,36	99,4
II-14	100	29,2	0,95	21,4	86,40	97,82	100,0
II-21	100	27,5	0,70	20,0	92,83	104,05	100,0
III-7	200	51,1	0,89	38,0	59,70	71,33	99,7
III-14	200	52,0	0,35	37,6	56,19	69,66	87,8
III-21	200	49,4	0,53	36,2	60,55	71,91	97,7

Slika 6-12 prikazuje anvelope sloma vršnih i rezidualnih vrijednosti posmične čvrstoće uzorka posmaknutih nakon 7 dana hidratacije. Pri tome vršna vrijednost kuta trenja iznosi  $11,23^\circ$  i kohezije 11,99 kPa dok rezidualni kuta trenja iznosi  $7,80^\circ$  a rezidualna kohezija 11,05 kPa.



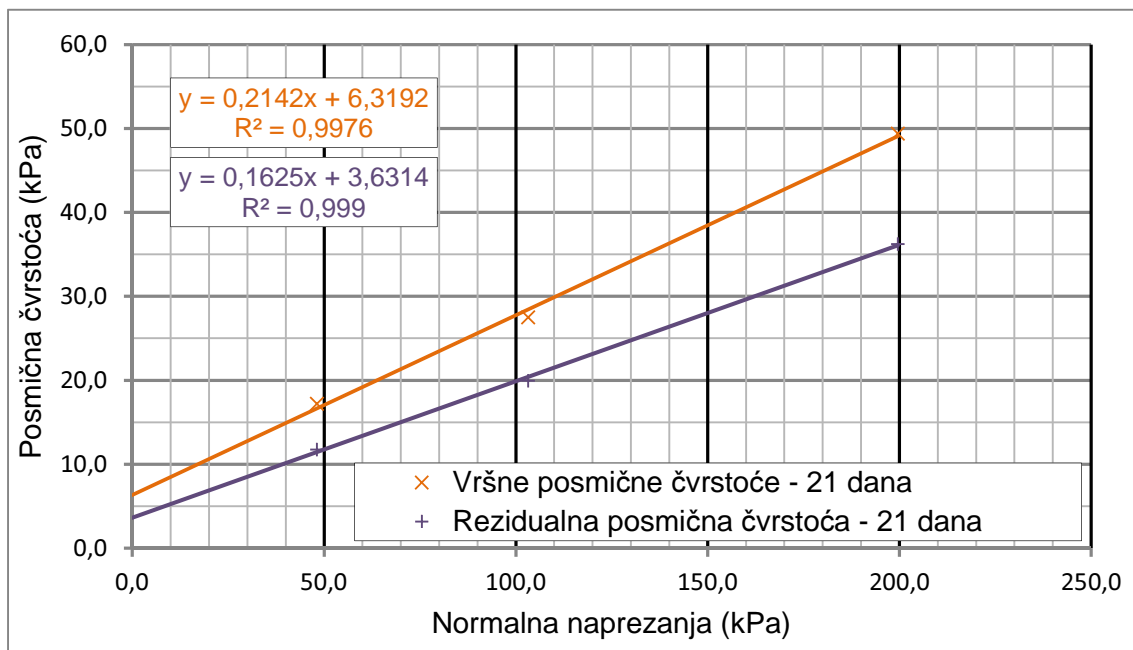
Slika 6-12 Anvelope sloma za uzorke hidratizirane 7 dana

Slika 6-13 prikazuje anvelope sloma vršnih i rezidualnih vrijednosti posmične čvrstoće uzorka posmaknutih nakon 14 dana hidratacije. Pri tome vršna vrijednost kuta trenja iznosi  $12,47^\circ$  i kohezije 8,04 kPa dok rezidualni kuta trenja  $9,38^\circ$  i rezidualna kohezije 4,79 kPa.



Slika 6-13 Anvelope sloma za uzorke hidratizirane 14 dana

Slika 6-14 prikazuje anvelope sloma vršnih i rezidualnih vrijednosti posmične čvrstoće uzorka posmaknutih nakon 21 dan hidratacije. Pri tome vršna vrijednost kuta trenja iznosi  $12,27^\circ$  i kohezije 6,32 kPa dok rezidualni kuta trenja iznosi  $9,31^\circ$  i rezidualna kohezija 3,63 kPa.



Slika 6-14 Anvelope sloma za uzorke hidratizirane 21 dan

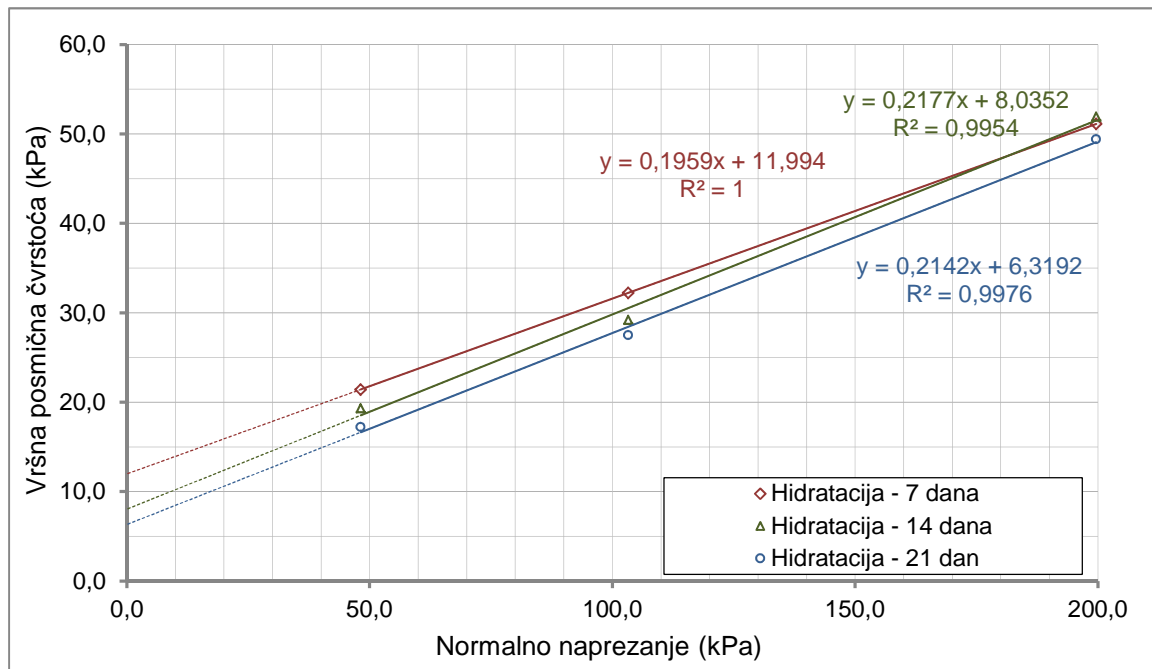
Tablica 6-5 prikazuje vrijednosti parametara posmične čvrstoće dobivene smicanjem uzorka bentonitne gline.

Tablica 6-5 Parametri posmične čvrstoće bentonitne gline

Duljina hidratacije	Vršni parametri		Rezidualni parametri	
	Kohezija (kPa)	Kut trenja ( $^\circ$ )	Kohezija (kPa)	Kut trenja ( $^\circ$ )
7 dana	11,99	11,23	11,05	7,80
14 dana	8,04	12,47	4,79	9,38
21 dan	6,32	12,27	3,63	9,31

### 6.3 Ovisnost čvrstoće o postupku hidratacije

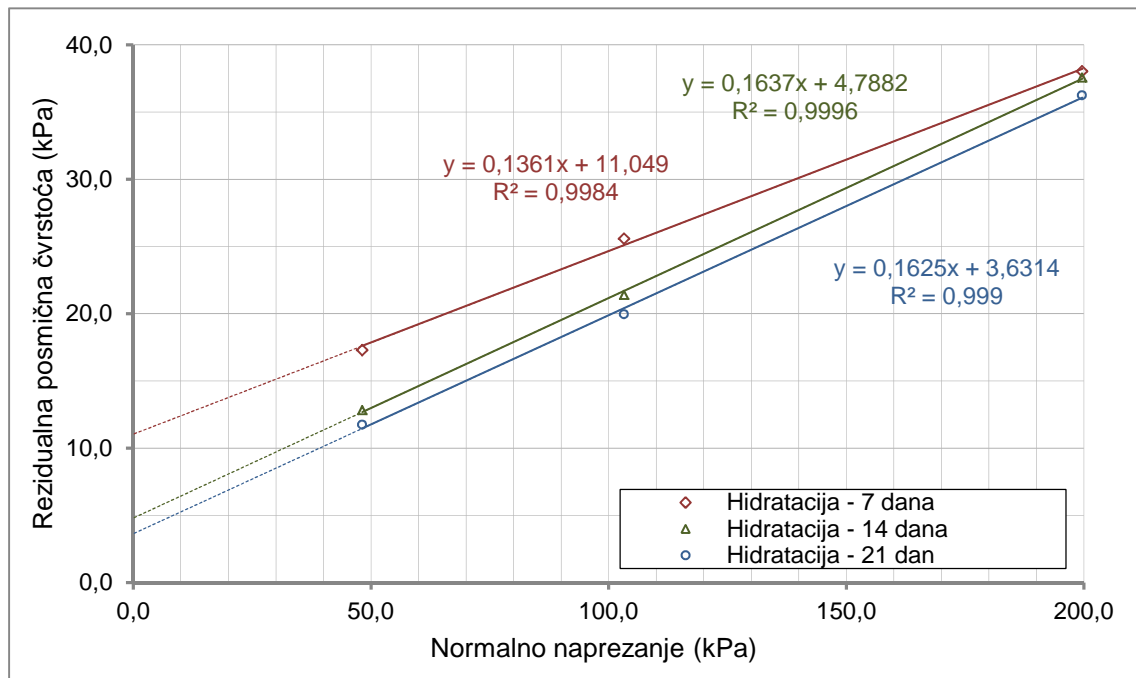
Promatranjem vršnih i rezidualnih anvelopa sloma (slika 6-15 i Slika 6-16) vidljiv je isti trend ponašanja tijekom hidratacije. Uzorci smicani nakon 14 i 21 dana hidratacije imaju gotovo iste vrijednosti vršnog ( $12,47^\circ$  i  $12,27^\circ$ ) i rezidualnog kuta trenja ( $9,38^\circ$  i  $9,31^\circ$ ) dok se vršne (8,04 na 6,32 kPa) i rezidualne (4,79 na 3,63 kPa) vrijednosti kohezije smanjuju produljenjem hidratacije uzoraka. Kod uzorka hidratiziranog 7 dana uočava se promjena ponašanja u odnosu na uzorke hidratizirane 14 i 21 dan. Ovaj uzorak pokazuje značajno veće vrijednosti vršne (11,99 kPa) i rezidualne (11,05 kPa) kohezije te nešto manje vrijednosti vršnog ( $11,23^\circ$ ) i rezidualnog ( $7,80^\circ$ ) kuta unutrašnjeg trenja u odnosu na uzorke hidratizirane 14 i 21 dan.



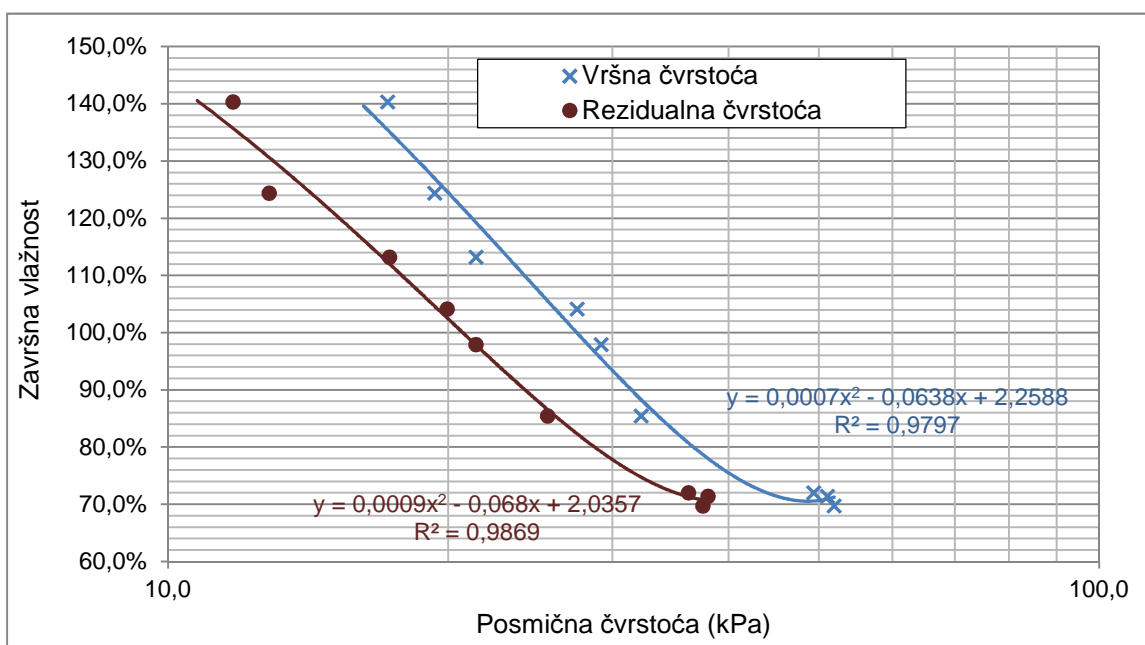
Slika 6-15 Anvelope sloma za vršnu čvrstoću

Slika 6-17 prikazuje utjecaj završne vlažnosti uzoraka na dobivene vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće. Vidljivo je da se, neovisno o normalnim naprezanjima, vrijednosti posmične čvrstoće smanjuju povećanjem završne vlažnosti. Tako dvostruko povećanje završne vlažnosti sa 69,66%, u slučaju hidratacije od 14 dana pri normalnom naprezanju od 200 kPa na 140,26% u slučaju hidratacije od 21 dana pri normalnom naprezanju od 50 kPa, uzrokuje otprilike trostruko smanjenje rezidualne posmične čvrstoće sa 37,6 na 11,8 kPa odnosno vršne posmične čvrstoće sa 52,0 na 17,2 kPa. Isti trend je vidljiv i promatranjem utjecaja koeficijenta pora na posmičnu čvrstoću bentonitne gline (Slika 6-18). I u ovom slučaju, otprilike dvostruko povećanje koeficijenta pora sa 1,936 u slučaju hidratacije

od 7 dana pri normalnom naprezanju od 200 kPa na 3,704 u slučaju hidratacije od 21 dana pri normalnom naprezanju od 50 kPa uzrokuje otprilike trostruko smanjenje rezidualne posmične čvrstoće sa 38,0 na 11,8 kPa odnosno vršne posmične čvrstoće sa 51,1 na 17,2 kPa.



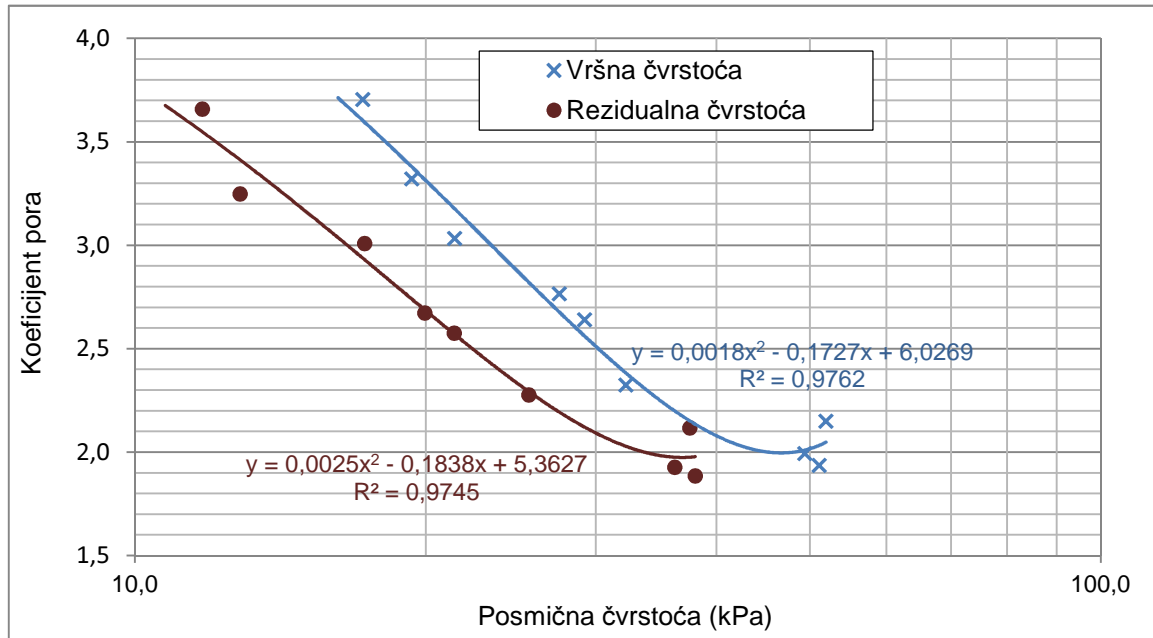
Slika 6-16 Anvelope sloma za rezidualnu čvrstoću



Slika 6-17 Utjecaj završne vlažnosti na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću

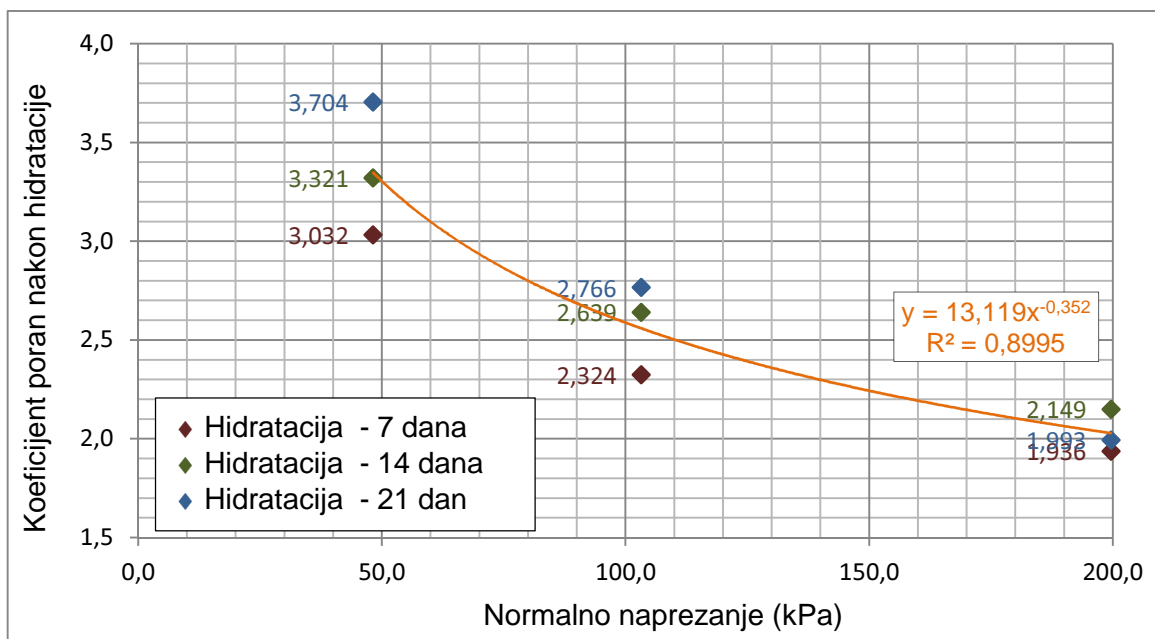
Promatranjem krivulja utjecaja završne vlažnosti na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću može se uočiti da krivulja mijenja nagib kod manjih vlažnosti (Slika 6-17). Dio krivulja koji

se odnosi na vlažnosti niže od približno 90% ima blaži nagib. Drugi dio krivulja, prilikom vlažnosti veće od približno 90%, ima znatno veći nagib. Pretpostavljena granica ponašanja bentonitne gline vidljiva je i promatranjem krivulja utjecaja koeficijenta pora na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću (Slika 6-18).



Slika 6-18 Utjecaj koeficijenta pora na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću

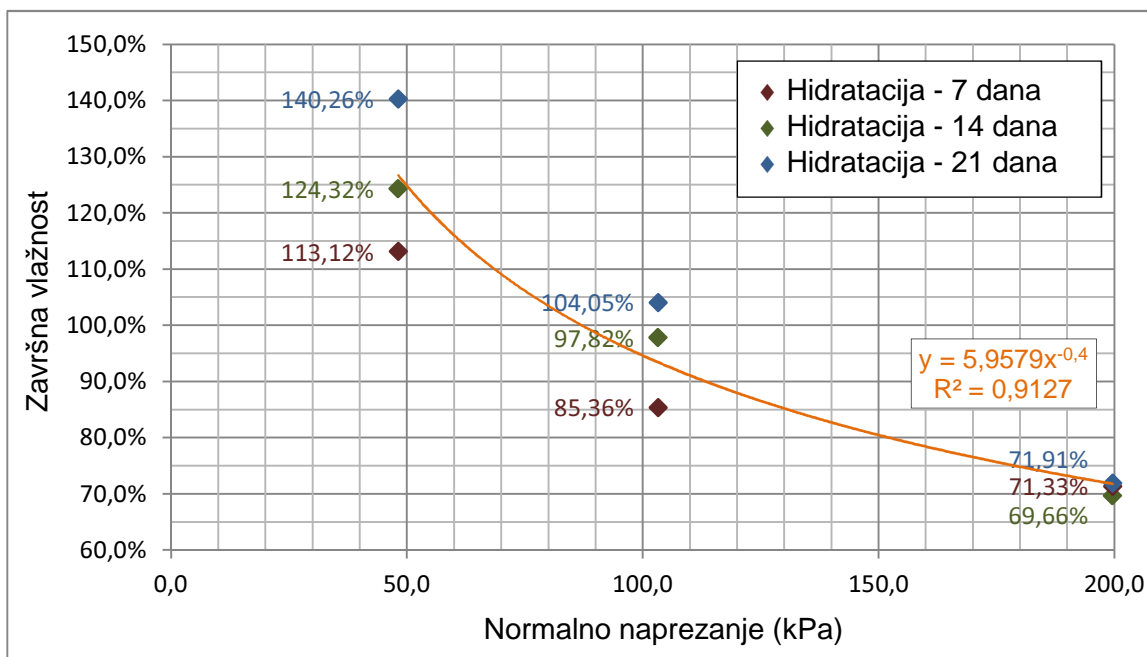
Ukoliko se promatra odnos normalnih naprezanja i koeficijenta pora nakon hidratacije (Slika 6-19) te odnos normalnih naprezanja i završne vlažnosti (Slika 6-20) također je primjetan gotovo isti trend u ponašanju bentonitne gline.



Slika 6-19 Ovisnost koeficijenta pora nakon hidratacije o normalnom naprezanju



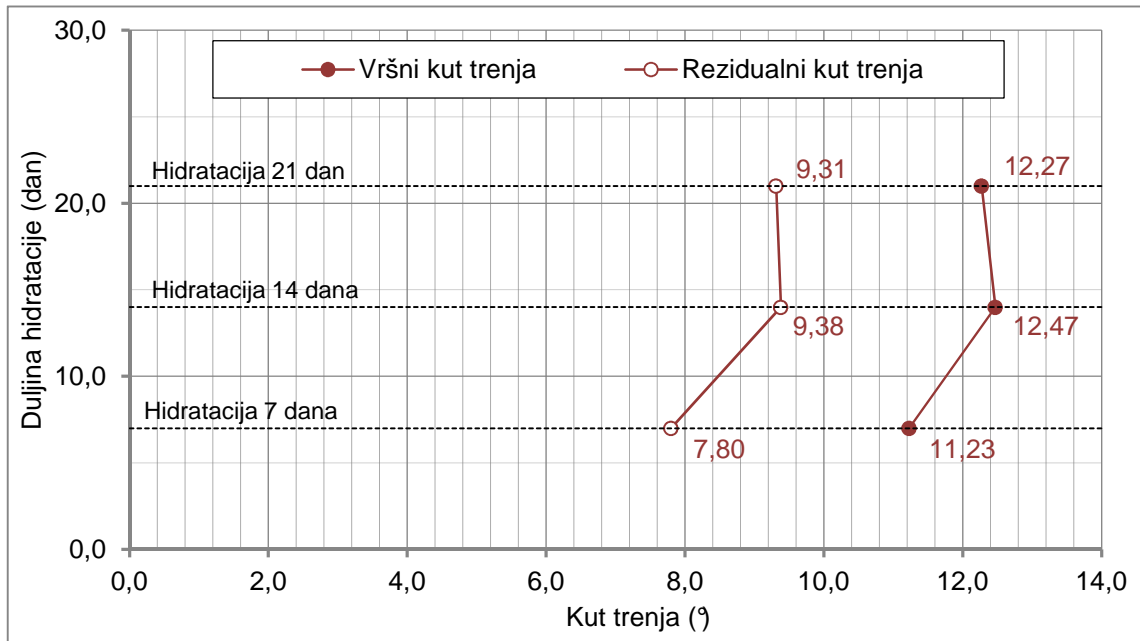
Duljina hidratacije ima dominantni utjecaj na završnu vlažnost i koeficijent pora nakon hidratacije pri manjim normalnim napreznjima. Tako je pri normalnom napreznju od 50 kPa, dobivena završna vlažnost od 113,12% nakon 7 dana hidratacije te završna vlažnost 140,26% nakon 21 dan hidratacije, što čini povećanje vlažnosti za 27,14%. Pri normalnom napreznju od 200 kPa, promjena završne vlažnosti je vrlo mala. U slučaju hidratacije od 7 dana, iznosila je 71,33%, 14 dana 69,66% i 21 dana 71,91%.



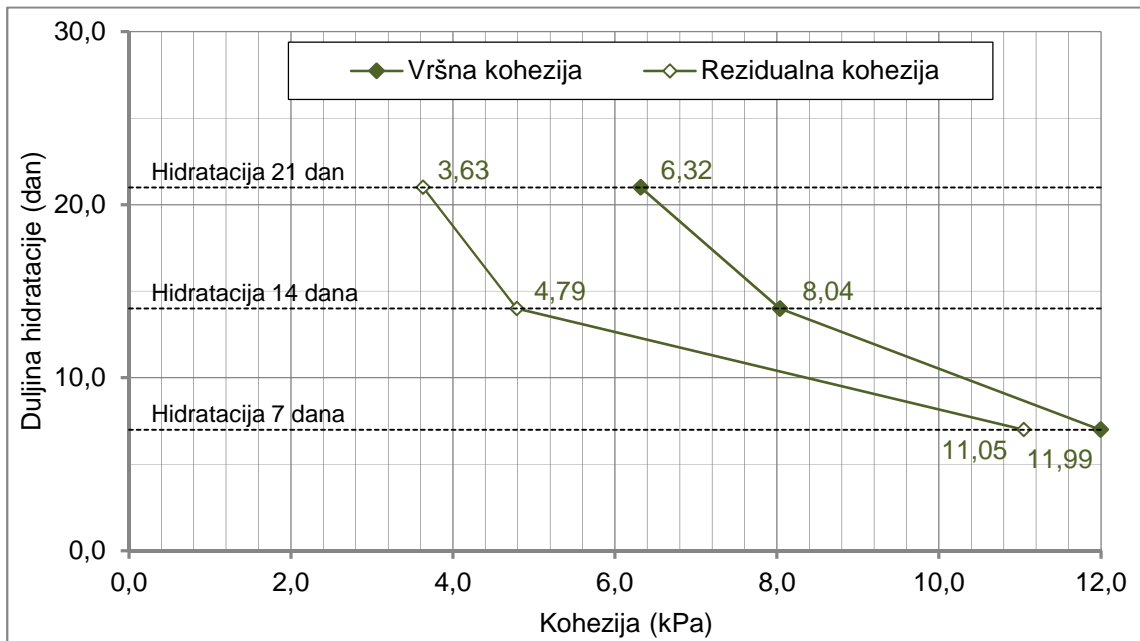
Slika 6-20 Ovisnost završne vlažnosti o normalnom napreznju

Slika 6-21 prikazuje ovisnost vršnog i rezidualnog kuta trenja o duljini hidratacije. Za ispitivane duljine hidratacije, promjena kuta trenja vidljiva je do 14 dana hidratacije. Daljnjom hidratacijom kut trenja se neznatno smanjuje. Slijedeća slika (Slika 6-22) prikazuje ovisnost vršne i rezidualne kohezije o duljini hidratacije. Promatrajući promjenu kohezije može se uočiti njeno smanjenje s produljenjem hidratacije. Navedeno je prikazano i preko normaliziranih vrijednosti vršnog i rezidualnog kuta trenja (Slika 6-23) i normaliziranih vrijednosti vršne i rezidualne kohezije (Slika 6-24).

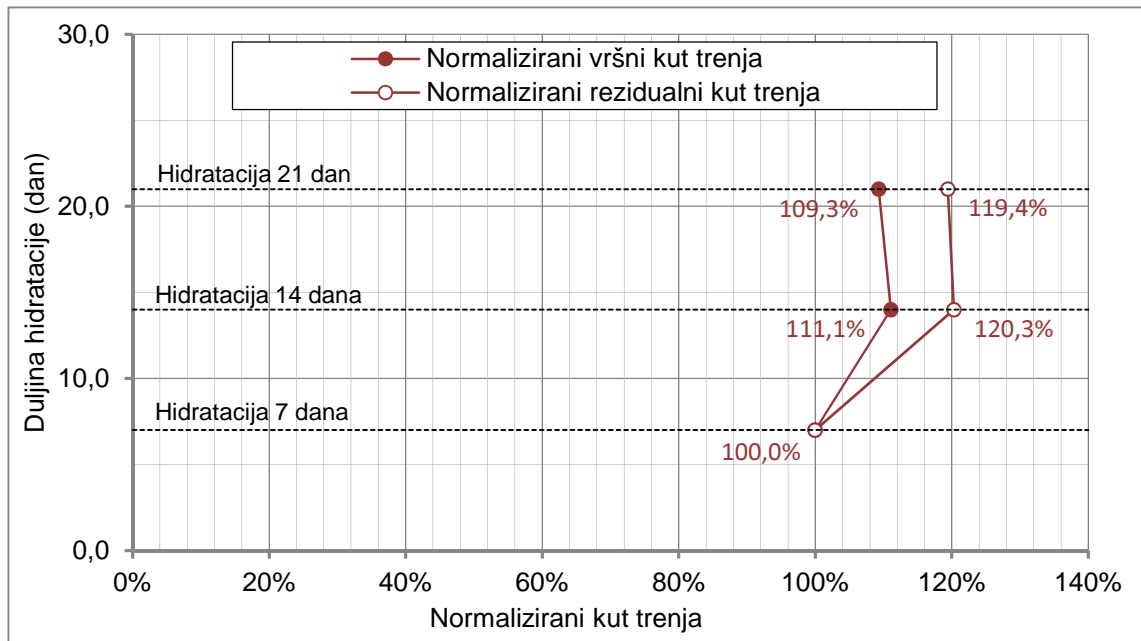
Vrijednosti kuta trenja i kohezije normalizirane su i prikazane u postocima u odnosu na vrijednosti parametara nakon hidratacije od 7 dana. Može se uočiti da hidratacijom od 14 dana dolazi do povećanja vršnog kuta trenja za oko 10% dok se daljnjom hidratacijom kut trenja neznatno smanjuje. Kod rezidualnog kuta trenja dolazi do većeg povećanja kuta trenja, ono iznosi oko 20% nakon 14 dana hidratacije dok se nakon toga također neznatno smanjuje.



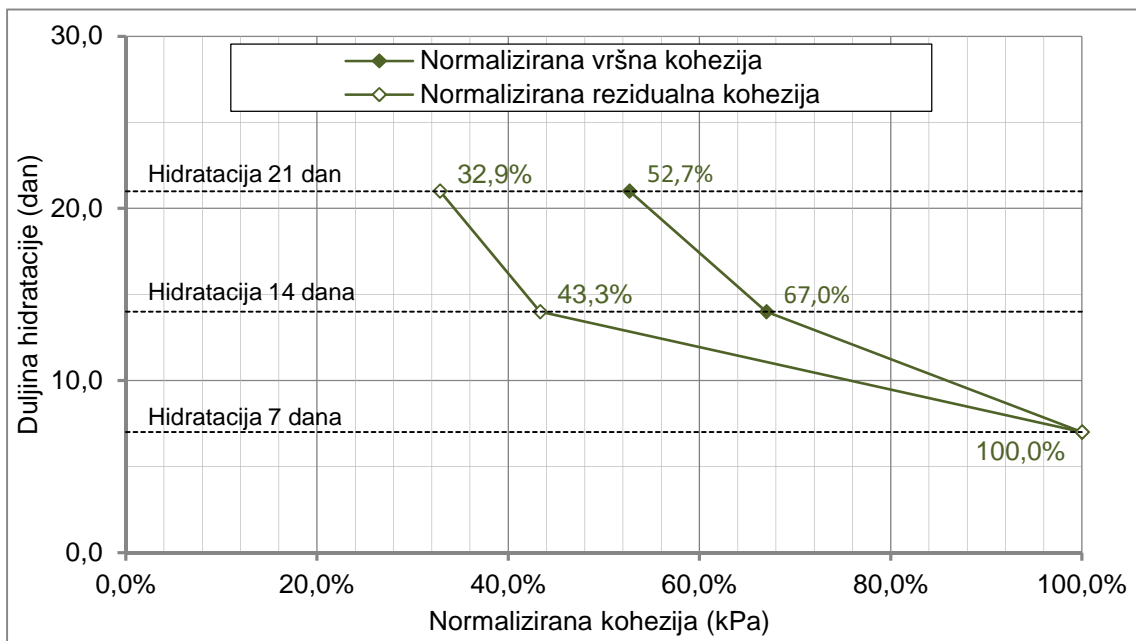
Slika 6-21 Ovisnost kuta trenja o duljini hidratacije



Slika 6-22 Ovisnost kohezije o duljini hidratacije



Slika 6-23 Ovisnost normaliziranog kuta trenja o duljini hidratacije



Slika 6-24 Ovisnost normalizirane kohezije o duljini hidratacije

Vrijednost kohezije kontinuirano opada s duljinom hidratacije s tim da vrijednosti rezidualne kohezije opadaju većim intenzitetom. Tako vrijednost vršne kohezije iznosi 67% normalizirane vrijednosti nakon 14 dana hidratacije i 52,7% nakon 21 dana hidratacije, vrijednosti rezidualne kohezije iznose 43,3% normalizirane vrijednosti, što predstavlja 13,7%

veće smanjenje rezidualne kohezije. Nakon 21 dana hidratacije, vrijednost rezidualne kohezije iznosi 32,9% normalizirane vrijednosti što je 9,8% manje u odnosu na vršnu koheziju.

## 7 DISKUSIJA REZULTATA

U okviru ovog poglavlja sumarno će biti prikazana diskusija i kvantitativna analiza rezultata provedenih eksperimentalnih istraživanja kao i moguće korelacijske veze vlažnosti bentonitne gline s posmičnom čvrstoćom, koeficijentom konsolidacije i koeficijentom hidrauličke provodljivosti. Rezultati provedenih istraživanja analizirani su i korelirani s dostupnim literaturnim podacima s ciljem osiguranja cjelovitijeg uvida u mehanizme bubrenja bentonitne gline.

Istraživanja su provedena na jednoj vrsti bentonitne gline, početne vlažnosti približno 12% što je u granicama tvornički deklariranih vrijednosti za glinene geosintetičke barijere (10-20%). Bentonitna glina kao mineralna komponenta glinenih geosintetičkih barijera nalazi se u obliku granula ili praha. Da bi se osigurala nepropusnost bentonitne gline mora doći do njene hidratacije nakon ugradnje. Kod ugradnje glinene geosintetičke barijere u odlagališta otpada hidratacija je obično posljedica kontakta s vlagom prisutnom u podinskim i krovinskim slojevima te djelovanja vlage iz atmosfere.

Ispitivanja utjecaja bubrenja na mehaničke karakteristike bentonitne gline provedena su na uzorku Volclay bentonitne gline mineraloškog sastava: montmorillonit 80-85%, kristobalit oko 5%, kvarc oko 5%, plagioklasi 5%. Radi se o natrijskoj bentonitnoj glini koja kao glavnu mineralnu fazu sadrži montmorillonit s dominantnim kationima natrija u međuslojnim prostorima (detaljnije u poglavlju 3.1 i 3.4). Za bentonitnu glinu korištenu u ovom istraživanju određeni su indeksni pokazatelji: granica tečenja 437,0%, granica plastičnosti 52,86%, specifična površina  $700 \text{ m}^2/\text{g}$  i kapacitet ionske izmjene  $88,63 \pm 6,51 \text{ meq}/100\text{g}$ .

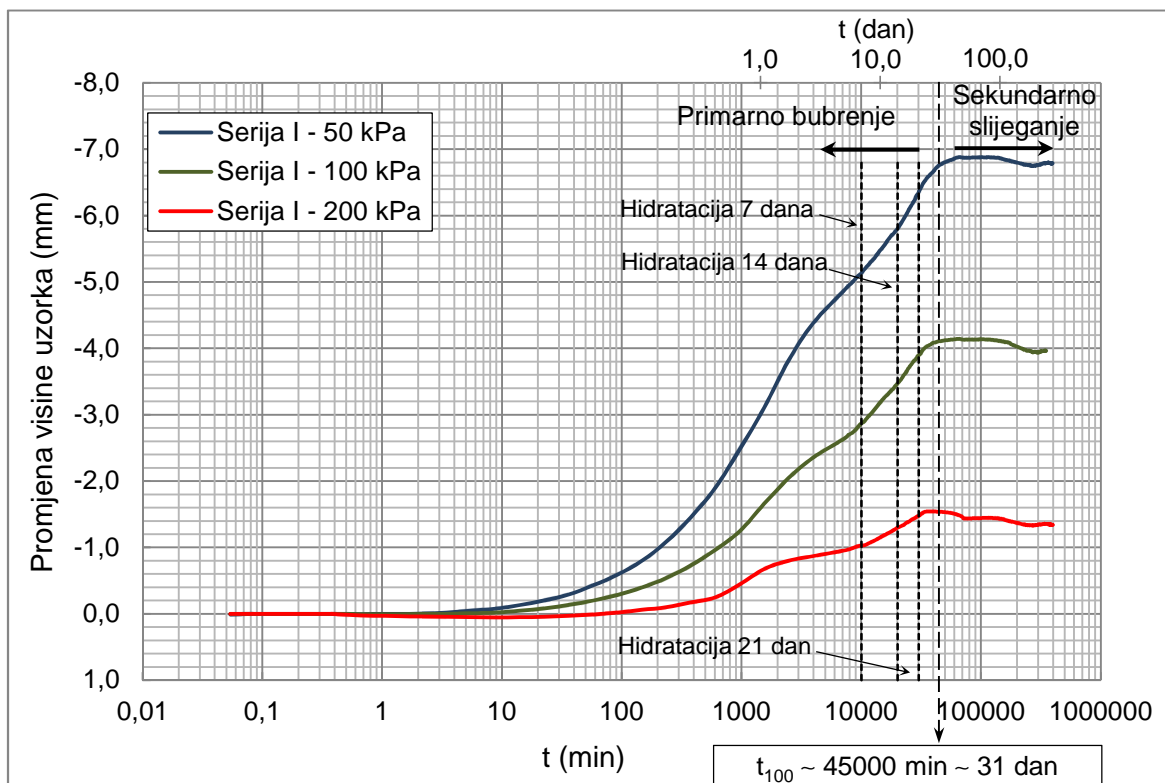
Prvo će se krenuti s analizom podataka o bubrenju bentonitne gline prikazanih na slici 7-1. Vidljivo je da se najveće bubrenje i relativna vertikalna deformacija javljaju kod uzoraka opterećenih najmanjim normalnim naprežanjem. S porastom normalnih naprežanja intenzitet bubrenja opada. Dakle, iznos vertikalne deformacije ovisi o veličini normalnog naprežanja.

Promatrajući vrijeme potrebno za završetak primarnog bubrenja, može se uočiti da su vremena završetka primarnog bubrenja približno ista pri svim normalnim naprežanjima. U ovom konkretnom slučaju, vrijeme proteklo do završetka primarnog bubrenja iznosilo je približno 31 dan promatrajući sve tri serije.

Na temelju razvoja vertikalne deformacije uzoraka nakon protoka vremena završetka primarnog bubrenja, može se uočiti da se u preostalom vremenskom periodu uzorak

sekundarno sliježe. Vertikalna deformacija u fazi sekundarne konsolidacije i njen vremenski razvoj također ovise o normalnim naprezanjima s tim da je u ovom slučaju, djelovanje suprotno, s porastom normalnih naprezanja raste i intenzitet sekundarne kompresije.

Radi usporedbe, slika 7-1 dodatno prikazuje duljine faze hidratacije uzoraka u uređaju za izravni posmik. Faza smicanja, u odnosu na fazu hidratacije, bila je kratka obzirom na odabranu brzinu smicanja. Dakle, na temelju prikazanog može se zaključiti da su se svi uzorci, ispitivani u uređaju za izravni posmik, tijekom ispitivanja nalazili u fazi primarnog bubrenja.

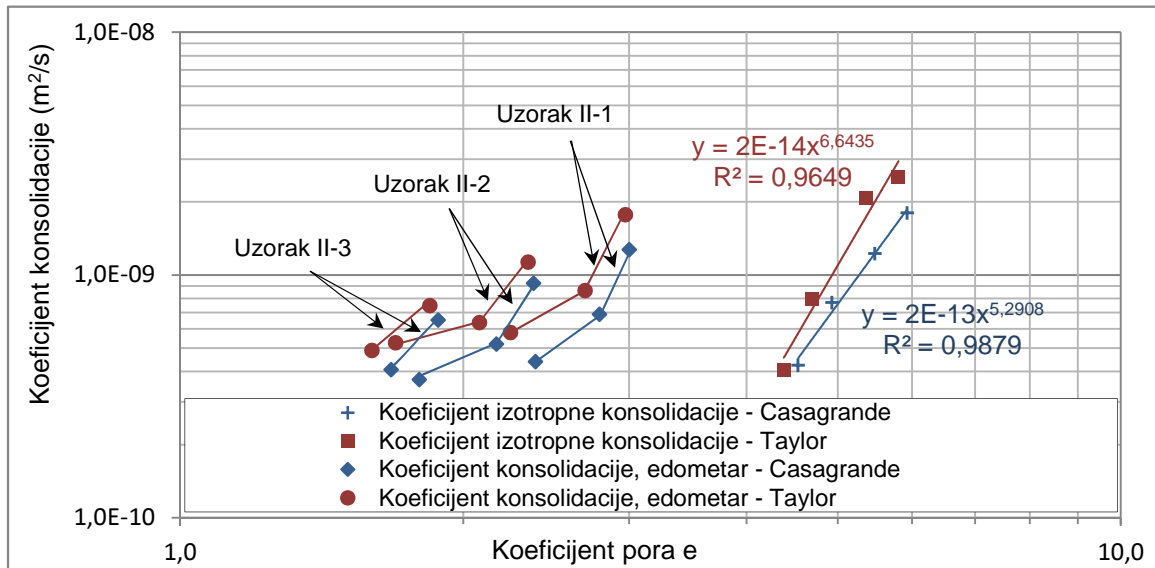


Slika 7-1 Proces bubrenja bentonitne gline

Analizom podataka o utjecaju promjene koeficijenta pora na vrijednosti koeficijenata konsolidacije vidljivo je da su dobivene vrijednosti koeficijenta pora nešto veće u troosnom uređaju u odnosu na dobivene u edometru. Naime, prije ugradnje u troosnu ćeliju uzorak je prethodno hidratiziran (Slika 7-2). To konkretno znači da se u slučaju ispitivanja u edometru radi o pokusima bubrenja pod opterećenjem dok je u slučaju pokusa u troosnom uređaju uzorak prvo hidratiziran da se omogući ugradnja u troosnu ćeliju a zatim opterećen.

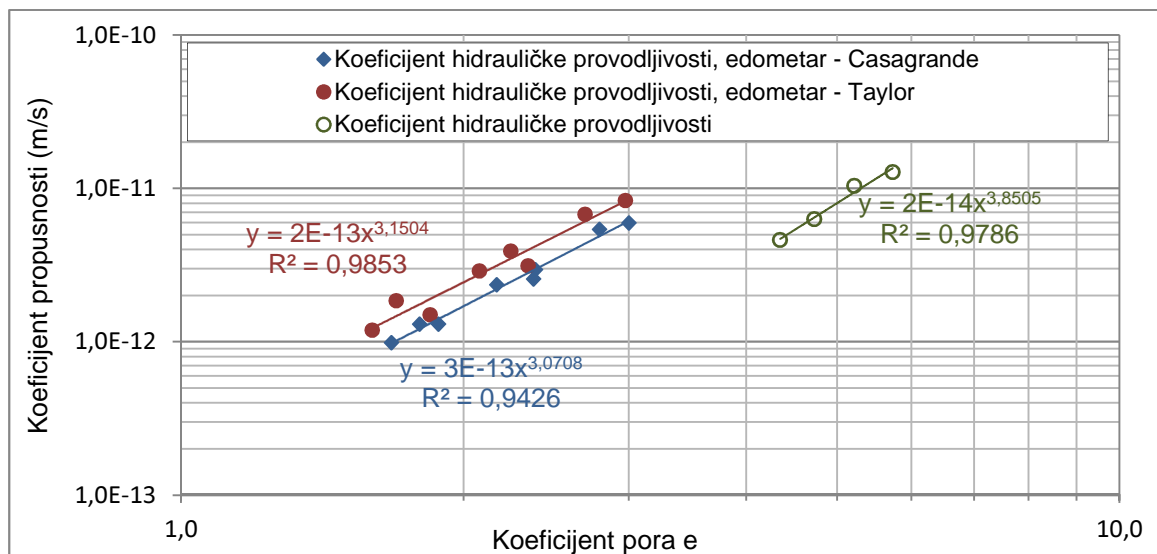
Može se uočiti da se sa smanjenjem koeficijenta pora smanjuju se i koeficijenti konsolidacije. Detaljnijim promatranjem vrijednosti koeficijenata konsolidacije može se

također uočiti da na dobivene vrijednosti koeficijenta konsolidacije utječe intenzitet opterećenja u pojedinom ciklusu (normalnim naprezanjima) te postupak hidratacije. Dakle, manje početno normalno naprezanje rezultiralo je većim početnim vrijednostima koeficijenata konsolidacije.



Slika 7-2 Utjecaj koeficijenta pora na koeficijente konsolidacije

Analizom podataka o utjecaju promjene koeficijenta pora na vrijednosti koeficijenata hidrauličke provodljivosti, općenito je vidljiv trend rasta koeficijenata hidrauličke provodljivosti s porastom koeficijenta pora (Slika 7-3).



Slika 7-3 Utjecaj koeficijenta pora na koeficijente hidrauličke provodljivosti

Veza logaritama vrijednosti koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti može se aproksimirati pravcem. Ovdje se također uočava da različiti načini bubrenja utječu na vrijednosti koeficijenata hidrauličke provodljivosti i koeficijenata pora. Uzorci koji su bubrili pod opterećenjem (edometar) pokazuju manje vrijednosti koeficijenata pora i koeficijenata hidrauličke propusnosti u odnosu na uzorke koji su bubrili neopterećeni (troosni).

Diskusija i analiza programa ispitivanja utjecaja bubrenja na posmičnu čvrstoću i parametre posmiče čvrstoće bentonitne gline provedena je uz usporedbu s literaturnim podacima o karakteristične krivulje retencije vode uzorka tvorničke oznake MX 80 koji po mineraloškom sastavu odgovaraju uzorku Volclay. Baddoe et al. (2011) navode da se navedena karakteristična krivulja retencije vode poklapa i s drugim mjerenjima provedenim na uzorcima oznake MX 80. Obzirom na navedeno, karakteristična krivulja retencije vode uzorka oznake MX 80 (Slika 2-27) koristit će se za daljnju analizu i usporedbu rezultata ispitivanja.

Na temelju karakteristične krivulje retencije vode uzorka MX 80 (Baddoe et al. 2011) može se pretpostaviti da smanjenjem usisnih naprežanja ispod 1 MPa, odnosno povećanjem vlažnosti do oko 60%, međuslojni prostori smektita postaju saturirani vezanom vodom čime je i potencijal usisa mikrostrukture smanjen. Smanjenjem usisa omogućeno je formiranje difuznih slojeva u međuslojnim prostorima (Marcial et al. 2002). Prijelazni dio kod usisnih naprežanja od 0,4-1 MPa odnosi se na vlažnosti od 60-90%. Kod usisnih naprežanja manjih od 0,4 MPa odnosno vlažnosti većih od približno 90% pretpostavlja se da je djelovanje dvostrukog difuznog sloja izraženo tj. da dominira osmotsko bubrenje.

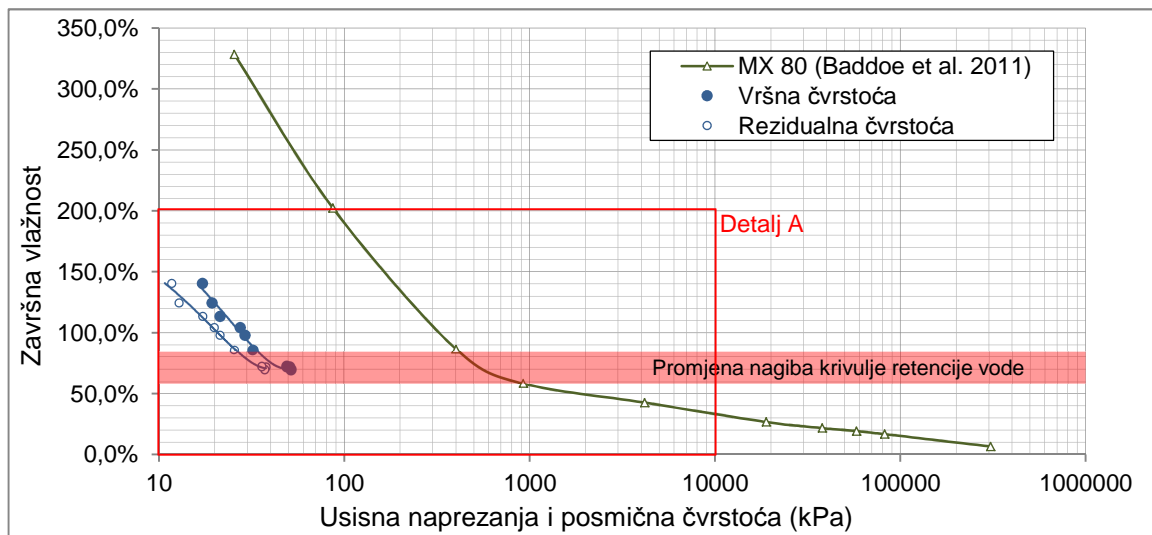
Ispitivanja čvrstoće provedena u ovom radu pokazuju sličan trend. Navedeno se slaže i s prijašnjim istraživanjima. Stark i Eid (1994) i Fox et al. (1998) su došli do zaključka da glinene geosintetičke barijere ne gube čvrstoću proporcionalno s povećanjem vlažnosti.

Slika 6-17 prikazuje utjecaj vlažnosti bentonitne gline na njenu čvrstoću. Može se uočiti da na krivulji dolazi do promjene nagiba. Promjena nagiba krivulje uočena je kod vlažnosti od približno 90% što odgovara promjeni nagiba navedene karakteristične krivulje retencije vode (60-90%).

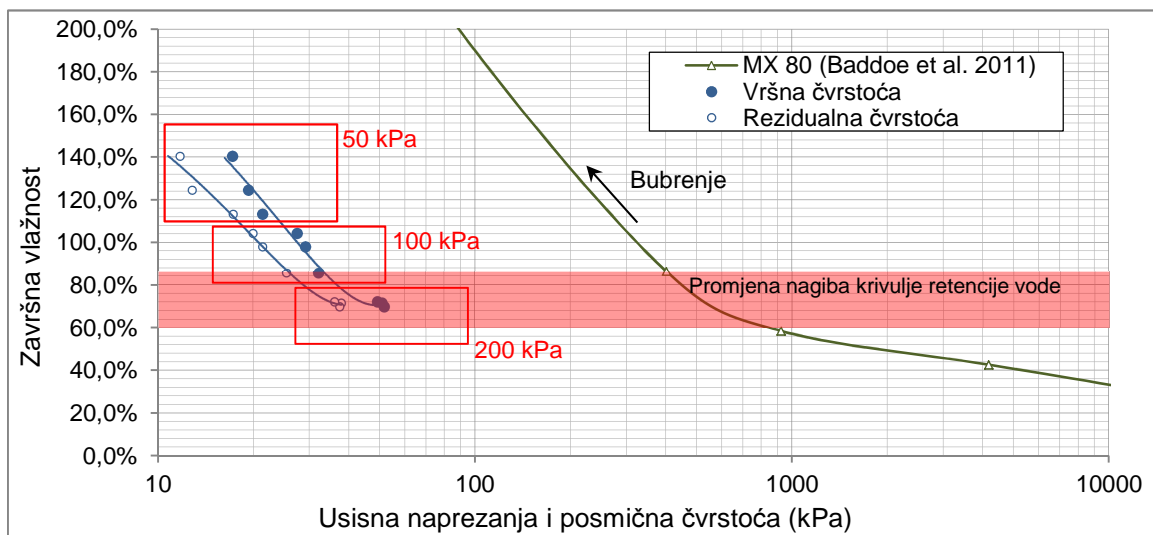
Slika 7-4 usporedno prikazuje utjecaj vlažnosti na usisna naprežanja uzorka MX 80 i na dobivene vrijednosti posmične čvrstoće. Slika 7-5 uvećano prikazuje detalj A prethodne slike. Može se uočiti da je odnos vlažnosti u linearnom te vršne i rezidualne posmične čvrstoće u logaritamskom mjerilu može aproksimirati pravcem za vlažnosti veće od 90%. Kod manjih



vrijednosti vlažnosti mijenja se nagib krivulje. Navedeno ponašanje odgovara promjenama na karakterističnoj krivulji retencije vode uzoraka MX 80. Nagib krivulja odnosa vlažnosti te vršne i rezidualne posmične čvrstoće približno odgovara nagibu karakteristične krivulje retencije vode uzorka MX 80. Može se pretpostaviti da pri usisnim naprezanjima većim od 1 MPa nije došlo do potpunog zasićenja međuslojnih prostora vodom, te da na čvrstoću dominantno utječe trenje između čestica gline uz prisutna usisna naprezanja.



Slika 7-4 Prikaz utjecaja vlažnosti na usisna naprezanja i posmičnu čvrstoću

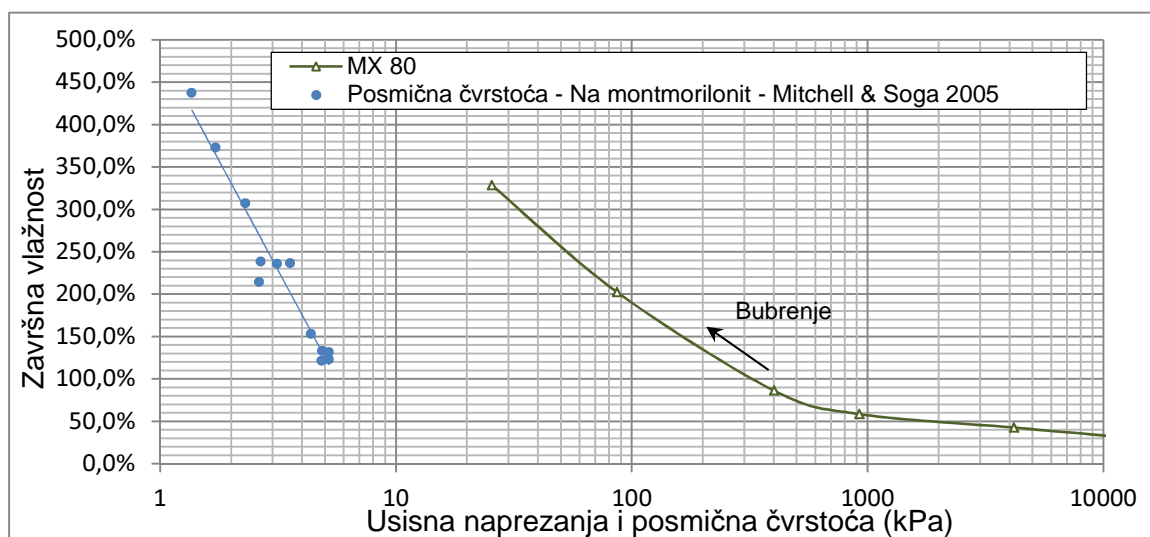


Slika 7-5 Prikaz utjecaja vlažnosti na usisna naprezanja i posmičnu čvrstoću – detalj A

Drugi dio krivulje, pri većim vlažnostima, kod usisnih naprezanja manjim od 0,4 MPa, ima znatno veći nagib pa se može pretpostaviti da je utjecaj vlažnosti bentonitne gline na njenu posmičnu čvrstoću dominantan. Ovdje se u mikrostrukтури smektita počinju pojavljivati

dvostruki difuzni slojevi. Struktura bentonitne gline se mijenja, te na posmičnu čvrstoću dominantno djeluje vlažnost odnosno promjena usisnih napreznja s promjenom vlažnosti.

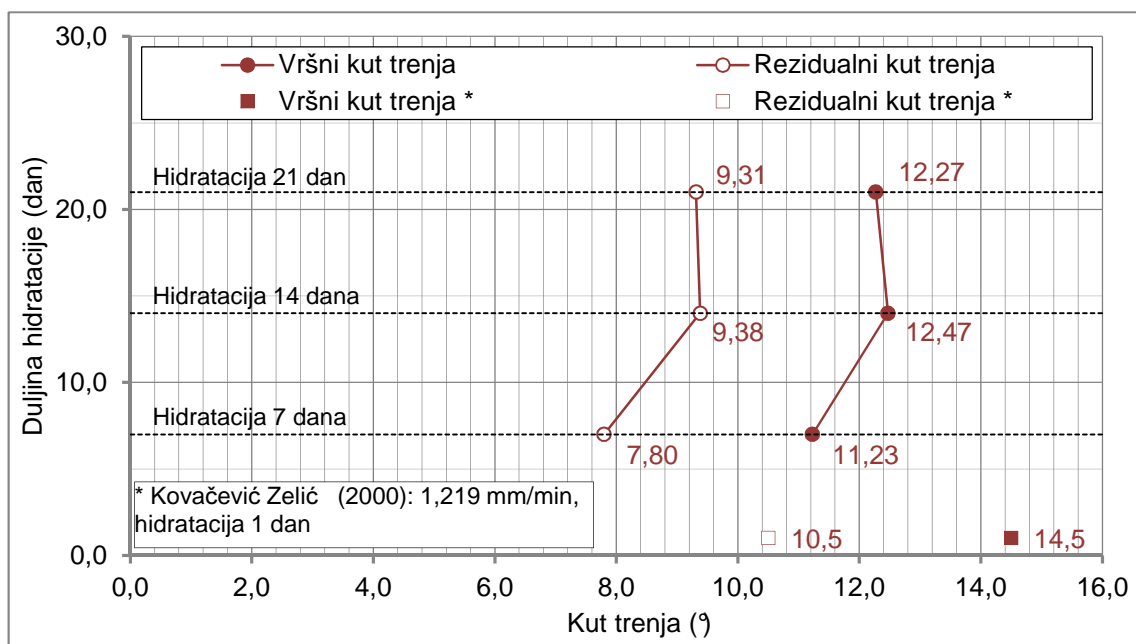
Odnos posmične čvrstoće u logaritamskom mjerilu i vlažnosti hidratiziranih uzoraka bentonitne gline u linearnom mjerilu, aproksimiran pravcem, u skladu je s podacima koje su objavili Mitchell i Soga (2005). Slika 7-6 prikazuje usporedbu karakteristične krivulje retencije vode uzorka MX 80 (Marcial et al. 2002) s utjecajem vlažnosti na posmičnu čvrstoću natrijskog montmorillonita. Ako se usporede nagibi krivulja odnosa vršne i rezidualne posmične čvrstoće bentonitne gline Volclay, krivulje retencije vode uzorka MX 80 i Kunigel (Slika 2-27) s nagibom pravca odnosa vlažnosti i posmične čvrstoće (Slika 7-6) natrijskog montmorillonita (Mitchell & Soga 2005) za hidratizirane uzorke vlažnosti iznad 90%, može se uočiti da je krivulja vlažnosti i posmične čvrstoće natrijskog montmorillonita strmija u odnosu na vrijednosti bentonitne gline Volclay ali i od završnog dijela krivulje retencije vode uzorka MX 80 i uzorka Kunigel. Može se pretpostaviti da se kod natrijskog montmorillonita radi se o monomineralu, pa je završni dio krivulje retencije strmiji a što je u skladu sa zaključcima Marcial et al. (2002) koji navode da se blaža krivulja javlja kod uzorka s manjim udjelom smektita.



Slika 7-6 Prikaz utjecaja vlažnosti na usisna napreznja i posmičnu čvrstoću natrijskog montmorillonita

Analiza utjecaja duljine hidratacije na kut trenja i na koheziju prikazana je slikama 7-7 i 7-8. S ciljem cjelovitijeg opisa ponašanja bentonitne gline pri različitim duljinama hidratacije, također su prikazani podaci o parametrima posmične čvrstoće nearmirane glinene geosintetičke barijere, hidratizirane 1 dan vodovodnom vodom kao ispitnom tekućinom,

smicane brzinom 1,219 mm/min (Kovačević Zelić 2000). U odnosu na pokuse smicanja na uzorku Volclay, prezentirane u sklopu ovog rada, vidljive su sljedeće razlike u uvjetima ispitivanja ova dva uzorka: uzorak bentonitne gline u odnosu na uzorak glinene geosintetičke barijere, demineralizirana voda u odnosu na vodovodnu vodu kao ispitnu tekućinu te smicanje provedeno brzinom 1 mm/min u odnosu na 1,219 mm/min. Brtvena komponenta glinene geosintetičke barijere, po proizvođačkoj specifikaciji, ima slična svojstva kao uzorak Volclay. Proizvođač navodi da se radi o prirodnoj natrijskoj bentonitnoj glini s 85% montmorillonita. Analizom parametara čvrstoće uzoraka Volclay hidratiziranih 7, 14 i 21 dana može se uočiti sljedeće. S povećanjem hidratacije uzoraka kohezija opada. Nakon 14 dana hidratacije, kohezija se smanjuje manjim intenzitetom. Situacija s vršnim i rezidualnim kutom trenja je nešto složenija. Nakon 7 dana hidratacije, kut trenja je u porastu, dok nakon 14 dana hidratacije nema značajnije promjene vrijednosti vršnog i rezidualnog kuta trenja. Usporedbom s poznatim podacima za hidrataciju od 1 dana, najveća vrijednosti vršnog i rezidualnog kuta trenja vidljiva je upravo kod najmanje hidratacije.

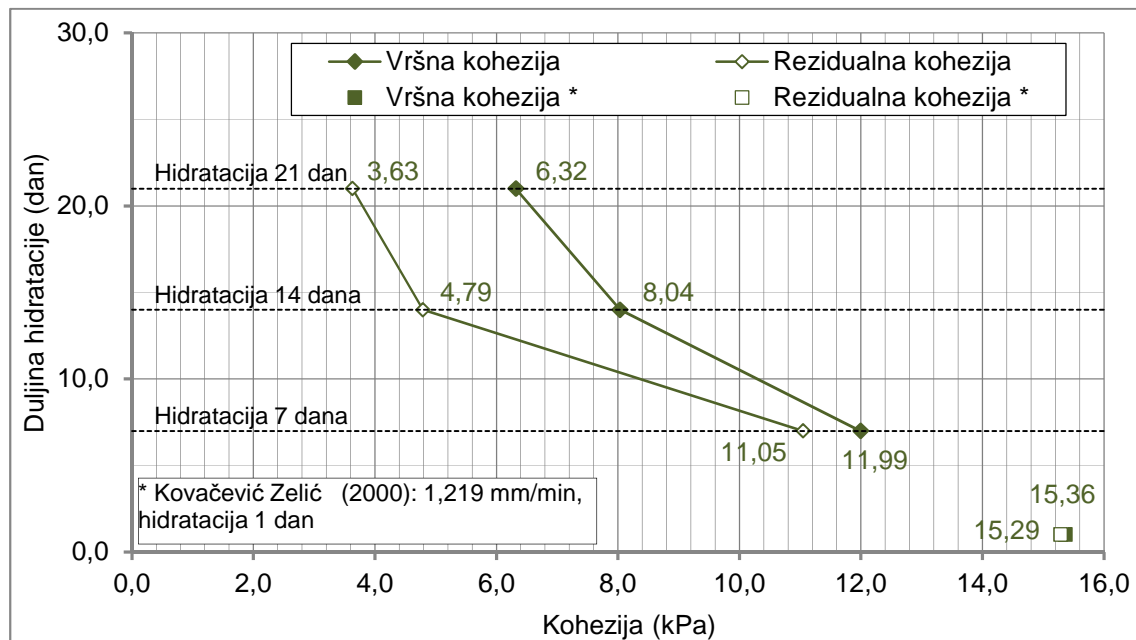


Slika 7-7 Utjecaj duljine hidratacije na kut trenja

Utjecaj hidratacije na vršne i rezidualne vrijednosti kohezije bentonitne gline ukazuje da hidratacija ima veći utjecaj na rezidualnu koheziju. Značajnije smanjenje rezidualne kohezije u odnosu na vršne vrijednosti povećanjem duljine hidratacije pripisuje se djelovanju pornih tlakova. Naime, radilo se o pokusima veće brzine smicanja, pri čemu je tijekom faze posmika uvijek bilo prisutno slijeganje. Kako je slijeganje raslo s horizontalnim pomacima tijekom

posmika, može se pretpostaviti da su rasli i porni tlakovi što je imalo za posljedicu smanjenje usisnih napreznja a time čvrstoće i kohezije.

Kovačević Zelić (2000) navodi da su se uzorci nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera u serijama ispitivanja kod kojih nije došlo do potpune hidratacije uzoraka, ponašali kao krupnozrnati materijal i trebali bi pokazivati veći kut trenja, dok kod uznapredovale hidratacije, struktura minerala glina je dispergirana što bi trebalo rezultirati manjim kutom trenja. Općenito, kutovi trenja kod uzoraka hidratiziranih 1 dan pokazuju najveće vrijednosti kuta trenja. Diskrepanciju u odnosu na prethodnu tvrdnju čine kutovi trenja uzoraka hidratiziranih nakon 7 dana, s najmanjim vrijednostima kutova trenja. Kovačević Zelić (2000) pretpostavlja da pojava bubrenja može prividno smanjiti kut trenja. Smanjenje kohezije tijekom hidratacije vezano je za usisna napreznja, koja se smanjuju s rastom vlažnosti. Fredlund i Rahardjo (1993) su pokazali da postojanje usisnih napreznja kod bubrenja tj. negativnih pornih tlakova, uzrokuje smanjenje kohezije dok kut trenja ostaje isti. Ispitivanja na uzorcima hidratiziranim tijekom 14 i 21 dana upravo su pokazala ovakav trend. Kod ovih uzoraka hidratacije je uznapredovala, pa je vjerojatna i pojava difuznih slojeva u mikrostrukturi bentonitne gline.



Slika 7-8 Utjecaj duljine hidratacije na koheziju

Do sada navedeno ukazuje da će promjene u mikrostrukturi bentonitne gline imati bitnu ulogu na posmičnu čvrstoću bentonitne gline. Na početku hidratacije prisutne su male vlažnosti i ekstremne vrijednosti usisnih napreznja što ima za posljedicu da se bentonitna

glina ponaša kao krupnozrnati materijal pri tome pokazujući veći kut trenja. Porastom vlažnosti, zasićenost međuslojnih prostora vezanom vodom se povećava te dolazi do smanjenja usisnih naprezanja. Zasićenjem međuslojnih prostora vezanom vodom, usisna naprezanja su smanjena čime je omogućeno stvaranje difuznih slojeva u međuslojnim prostorima a time i disperzija strukture bentonitne gline. Dio karakteristične krivulje retencije vode bentonitne gline gdje dolazi do promjene nagiba (0,4-1 MPa), pretpostavlja se da označava vlažnosti kod kojih dolazi do navedene promjene u mikrostrukturi bentonitne gline odnosno postupnog početka stvaranja difuznih slojeva u međuslojnim prostorima. Ovo se očituje u promjenama mehaničkog ponašanja bentonitne gline što je u ovom slučaju makroskopski vidljivo promjenama posmične čvrstoće. Marcial et al. (2002) navode da se naveden utjecaj promjena u mikrostrukturi makroskopski mogu vidjeti promjenama nagiba krivulje odnosa koeficijenta hidrauličke provodljivosti i vlažnosti te na krivulji kompresije.

Na temelju rezultata ispitivanja posmične čvrstoće bentonitne gline predlaže se da laboratorijske procedure, kojima bi se omogućila detaljnija karakterizacija bentonitne gline te stvorila mogućnost definiranja korelacijskih veza definiraju na slijedeći način. U prvom koraku bilo bi potrebno provesti ispitivanja kojima bi se prikupili podaci za detaljnu karakterizaciju bentonitne gline. Tu su svakako neophodni mineraloški i kemijski sastav ali i analiza izmjenjivih kationa. Također, poželjno je odrediti i ostala fizikalna svojstva bentonitne gline. U drugom koraku treba definirati karakterističnu krivulju retencije vode bentonitne gline. Nakon toga slijede ispitivanja u uređaju za izravni posmik. Ova faza se može provesti na nekoliko načina. Kako bi se dobio bolji uvid na utjecaj bubrenja na posmičnu čvrstoću neophodno je odabrati što veći raspon normalnih naprezanja pri kojima bi se ispitivanja provela. Poželjno bi bilo nekoliko MPa kako bi se definirao početni dio krivulje kod malih vrijednosti vlažnosti do nekoliko kPa što bi omogućilo definiranje završnog dijela krivulje bubrenja. Smicanja se mogu provesti u više serija, pri čemu se u pojedinim serijama može mijenjati brzina smicanja ili duljina hidratacije. Na ovaj način bi se definiralo više krivulja koje povezuju vlažnost i posmičnu čvrstoću. Njihovom usporedbom te usporedbom sa krivuljom retencije vode detaljno bi se obuhvatio utjecaj usisnih naprezanja, hidratacije i brzine smicanja na čvrstoću. Navedeno se može provesti i na uzorcima tretiranim otopinama različitih kationa čime bi se prikazao utjecaj izmjena međuslojnih kationa na čvrstoću.

## 8 ZAKLJUČCI

Ranijim istraživanjima utvrđeno je da mehanička svojstva glinenih geosintetičkih barijera kao kompozita mineralne i geosintetičke komponente ovise o svojstvima njegovih komponenti, no doprinos svake od njih nije bio detaljno razjašnjen. Glinene geosintetičke barijere se koriste kao hidrauličke barijere u raznim inženjerskim zahvatima, pa je za njih najvažnije svojstvo vodonepropusnost, koju osigurava mineralna komponenta odnosno bentonitna glina. Jednako tako, važna su svojstva kompresibilnost odnosno bubrivost, te posmična čvrstoća.

Svrha ovog istraživanja bila je utvrditi ovisnost mehaničkih svojstava bentonitne gline o pojavi njezina bubrenja. U prvoj fazi istraživanja napravljena je detaljna karakterizacija bentonitne gline određivanjem mineraloškog i kemijskog sastava, fizikalnih svojstava i indeksnih pokazatelja. U drugoj fazi provedena su ispitivanja pojave bubrenja gline edometarskim pokusom, te hidrauličkih i mehaničkih svojstava gline troosnim pokusom i pokusom izravnog smicanja. Sve to omogućilo je u konačnici i definiranje funkcijske povezanost mehaničkih svojstava bentonitne glina i njezinog bubrenja te laboratorijskih procedura za detaljnu karakterizaciju bentonitne gline i određivanje korelacijskih veza između bubrivosti i mehaničkih svojstava bentonitne gline. Detaljna analiza svih eksperimentalnih rezultata omogućit će, također, bolje razumijevanje ponašanja bentonitnih glina i bentonitnih tepiha tijekom njihove upotrebe u raznim inženjerskih zahvatima.

Bentonitna glina pripada skupini bubrivih tala pri čemu sam procesa bubrenja značajno utječe na njena svojstva. Provedeno istraživanje trebalo je povezati proces bubrenja s posmičnom čvrstoćom, konsolidacijskim i hidrauličkim karakteristikama. Poseban naglasak rada je dan na ispitivanja utjecaja bubrenja na posmičnu čvrstoću bentonitne gline. Kako bi se opisao utjecaj bubrenja na posmičnu čvrstoću ispitivanja su provedena u različitim uvjetima opterećenja i hidratacije. Rezultati su analizirani i prezentirani pomoću nekoliko korelacijskih veza kao što su odnos vlažnosti bentonitne gline i posmične čvrstoće, odnos koeficijenta pora i posmične čvrstoće, odnos parametara posmične čvrstoće i duljine hidratacije, te vezom navedenih veličina s karakterističnom krivuljom retencije vode ovog tipa bentonitne gline. Navedeni odnosi prezentirani su u svjetlu pretpostavljenih promjena u mikrostrukturi bentonitne gline tijekom bubrenja. Dodatno su prikazani rezultati ispitivanja konsolidacijskih i hidrauličkih karakteristika bentonitne gline kroz odnos koeficijenta pora i koeficijenta konsolidacije te odnos koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja te njihove analize i diskusija izloženi su u radu, a ovdje se izdvajaju samo najvažniji zaključci.

Karakterizacijom bentonitne gline utvrđeno je da se radi o granulama natrijske bentonitne gline sa 80-85% smektita. Granulometrijski sastav granula pokazao je da su dominantna zrna veličine krupnog pijeska (76,95%). Radi se o visoko plastičnom materijalu (granice tečenje 437,0% i indeksa plastičnosti 383,87%) velike bubrivosti (volumen slobodnog bubrenja 31,0 ml/2 g). Tijekom ispitivanja granica plastičnosti i gustoće čvrstih čestica pokazalo se da je ova vrsta materijala problematična za standardna ispitivanja. Primjerice, samo četvrtina normom preporučene mase suhog uzorka dodavana je u piknometar tijekom ispitivanja obzirom da upotrebom veće mase nije bilo moguće provesti postupak deaeracije suspenzije a time ni ispitivanje.

Odnos koeficijenta hidrauličke provodljivosti (dobivenog izračunom na temelju koeficijenta konsolidacije iz edometra i mjerenjem u troosnoj ćeliji) i koeficijenta pora u polulogaritamskom mjerilu može se aproksimirati pravcem. Također, uzorci koji su bubrili pod opterećenjem (edometar) imaju manje vrijednosti koeficijenata pora i koeficijenata hidrauličke propusnosti u odnosu na uzorke koji su bubrili neopterećeni (troosni).

Koeficijent konsolidacije bentonitne gline općenito se smanjuje povećanjem normalnih napreznja odnosno sa smanjenjem koeficijenta pora. Detaljnijim promatranjem dobivenih vrijednosti koeficijenata konsolidacije može se zaključiti da na koeficijente konsolidacije značajno utječe početno opterećenje i koeficijent pora odnosno uvjeti hidratacije.

Bubrenje bentonitne gline dugotrajan je proces. Pokusi provedeni na uzorku Volclay pokazali su da se završetak primarnog bubrenja postiže nakon 31 dana neovisno o intenzitetu normalnog napreznja. Nakon završetka primarnog bubrenja nastupa faza sekundarne kompresije odnosno puzanje. Veličina bubrenja i sekundarne konsolidacije ovise o normalnom napreznju. Poznavanje procesa bubrenja bentonitne gline od velikog je značaja i sa stanovišta posmične čvrstoće bentonitne gline i glinenih geosintetičkih barijera. Naime, poznato je da brzina posmika utječe na vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće bentonitne gline. Manja brzina smicanja ima za posljedicu ukupno duže ispitivanje (faza hidratacije i posmika) a time i više vremena za dodatnu hidrataciju odnosno bubrenje u slučaju normalnih napreznja manjih od tlaka bubrenja bentonitne gline ili konsolidaciju u slučaju normalnih napreznja većih od tlaka bubrenja. Moguća hidratacija tijekom smicanja ovisiti će o tome, u kojoj se fazi bubrenja nalazi uzorak. Ako je dostignuto potrebno vrijeme

za završetak primarnog bubrenja može se pretpostaviti da će se hidratacija uzorka zaustaviti i da će uzorak nakon toga biti u fazi sekundarne konsolidacije.

Analiza parametara čvrstoće uzoraka hidratiziranih 7, 14 i 21 dana pokazuje da dolazi do smanjenja kohezije s produljenjem hidratacije. Povećanjem hidratacije, nakon 14 dana, intenzitet promjene kohezije se smanjio. Intenzitet promjene rezidualne kohezije u prvih 14 dana hidratacije je veći u odnosu na vršne vrijednosti što se pretpostavlja da je posljedica rasta pornih tlakova tijekom faze posmika.

S povećanjem hidratacije kut trenja se prvo povećava (od 7 do 14 dana). Produljenjem hidratacije, nakon 14 dana, gotovo da više nema promjene vrijednosti kuta trenja. Vrijednosti vršnog i rezidualnog kuta trenja mijenjaju se po gore navedenom obrascu s tim da su vrijednosti rezidualnog kuta trenja nešto manje.

Kod krivulje utjecaja završne vlažnosti na vršnu i rezidualnu posmičnu dolazi do promjene nagiba krivulje kada su vlažnosti manje od 90%. Navedeno odgovara poznatim podacima o promjeni nagiba karakteristične krivulje retencije vode koja se događa u području usisnih naprezanja od 0,4 do 1 MPa odnosno vlažnosti od 60 do 90%. Promjena nagiba krivulje retencije vode i posmične čvrstoće može se povezati s promjenama u mikrostrukturi bentonitne gline. U dijelu krivulje retencije vode koji se odnosi na visoke vrijednosti usisnih naprezanja (iznad 1 MPa) i male vlažnosti (ispod 60%), sa stajališta posmične čvrstoće, pretpostavka je da se bentonitna glina ponaša kao krupnozrni materijal. Ovu pretpostavku potrebno je dodatno istražiti obzirom mali broj dostupnih eksperimentalnih podataka u području vlažnosti manjih od 60%. U područje usisnih naprezanja manjih od 0,4 MPa odnosno kod vlažnosti većih od 90%, može se pretpostaviti prisutnost difuznih slojeva u mikrostrukturi bentonitne gline. Makroskopski to znači da se bentonitna glina ponaša kao koherentan materijal. Promjena vlažnosti ima za posljedicu promjenu usisnih naprezanja što se makroskopski očituje u promjeni kohezije dok kut trenja ostaje isti. Ekstrapolacijom rezultata ispitivanja s literaturnim podacima pretpostavljeno je da odnos promjene vlažnosti i posmične čvrstoće u logaritamskom mjerilu može aproksimirati pravcem u ovom području.

Uočene pojave pri provođenju istraživanja, posebice pokusa izravnog posmika, rezultirale su prijedlogom postupaka za utvrđivanje utjecaja bubrenja na posmičnu čvrstoću bentonitne gline. Za daljnja istraživanja također se preporuča osigurati bolju kontrolu uvjeta tijekom provođenja pokusa, pri čemu se prvenstveno misli na mogućnost razvoja pouzdanog sustava mjerenja vlažnosti tijekom ispitivanja u izravnom posmiku. Ovim bi se osigurala pouzdanija veza posmične čvrstoće i usisnih naprezanja.



Pregledom literature također je utvrđeno da je vjerojatna izmjena međuslojnih kationa u strukturi bentonitne gline pa bi navedena istraživanja trebalo provesti i na bentonitnim glinama gdje je došlo do djelomične ili potpune izmjene kationa natrija na izmjenjivim pozicijama dvovalentnim kationima s ciljem dobivanja potpunijeg uvida u pojavnost bubrenja i utjecaja na posmičnu čvrstoću.

## 9 LITERATURA

- Alther, G., Evans, J., Fang, H. & Witmer, K. (1985): Influence of inorganic permeants upon the permeability of bentonite, Hydraulic barriers in soil and rock, STP 874, Johnson, A., Frobel, R. & Petterson, C. (Eds.), ASTM, 64–73.
- Baddoe, R. A., Take, W. A. & Rowe R. K. (2011): Water-Retention Behavior of Geosynthetic Clay Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 137 (11), 1028-1038.
- Baille, W., Tripathy, S. & Schanz, T. (2010): Swelling pressures and one-dimensional compressibility behaviour of bentonite at large pressures; *Applied Clay Science* 48 (3), 324-333.
- Bargaya, F., Themg, B. K. G. & Lagaly, G. (2006): *Handbook Of Clay Science*, Elsevir.
- Bear, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier, New York.
- Ben Rhaiem, H., Tessier, D., Pons, C.H. & Ben Haj Amara A. (1997): Evolution of the microstructure of interstratified Ca-saturated clays during dehydration: SAXS and HRTEM analysis, *Clay minerals*, 33, 619-628.
- Benson, C. H. & Scalia, J. (2010): Hydraulic conductivity of exhumed geosynthetic clay liners from composite barriers, 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, 15-19 September 2010, Würzburg, Germany, Zanzinger, H., Koerner, R. M. & Touze-Foltz, N. (Eds.), 73-83.
- Bouazza, A. (2002): *Geosynthetic Clay Liners, Geotextiles and Geomembranes* 20, Elsevier Science.
- Chiu, P. & Fox, P. J. (2004): Internal and interface shear strengths of unreinforced and needle-punched geosynthetic clay liners, *Geosynthetics International*, 11, 176-199.
- Dolinar, B. (2010): Predicting the normalized, undrained shear strength of saturated fine-grained soils using plasticity-value correlations, *Applied Clay Science*, 47, 428–432.
- Egloffstein, T. (1994): Properties and test methods to assess bentonite used in geosynthetic clay liners, *Proceedings of an international symposium of geosynthetic clay liners*, Nürnberg, Germany, April 14.-15 1994, 51-72.
- Eid, H. T. & Stark, T. D. (1997): Shear Behavior of an Unreinforced Geosynthetic Clay Liner, *Geosynthetics International*, 4 (6), 645-659.

- Fang, H.Y. & Daniels, J.L. (2005): *Introductory Geotechnical Engineering-An environmental perspective*, Taylor and Francis, New York.
- Faure, G. (1998): *Principles and Applications of Geochemistry*, 2nd edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Fleming, I. R., Rowe, R. K. & Cullimore (1999): Field observations of clogging in a landfill leachate collection system, *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 685–707.
- Fox, P. J. (2006): Discussion of Analysis of a Large Database of GCL Internal Shear Strength Results by Jorge G. Zornberg, John S. McCartney, and Robert H. Swan Jr., *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 1373-1376.
- Fox, P. J. (2010): Internal and interface shear strengths of geosynthetic clay liners, 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, 15-19 September 2010, Würzburg, Germany, Zanzinger, H., Koerner, R. M. & Touze-Foltz, N. (Eds.), 203-218.
- Fox, P. J., Rowland, M. G. & Scheithe, J. R. (1998): Internal shear strength of three geosynthetic clay liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 933-944.
- Francisca, F.M. & Glatstein, D.A. (2010): Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate, *Applied Clay Science*, 49, 187–193.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993): *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979): *Groundwater*, Prentice-Hall, New York.
- Gilbert, R. B., Fernandez, F. F. & Horsfield, D. (1996): Shear strength of a reinforced. clay liner, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 122(4), 259-266.
- Gilbert, R. B., Scranton, H. B. & Daniel, D. E. (1997): Shear Strength Testing for Geosynthetic Clay Liners, *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners*, L. Well, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 121-138.
- Gleason, M., Daniel, D. E. & Eykholt, G. R. (1997): Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123 (5), 438–445.
- Grim, R. E. (1962): *Clay mineralogy*, McGraw-Hill, New York.

- Guven, N. (1992): Molecular aspects of clay-water interactions, In: Clay-Water Interface and Its Rheological Implications, Guven N. & Pollastro R. M. (Eds.), CMS workshop lectures, Vol. 4, Clay Minerals Society, Boulder, CO, pp. 2–79.
- Guyonnet, D., Touze Foltz, N., Norotte, V., Pothier, C., Didier, G., Gailhanou, H., Blanc, P. & Warmont, F. (2009): Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications; *Geotextiles and Geomembranes* 27, 321–331.
- Halle, R. (2004): *Kemizam i obradba vode*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Hetzel, F., Tessier, D., Jaunet, A-M. & Donerthe, H. (1994): Microstructure of three Na<sup>+</sup> smectites: the importance of particle geometry on dehydration and rehydration, *Clays and Clay Minerals*, 42, 3, 242-248.
- Hewitt, R. D., Soydemir, C., Stulgis, R. P. & Coombs, M. T. (1997): Effect of Normal Stress During Hydration and Shear on the Shear Strength of GCL/Textured Geomembrane Interfaces, Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, ASTM STP 1308, Well, L. W. (Ed.), ASTM International, West Conshohocken, 55-70.
- Holtz R. D. & Kovacs W. D. (1981): *Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, New York.
- Jo, H., Benson, C. H., Shackelford, C. D., Lee, J. & Edil, T. B. (2005): Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner (GCL) permeated with inorganic salt solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131 (4), 405–417.
- Jo, H., Katsumi, T., Benson, C. H. & Edil, T. B. (2001): Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs with single-species salt solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127, 557–567.
- Kang, J.B. & Shackelford, C.D. (2010): Consolidation of a Geosynthetic Clay Liner under Isotropic States of Stress; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 136(1), 253–259.
- Karland, O. (1998): Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions - Correlation of model calculations to experimentally determined data, Posiva 98-01, Lund, Sweden.
- Karland, O. (2010): Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository, Technical Report, TR-10-60, SKB, Stockholm.

- Kavur, B. (2009): Utjecaj sušenja na ponašanje bubre stijene, Doktorska disertacija.
- Kodikara, J.K. & Rahman F. (2002): Effects of specimen consolidation on the laboratory hydraulic conductivity measurement; *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4): 908–923.
- Koerner R. M. & Koerner G. R. (1995): *Leachate Clogging Assessment Of Geotextile and Soil Landfill Filters*, EPA.
- Kolstad, D., Benson, C. H. & Edil, T. E. (2004): Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated GCLs permeated with multi-species inorganic solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130 (2), 1236–1249.
- Kovačević Zelić, B. (2000): Ispitivanje posmične čvrstoće bentonitnih tepiha, Doktorska disertacija, RGN-fakultet, Zagreb.
- Kumpulainen, S. & Kiviranta L. (2010): Mineralogical and Chemical Characterization of Various Bentonite and Smectite-Rich Clay Materials, Working Report 2010-52, Posiva Oy, Okiluoto.
- Lai, J., Daniel, D. E. & Wright, S. G. (1998): Effects of Cyclic loading on internal shear strength of unreinforced geosynthetic clay liner, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 45-52.
- Lee, J. & Shackelford, C. D. (2005): Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131 (1), 64–77.
- Lin, L. C. & Benson, C. H. (2000): Effect of wet dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (1), 40–49.
- Lu, N. & Likos, W. J. (2004): *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, New York.
- Marcial D., Delage P. & Cui Y. C. (2002): On the high stress compression of bentonites, *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 812–820.
- Mathers, A. C., Weed, S. B. & Coleman, N. T. (1955): The effect of acid and heat treatment on montmorillonids, *Proceedings of the 3rd Conference on clays and clay minerals*, October 26-29. 1954, Milligan, W.O. (Ed.), National Academy of Sciences, 403–413.
- McBride, M. B. (1994): *Environmental Chemistry of Soils*, Oxford University Press, New York, Oxford.

- McCartney, J. S., Zornberg, J. G. & Swan R. H. (2002): Internal and Interface Shear Strength of Geosynthetic Clay Liners (GCLs): Additional Data, A report submitted to the Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering University of Colorado at Boulder, Colorado, Boulder.
- McNeil, B.L. & Coleman, N.T. (1966): Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity, *Soil Science Society of America Journal*, 30, 308–312.
- Mesri, G. & Olson, R. E. (1971): Mechanisms controlling the permeability of clays, *Clays & Clay Minerals*, 19, 151-158.
- Mitchell J. K. & Soga K. (2005): *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley and Sons, New York.
- Montes-Hernandez, G. (2002): G. Étude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie électronique à balayage environnementale (ESEM) et l'analyse digitale d'images, PhD Thesis, Strasbourg, Université Louis Pasteur (in French).
- Murray, H. H. (2007): *Applied Clay Mineralogy*, Elsevier.
- Petrov, R. J. & Rowe, R. K. (1997): Geosynthetic clay liner (GCL) - chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance, *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 863-885.
- Petrov, R. J., Rowe, R. & Quigley, R. M. (1997): Selected Factors Influencing GCL Hydraulic Conductivity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 123 (8), 683–695.
- Pusch, R. & Schomburg, J. (1999): Impact of microstructure on the hydraulic conductivity of undisturbed and artificially prepared smectitic clay, *Engineering Geology*, 54, 167-172.
- Pusch, R. (2001): The microstructure of MX-80 clay with respect to its bulk physical properties under different environmental conditions, TR-01-08, SKB, Stockholm Sweden.
- Rosin-Paumier, S. & Touze-Foltz, N. (2012): Hydraulic and chemical evolution of GCLs during filter press and oedopermeametric tests performed with real leachate, *Geotextiles and Geomembranes*, 33, 15-24.
- Rosin-Paumier, S., Touze-Foltz, N., Pantet, A., Monnet, P., Didier, G., Guyonnet, D. & Morotte, V. (2010): Swell index, oedopermeametric, filter press and rheometric tests for

- identifying the qualification of bentonites used in GCLs, *Geosynthetics International* 17 (1), 1-11.
- Rowe R. K. (1998): From the past to the future of landfill engineering through case histories, 4<sup>th</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, March 9-12, 146-166.
- Ruhl, J. L. & Daniel, D. E. (1997): 'Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(4), 369–381.
- Schulze, D. G. (1989): An Introduction to Soil Mineralogy, Dixon, J. B. & Weed, S. B. (Eds.), In *Minerals in Soil Environments*, Madison, WI, Soil Science Society of America, pp. 1-34.
- Shackelford, C. D. (1994): Waste Soil Interactions that alter Hydraulic Conductivity, In *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport*, ASTM, STP 1142, Daniel D. E. & Trautwein S.J. (Eds.), ASTM, West Conshohocken, Pa., pp. 111-168.
- Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B. & Lin, L. (2000): Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids, *Geotextiles and Geomembranes*, 18 (2–4), 133–162.
- Shackelford, C. D., Sevick, G. W. & Eykhol, G. R. (2010): Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids, *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 133–162.
- Southen J. M. & Rowe R. K. (2005): Modelling of thermally induced desiccation of geosynthetic clay liners, *Geotextiles and Geomembranes*, 23, 425–442.
- Sposito G., Skipper N. T., Sutton R., Park S. H., Soper A. K. & Greathouse J. A. (1999): Surface geochemistry of the clay minerals, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96, 3358–3364.
- Sposito, G. (2008): *The Chemistry of Soils*, Oxford University Press, Oxford, London.
- Stark, T. D. & Eid, H. T. (1994): Drained Residual Strength of Cohesive Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120, 856-871.

- Suzuki, M., Tsuzuki, S. & Yamamoto, T. (2005): Physical and Chemical Index Properties of Residual Strength of Various Soils, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Yamaguchi University*, 56, 1-11.
- Suzuki, M., Tsuzuki, S. & Yamamoto, T. (2005): Physical and Chemical Index Properties of Residual Strength of Various Soils, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Yamaguchi University*, 56, 1-11.
- Thiel, R. S. & Criley, K. (2005): Hydraulic conductivity of partially prehydrated GCLs under high effective confining stress for three real leachates, *Waste containment and remediation, GSP 142, ASCE, Austin, Texas*, 1-11.
- Tiwari, B. & Marui, H. (2005): A New Method for the Correlation of Residual Shear Strength of the Soil with Mineralogical Composition, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, 1139-1150.
- Touze-Foltz, N., Croissant, D., Rosin-Paumier, S., Pirrion, T. & Ouvry, J. F. (2010): Performance of a GCL in a landfill cover after six years in service, 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, 15-19 September 2010, Würzburg, Germany, Zanzinger, H., Koerner, R. M. & Touze-Foltz, N. (Eds.), 83-93.
- Vees, E. & Winterkorn, H.F. (1967): Engineering properties of several pure clays as functions of mineral type, exchange ions and phase composition, *Highway Research Record*, 209, 55-65.
- Wang, Q., Tang, A.M., Cui, Y., Delage, P. & Gatmiri, B. (2012): Experimental study on the swelling behaviour of bentonite/claystone mixture, *Engineering Geology*, 124, 59-66.
- Yong, R. N. (1999): Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers, *Engineering Geology* 54, 3-13.
- Zornberg, J. G. & McCartney, J. S. (2009): Chapter 8: Internal and interface shear strength of geosynthetic clay liners, In: *Geosynthetic Clay Liners for Waste Containment*, Bouazza, A. & Bowers, J. J. (Eds), CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida.
- Zornberg, J. G., McCartney, J. S. & Swan Jr., R. H. (2005): Analysis of a large database of GCL internal shear strength results, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(3), 367–380.



ASTM D 422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

ASTM D 854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.

ASTM D 2435: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.

ASTM D 5084: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.

ASTM D 5890: Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners.

ASTM D 5891: Standard Test Method for Fluid Loss of Clay Component of Geosynthetic Clay Liners.

ASTM D 6766: Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions.

ASTM D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

ASTM D6243: Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method.

BS 1377, Part 2: Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests

BS EN ISO 14688-1: Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description.

DIN 18132: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.

GRI-GCL5: Standard Guide for Design Considerations for Geosynthetic Clay Liners (GCLs) in Various Applications.

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1 Shematski prikaz $\text{SiO}_4$ -tetraedar - lijevo i mreža $\text{SiO}_4$ -tetraedara - desno (Murray 2007) .....	6
Slika 2-2 Shematski prikaz Al-oktaedra - lijevo i mreža Al-oktaedara - desno (Murray 2007).....	6
Slika 2-3 Struktura minerala glina a) jedinični sloj, b) čestice, c) nakupinu čestica s mikroporama, d) povezivanje nakupina čestica s makroporama (Bargaya et al. 2006) .....	8
Slika 2-4 Tromrežna 2:1 struktura smektita .....	9
Slika 2-5 Struktura montmorillonita (Murray 2007) .....	10
Slika 2-6 Raspodjela naboja u montmorillonitu (Mitchell & Soga 2005).....	11
Slika 2-7 Tri mehanizma adsorpcije kationa na površinu minerala glina (montmorillonit) (Sposito et al. 1999).....	12
Slika 2-8 Difuzni dvostruki sloj u montmorillonitu predložen, prema Guven, 1992 (gore). Dolje na slici vidljivo je smanjenje površinskog potencijala s udaljavanjem od površine čestice.....	15
Slika 2-9 Načini spajanja bentonitne gline i geotekstila .....	19
Slika 2-10 Vršne vrijednosti posmične čvrstoće suhих i hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim normalnim napreanjima (modificirano iz Chiu & Fox, 2004).....	29
Slika 2-11 Rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće suhих i hidratiziranih nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim normalnim napreanjima (modificirano iz Chiu & Fox 2004) .....	30
Slika 2-12 Vrijednosti horizontalnih pomaka kod sloma za nearmirane glinene geosintetičke barijere pri različitim normalnim napreanjima (modificirano iz Chiu & Fox 2004) .....	30
Slika 2-13 Rezultati smicanja za različite vrste glinenih geosintetičkih barijera. Brzina posmika 0,1 mm/min (Fox et al. 1998).....	32
Slika 2-14 Karakteristična krivulja retencije vode glinene geosintetičke barijere (Southen & Rowe 2005).....	36
Slika 2-15 Posmične čvrstoće i završne vlažnosti nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera pri različitim normalnim napreanjima (modificirano iz Fox et al. 1998).....	37
Slika 2-16 Režimi toka kroz porozni medij (Freeze & Cherry 1979) .....	40
Slika 2-17 Odnos koeficijenta pora i koeficijenta hidrauličke provodljivosti različitih vrsta bentonitnih glina (Vees & Winterkorn 1967) .....	42
Slika 2-18 Utjecaj naboja kationa na volumen slobodnog bubrenja bentonitne gline (Jo et al. 2001)..	45

---

Slika 2-19 Utjecaj koncentracije otopine $\text{CaCl}_2$ na granicu tečenja bentonitne gline (Lee & Shackelford 2005).....	47
Slika 2-20 Utjecaj pH otopine na koeficijent hidrauličke provodljivosti i volumen bubrenja (Jo et al. 2001).....	48
Slika 2-21 Vrijednosti hidrauličke provodljivosti glinene geosintetičke barijere pri različitim vrijednostima efektivnih naprezanja (Thiel & Criley 2005).....	52
Slika 2-22 Djelovanje otopine etanola na koeficijent hidrauličke provodljivosti. Vrijednosti su dobivene kod normalnog naprezanja od 35 kPa (Petrov et al. 1997) .....	58
Slika 2-23 Utjecaj postupka hidratacije na završni koeficijent pora glinenih geosintetičkih barijera sa i bez armaturnih niti (Petrov & Rowe 1997) .....	62
Slika 2-24 Odnos hidrauličke provodljivosti bentonitne gline s različitim koncentracijama otopina soli NaCl i koeficijenta pora.....	63
Slika 2-25 Odnos hidrauličke provodljivosti bentonitne gline i koncentracije otopine NaCl za različite vrijednosti završnog koeficijenta pora (Petrov & Rowe 1997) .....	64
Slika 2-26 Funkcijska veza rezidualnog kuta trenja i granice tečenje dobivena na temelju 145 uzoraka tla smektitima kao dominantnim mineralom (Suzuki et al. 2005).....	67
Slika 2-27 Karakteristične krivulje retencije vode dvije vrste bentonitne gline (Marcial et al. 2002)..	69
Slika 2-28 Konceptualni model ponašanja bubrive stijene (modificirano iz Kavur 2009) .....	71
Slika 3-1 Difrakcijske linije originalnog, netretiranog uzoraka .....	76
Slika 3-2 Granulometrijska krivulja granula bentonitne gline .....	81
Slika 3-3 Dijagram plastičnosti (modificirano Holtz & Kovacs 1981).....	83
Slika 3-4 Određivanje granice tečenja.....	85
Slika 3-5 Klasifikacija bentonitne gline .....	85
Slika 3-6 Vremenske krivulje upijanja vode bentonitne gline .....	87
Slika 4-1 Troosna ćelija.....	92
Slika 4-2 Uzorak pripremljen za ugradnju u troosnu ćeliju.....	92
Slika 4-3 Saturacija uzorka u troosnoj ćeliji.....	93
Slika 4-4 Promjena obujma uzorka u logaritamskom mjerilu vremena .....	94
Slika 4-5 Promjena obujma uzorka u ovisnosti o $t$ .....	94
Slika 4-6 Ovisnost koeficijenta pora o efektivnim naprezanjima.....	98

---

Slika 4-7 Ovisnost koeficijenta izotropne konsolidacije o koeficijentu pora.....	98
Slika 4-8 Ovisnost koeficijenta izotropne konsolidacije o efektivnim napreznjima .....	99
Slika 4-9 Ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti o efektivnim napreznjima .....	99
Slika 4-10 Ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti o koeficijentu pora.....	100
Slika 5-1 Poprečni presjek edometarske ćelije.....	102
Slika 5-2 Promjene visine uzoraka u logaritamskom mjerilu vremena.....	103
Slika 5-3 Promjene visine uzoraka u ovisnosti o $t$ .....	103
Slika 5-4 Prikaz vremena potrebnog za završetak primarnog bubrenja .....	104
Slika 5-5 Promjena visine uzorka II-1 u vremenu.....	107
Slika 5-6 Promjena visine uzorka II-1 u odnosu na $t$ .....	108
Slika 5-7 Promjena visine uzorka II-2 u vremenu.....	108
Slika 5-8 Promjena visine uzorka II-2 u odnosu na $t$ .....	109
Slika 5-9 Promjena visine uzorka II-3 u vremenu.....	109
Slika 5-10 Promjena visine uzorka II-3 u odnosu na $t$ .....	110
Slika 5-11 Ovisnost koeficijenta pora o normalnim efektivnim napreznjima .....	111
Slika 5-12 Istiskivanje uzorka iz edometarske ćelije .....	114
Slika 5-13 Uzorak nakon ispitivanja .....	114
Slika 5-14 Ovisnost koeficijenta konsolidacije prema Casagrandeu o koeficijentu pora .....	115
Slika 5-15 Ovisnost koeficijenta konsolidacije o efektivnim normalnim napreznjima.....	115
Slika 5-16 Ovisnost koeficijenta hidrauličke provodljivosti o koeficijentu pora.....	116
Slika 6-1 Poprečni presjek uređaja za smicanje .....	118
Slika 6-2 Reprezentativni uzorak bentonitne gline u formi granula.....	119
Slika 6-3 Promjene visine uzoraka tijekom hidratacije uz normalno napreznje $\sigma_n = 50$ kPa.....	120
Slika 6-4 Promjene visine uzoraka tijekom hidratacije uz normalno napreznje $\sigma_n = 100$ kPa.....	121
Slika 6-5 Promjene visine uzoraka tijekom hidratacije uz normalno napreznje $\sigma_n = 200$ kPa.....	121
Slika 6-6 Ovisnost posmične čvrstoće o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim napreznjem od 50 kPa.....	122

---

Slika 6-7 Ovisnost vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 50 kPa.....	122
Slika 6-8 Ovisnost posmične čvrstoće o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 100 kPa.....	123
Slika 6-9 Ovisnost vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 100 kPa.....	123
Slika 6-10 Ovisnost posmične čvrstoće o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 200 kPa .....	124
Slika 6-11 Ovisnost vertikalnih pomaka o horizontalnim pomacima kod uzoraka opterećenih normalnim naprežanjem od 200 kPa .....	124
Slika 6-12 Anvelope sloma za uzorke hidratizirane 7 dana .....	127
Slika 6-13 Anvelope sloma za uzorke hidratizirane 14 dana .....	127
Slika 6-14 Anvelope sloma za uzorke hidratizirane 21 dan .....	128
Slika 6-15 Anvelope sloma za vršnu čvrstoću .....	129
Slika 6-16 Anvelope sloma za rezidualnu čvrstoću .....	130
Slika 6-17 Utjecaj završne vlažnosti na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću.....	130
Slika 6-18 Utjecaj koeficijenta pora na vršnu i rezidualnu posmičnu čvrstoću .....	131
Slika 6-19 Ovisnost koeficijenta pora nakon hidratacije o normalnom naprežanju .....	131
Slika 6-20 Ovisnost završne vlažnosti o normalnom naprežanju.....	132
Slika 6-21 Ovisnost kuta trenja o duljini hidratacije .....	133
Slika 6-22 Ovisnost kohezije o duljini hidratacije .....	133
Slika 6-23 Ovisnost normaliziranog kuta trenja o duljini hidratacije.....	134
Slika 6-24 Ovisnost normalizirane kohezije o duljini hidratacije .....	134
Slika 7-1 Proces bubrenja bentonitne gline .....	137
Slika 7-2 Utjecaj koeficijenta pora na koeficijente konsolidacije .....	138
Slika 7-3 Utjecaj koeficijenta pora na koeficijente hidrauličke provodljivosti .....	138
Slika 7-4 Prikaz utjecaja vlažnosti na usisna naprežanja i posmičnu čvrstoću .....	140
Slika 7-5 Prikaz utjecaja vlažnosti na usisna naprežanja i posmičnu čvrstoću – detalj A.....	140

---

Slika 7-6 Prikaz utjecaja vlažnosti na usisna naprežanja i posmičnu čvrstoću natrijskog montmorillonita .....	141
Slika 7-7 Utjecaj duljine hidratacije na kut trenja .....	142
Slika 7-8 Utjecaj duljine hidratacije na koheziju .....	143

**POPIS TABLICA**

Tablica 2-1 Osnovne karakteristike minerala glina (Mitchell & Soga 2005).....	8
Tablica 2-2 Ionski radijusi u suhom i hidratiziranom stanju.....	12
Tablica 2-3 Vrijednosti dielektričnih konstanti za različita otapala pri različitim temperaturama .....	16
Tablica 2-4 Literaturni podaci o posmičnoj čvrstoći nearmiranih glinenih geosintetičkih barijera.....	26
Tablica 2-5 Vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti kod različitih koncentracije otopina soli jednovalentnih kationa (Jo et al. 2001).....	46
Tablica 2-6 Rezultati ispitivanja bubrenja u edometru (Hewitt et al. 1997; Petrov et al. 1997; Kovačević Zelić 2000).....	57
Tablica 3-1 Rezultati rendgenske difrakcije uzoraka Volclay i Volclay MX 80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010).....	74
Tablica 3-2 Rendgenografski podaci za bentonitnu glinu.....	75
Tablica 3-3 Literaturni podaci o kemijskim analizama na uzorcima Volclay i Volclay MX80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010 i Montes-Hernandez 2002).....	77
Tablica 3-4 Predložena strukturna formula smektita za uzorke Volclay i Volclay MX 80 (Kumpulainen & Kiviranta 2010).....	77
Tablica 3-5 Rezultati kemijske analize bentonitne gline.....	78
Tablica 3-6 Rezultati sisanja granula bentonitne gline.....	80
Tablica 3-7 Mjerenja gustoće čvrstih čestica bentonitne gline.....	82
Tablica 3-8 Rezultati ispitivanja granice tečenja i granice plastičnosti.....	84
Tablica 3-9 Određivanje volumena slobodnog bubrenja.....	86
Tablica 3-10 Rezultati ispitivanja sposobnosti upijanja vode .....	87
Tablica 3-11 Rezultati ispitivanja gubitka fluida bentonitne gline.....	88
Tablica 4-1 Program ispitivanja u troosnj ćeliji .....	91
Tablica 4-2 Početne karakteristike uzorka .....	93
Tablica 4-3 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije .....	96
Tablica 4-4 Rezultati ispitivanja hidrauličke provodljivosti .....	97
Tablica 5-1 Program ispitivanja u edometru .....	101
Tablica 5-2 Početne karakteristike uzoraka.....	106

---

Tablica 5-3 Rezultati pokusa bubrenja .....	106
Tablica 5-4 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti za uzorak II-1 .....	112
Tablica 5-5 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti za uzorak II-2 .....	112
Tablica 5-6 Rezultati proračuna koeficijenta konsolidacije i koeficijenta hidrauličke provodljivosti za uzorak II-3 .....	113
Tablica 6-1 Program ispitivanja u uređaju za izravni posmik .....	119
Tablica 6-2 Početne karakteristike uzoraka.....	125
Tablica 6-3 Rezultati faze hidratacije.....	126
Tablica 6-4 Rezultati faze smicanja .....	126
Tablica 6-5 Parametri posmične čvrstoće bentonitne gline.....	128



**KAZALO OZNAKA**

$\mu$  - dinamički viskozitet fluida ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )

$\rho$  - gustoća fluida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\alpha$  - ravnina dipolnih molekula vode uz samu površinu minerala

$\beta$  - ravnina hidratiziranih kationa najbliža površini minerala

$\zeta$  - ravnina koja razdvaja difuzni sloj i slobodnu vodu

$\epsilon_0$  - permitivnost vakuumu ( $8,8542 \times 10^{-12}$  F/m)

$\Psi_0$  - površinski potencijal

$\Psi_D$  - vrijednost površinskog potencijala na udaljenosti ravnine  $D$  od površine minerala

$\epsilon_r$  - relativna permitivnost otapala

$\gamma_w$  - zapreminska težina vode ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )

$1/\chi$  - debljina difuznog dvostrukog sloja

$A$  - površina poprečnog presjeka okomito na smjer toka vode ( $\text{m}^2$ )

$c$  - bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke medija (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pora)

$c_c$  - koeficijent zakrivljenosti

$c_D$  - ukupna koncentracija dvovalentnih kationa u otopini

$c_i$  - koncentracija pojedine vrste iona u otopini ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )

$c_M$  - ukupna koncentracija monovalentnih kationa u otopini

$c_s$  - indeks bubrenja

$c_u$  - koeficijent jednoličnosti

$c_v$  - koeficijent konsolidacije ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$c_{vi}$  - koeficijent izotropne konsolidacije

$d$  - promjer pora kroz koju fluid prolazi (m)

$d$  - prosječni put dreniranja u određenom ciklusu opterećenja (mm)

$D$  - ravnina gdje počinje difuzni sloj

$dh$  – promjena potencijala (m)

$dx$  - promatrani put (m)

$e$  – jedinični naboj ( $1,60217733 \times 10^{-19}$  C)

$E_{oed}$  – edometarski modul (MPa)

$g$  - akceleraciju sile teže (  $m/s^2$ )

$i$  - hidraulički gradijent

$I_p$  - Indeks plastičnosti

$k$  – Boltzmannova konstanta ( $1,380658 \times 10^{-23}$  J/°K)

$K$  - *intristic permittivity* ili *permittivity* (permitivnost) ( $m^2$ )

$k$  - koeficijent hidrauličke provodljivosti (m/s)

$k_{oed}$  - koeficijent hidrauličke provodljivosti (m/s)

$m_{pw,t}$  - masa piknometra napunjenog vodom

$m_{pws,t}$  - masa piknometra s uzorkom i vodom

$m_s$  - masa suhog uzorka

$M_v$  - modul stišljivosti

$N$  - Avogadrov broj ( $6,0221367 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>)

$Q$  - količine toka (m<sup>3</sup>/s)

$Re$  - Reynoldsov broj

$T$  – apsolutna temperatura (°K)

$t_{50}$  – vrijeme potrebno za ostvarenje 90% primarne konsolidacije (min)

$t_{90}$  – vrijeme potrebno za ostvarenje 50% primarne konsolidacije (min)

$v$  - Darcyevu brzinu toka (m/s)

$v_s$  - stvarna brzina toka (m/s)

$w_L$  - granica tečenja

$w_P$  - granice plastičnosti.

$z_i$  – naboj iona

$\rho_{w,t}$  - gustoća vode

$\delta_v$  - vertikalni pomak

$\delta_h$  - horizontalni pomak

$T$  - posmična sila

$P$  - normalna odnosno vertikalna sila

$\sigma_n$  - normalno naprezanje

## **KAZALO KRATICA**

CEC – Cation Exchange Capacity (sposobnost ionske izmjene)

EGME - etilenglikol monoetiletera

GBR-C - *Clay Geosynthetic Barrier* (geosintetičke barijere ili *Geosynthetic Clay Liner*, skraćeno *GCL*)

GBR-P - *Polymeric Geosynthetic Barrier* (polimerna geosintetička barijera )

ICP-OES - induktivno spregnuta plazmena emisijska spektrometrija

LOI - gubitak žarenjem

WRC - water retention curve (karakteristična krivulja retencije vode)

**ŽIVOTOPIS:**

Rođen 13. travnja 1976. godine u Zagrebu. Osnovnu školu i Prirodoslovnu školu Vladimira Preloga pohađao u Zagrebu. Od 1995-2002. studirao na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu te stekao zvanje: Diplomirani inženjer rudarstva, smjer Geotehnika. Tijekom studija nagrađen Rektorovom nagradom (2001.). Poslijediplomski studij upisao 2004. godine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Od 01. rujna 2004. zaposlen kao znanstveni novak na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Od 01. studenog 2010. do danas zaposlen kao asistent na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Tijekom poslijediplomskog studija i rada kao znanstveni novak učestvovao u izvođenju vježbi iz predmeta Mehanika tla i Poboljšanje svojstava tla i stijena na starom diplomskom studiju. Trenutno sudjeluje u izvođenju nastave iz predmeta: Mehanika tla, Mehanika tla 1 i Mehanika tla 2.

Do sada kao suradnik učestvovao na dva znanstvena projekta financirana od MZOŠ:

- „Ispitivanje trajnosti mineralnih brtvenih barijera“, Rudarsko-geološko-naftni fakultet (voditelj: Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić) i
- „Mogućnosti proizvodnje i uporabe bentonitnih tepiha u Hrvatskoj“, Rudarsko-geološko-naftni fakultet (voditelj: Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić)

te na jednom međunarodnom znanstvenom projektu:

- „Mitigation of the Earthquake Effects in Towns and in Industrial Regional Districts“ (MEETING) – INTERREG/CARDS-PHARE PROJECT.

Pod pokroviteljstvom IAEA (International Atomic Energy Association) 2009. sudjelovao na desetodnevnom seminaru pod nazivom Regional Training Course on Fundamentals of Geological Disposal in Sedimentary Environments održanom u Peineu, Njemačka te 2010. na petodnevnom seminaru pod nazivom Regional Training Course on Fundamentals of Geological Disposal: From R&D to Safety Case Development održanom u Molu, Belgija.

Član društava:

- Hrvatskog geotehničkog društva (HGD)
- ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)
- Udruga hrvatskih rudarskih inženjera.

## Popis objavljenih radova:

1. Domitrović, Dubravko; Vučenović, Helena; Kovačević Zelić, Biljana (2012): Ispitivanje svojstava bentonita kao inženjerske barijere u odlagalištima radioaktivnog otpada, Rudarsko-geološki-naftni zbornik, 24; 19-27.
2. Strgar, Helena; Domitrović, Dubravko; Kovačević Zelić, Biljana (2011): Utjecaj temperature i relativne vlažnosti u laboratoriju na ispitivanje kapaciteta upijanja vode, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 23; 67-76.
3. Kvasnička, Predrag; Domitrović, Dubravko; Kovačević-Zelić, Biljana (2010): Design and practice of reinforced earth walls along the highway in the Croatian karst region; Proceedings of the 1st International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2010), Hrvatska, Opatija, 17-18.05.2010.; Lakusic, S. (ur.), Zagreb, Sveučilište u Zagrebu.
4. Kvasnička, Predrag; Domitrović, Dubravko; Marohnić, Marinko; Brunetta, Ivanka (2009): Examples of reinforced earth walls along the highway Split-Ploče; Proceedings of the regional symposium of the ISRM (EUROCK 2009): Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rocks and Karst, Hrvatska, Cavtat, 29-31.10.2009.; Vrkljan, I. (ur.), Leiden, CRC Press/Balkema, 793-796.
5. Kovačević Zelić, Biljana; Strgar, Helena; Kosić, Danijela; Domitrović, Dubravko (2009): Ispitivanja bentonitnih glina za potrebe proizvodnje geosintetičkih glinenih barijera; Zbornik radova 5. savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva: Izvori rizika u geotehničkim zahvatima, Osijek, 20-21.05.2009.; Mulabdić, M. (ur.), Osijek, Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.
6. Veinović, Želimir; Kovačević Zelić, Biljana; Kvasnička, Predrag; Domitrović, Dubravko (2008): Assessment of liquefaction potential of the Sava river plain near Zagreb; Proceedings of the International Geotechnical Conference: Development of Urban Areas and Geotechnical Engineering, Rusija, Petrograd, 16-19.6.2008.; Ulitsky, V.M., Kovalev, V.I. (ur.), Petrograd, Saint Petersburg State Transport University.
7. Veinović, Želimir; Kvasnička, Predrag; Domitrović, Dubravko (2008): Preparatory works for liquefaction microzonation in Croatia; Proceedings of the 2nd MEETING workshop: Strategies for reduction of the seismic risk, Italija, Termoli, 12-15.07.2008.; Fabbrocino, G ; Santucci de Magistris, F. (ur.), Termoli, StreGa, 45-50.
8. Kovačević Zelić, Biljana; Domitrović, Dubravko; Blažević, Mišo (2008): Permeability testing of geosynthetic clay liners; Mineralogia - Special papers, 4th Mid-European Clay

- Conference (MECC 08), Poljska, Zakopane, 22-27.9.2008.; Skowronski, A. (ur.), Zakopane, Visegrad Found, AGH University of Science and Technology, Polish Oil and Gas Company, Volume 33, 88-88.
9. Kovačević Zelić, Biljana; Domitrović, Dubravko; Veinović, Želimir (2007): Laboratorijska ispitivanja bentonitnih glina za potrebe projektiranja i izgradnje odlagališta; Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 19, 99-110.
  10. Veinović, Želimir; Domitrović, Dubravko; Lovrić, Tihomir (2007): Pojava likvefakcije na području Zagreba u prošlosti i procjena mogućnosti ponovne pojave tijekom jačeg potresa; Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 19, 111-120.
  11. Domitrović, Dubravko; Kovačević Zelić, Biljana (2007): Prva iskustva e-učenja na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu; Zbornik radova, 30. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku (MIPRO 2007): Computers in education, Hrvatska, Opatija, 21-25.05.2007.; Čičin - Šain, M.; Turčić Prstačić, I.; Sluganović, I. (ur.), Rijeka, Studio Hofbauer, 54-58.
  12. Kovačević Zelić, Biljana; Domitrović, Dubravko; Kovačić, Davorin; Matešić, Leo; Veličković, Branimir (2006): Behavior of GCL mineral component treated with site-specific liquid; Proceedings of the XIIIth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Slovenija, Ljubljana, 29-31.05.2006.; Logar, J., Gaberc, A., Majes B. (ur.), Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo, 281-286.
  13. Domitrović, Dubravko; Kovačević Zelić, Biljana; Veinović, Želimir (2006): Laboratorijsko ispitivanje utjecaja eluata na mineralnu komponentu bentonitnih tepiha; Zbornik radova IX. međunarodnog simpozija Gospodarenje otpadom – Zagreb 2006, Hrvatska, Zagreb, 15.-18.11.2006.; Milanović Z. (ur.), Zagreb, gospodarstvo i okoliš, 887-896.
  14. Kovačević Zelić, Biljana; Domitrović, Dubravko; Mileusnić, Marta; Tadej, Neven (2006): Chemical compatibility of GCL mineral component to site-specific liquid; Abstracts Book of the 3rd Mid-European Clay Conference (MECC 06), Hrvatska, Opatija, 18-23.09.2006.; Vlahović, I., Tibljaš, D., Durn, G., Biševac, V. (ur.), Zagreb, Faculty of Science and Faculty of Mining, Geology and petroleum Engineering, 70-70.
  15. Kovačević Zelić, Biljana; Kvasnička, Predrag; Domitrović, Dubravko (2002): Stability analysis for the landfill Jakusevec; Proceedings of the 12th Danube-European Conference: Geotechnical Engineering, Njemačka, Pasau, 27-28.05.2002.; Wittke, W. (ur.), Essen, VGE-Verlag Gluckauf GmbH, 503-506.