

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

ZAHVALA

Z veliko začetnico se za pomoč in vse koristne napotke zahvaljujem mentorju, prof. dr. Janku Logarju, ki me je že tekom predavanj pritegnil k izdelavi naloge pod svojim okriljem. Zahvala gre tudi somentorici, asist. dr. Jasni Smolar, za strpno in strokovno vodenje tekom opravljanja laboratorijskih preiskav in med pisanjem zaključnega dela.

Zahvala gre tudi vsem zaposlenim na Katedri za geotehniko na UL FGG, ki so mi priskočili na pomoč pri preiskavah.

Ne gre pozabiti na vse prijatelje in kolege, ki so me vztrajno spodbujali in bodrili od začetka pa do konca.

Hvala tudi družini in vse bližnjim, ki so me spremljali z veliko mero potrpežljivosti in podpore.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.13:666.322-047.44(043.2)
Avtor: Lucija Babij
Mentor: prof. dr. Janko Logar
Somentor: asist. dr. Jasna Smolar
Naslov: Vpliv pH in soli v vodi na lastnosti bentonita
Tip dokumenta: diplomska naloga
Obseg in oprema: 34 str., 4 pregl., 43 sl., 1 en., 23 virov
Ključne besede: bentonit, geotehnika okolja, meja židkosti, nedrenirana strižna trdnost, reološke lastnosti, nabrekanje

Izvleček

Zaradi inertnosti in svojih značilnih lastnosti je bentonit vse pogostejše uporabljen naravni proizvod v geotehniki in geotehniki okolja. Uporablja se pri izkopih jarkov, v predorogradnji, za injektiranje razpok v temeljnih tleh, za tesnjenje deponij, remediacije onesnaženih tal, idr. Izstopajoče in za stroko pomembne lastnosti tega materiala so: nedrenirana strižna trdnost, viskoznost, nabrekalni potencial, tiksotropija, sposobnost vezanja določenih polutantov in nizka vodoprepustnost. Prve tri smo podrobneje obravnavali v tej nalogi in sicer nas je zanimalo, kako se spreminjajo izbrane lastnosti bentonita, ko je izpostavljen različno slanim oz. kislim (nizek pH) okoljem.

Spremembe lastnosti zaradi različno slanosti ali različno kislih pornih raztopin smo ugotavljali na dveh tipih bentonitov istega proizvajalca – kalcijevega in natrijevega. Njuno obnašanje smo preverjali z laboratorijskimi preiskavami ugotavljanja meje židkosti, nedrenirane strižne trdnosti, reoloških lastnosti in preiskav nabrekanja. Dobljene rezultate smo prikazali v preglednicah ali pa v obliki grafov, jih analizirali in med seboj primerjali. Kritično smo se opredelili glede vpliva priprave preizkušancev in postopkov izvedbe preiskav ter ocenili uporabnost preiskav za načrtovanje ciljane rabe bentonitov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.13:666.322-047.44(043.2)
Author: Lucija Babij
Supervisor: Prof. Janko Logar, Ph. D.
Co-supervisor: Assist. Jasna Smolar, Ph. D.
Title: Influence of water pH and salinity on the behaviour of bentonite
Document type: Graduation Thesis
Notes: 34 p., 4 tab., 43 fig., 1 eq., 23 ref.
Keywords: bentonite, environmental geotechnics, liquid limit, undrained shear strength, rheological properties, swelling potential

Abstract

As a natural product, bentonite is increasingly used in geotechnical engineering and environmental geotechnics due to its inertness and its characteristic properties. It is used in trench excavating, tunnel construction, grouting of cracks in bedrock soils, sealing of landfills, remediation of contaminated soils, etc. The outstanding and important properties of this material for the profession are undrained shear strength, viscosity, swelling potential, thixotropy, ability to bind certain pollutants and water permeability. The first three are discussed in more detail in this thesis, where we were interested in how selected properties of bentonite change when exposed to different saline or acidic (low pH) environments.

The changes in properties due to different saline or acidic pore solutions were determined on two types of bentonite from the same manufacturer - calcium and sodium. Their behaviour was verified by laboratory tests to determine the liquid limit, undrained shear strength, rheological properties and swelling. The results were presented in tables or graphs then analysed and compared with each other. We critically commented on the influence of the specimen's preparation and test procedures then assessed the usefulness of the tests for planning the targeted use of bentonites.

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO SLIK.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	IX
1 UVOD	1
1.1 Motiv naloge in predstavitev problema.....	1
1.2 Cilji in hipoteze.....	1
1.3 Metodologija dela	1
2 BENTONIT IN NJEGOVA UPORABA V GEOTEHNIKI OKOLJA	3
3 LABORATORIJSKE PREISKAVE	9
3.1 Zasnova preiskav.....	9
3.2 Ugotavljanje meje židkosti	11
3.3 Ugotavljanje nedrenirane strižne trdnosti	13
3.4 Preiskava reoloških lastnosti.....	14
3.5 Preiskava nabrekanja	16
4 REZULTATI LABORATORIJSKIH PREISKAV	19
4.1 Meja židkosti.....	19
4.2 Nedrenirana strižna trdnost.....	20
4.3 Reološke lastnosti	23
4.4 Nabrekanje.....	26
5 PRIMERJAVA REZULTATOV OPRAVLJENIH PREISKAV Ca IN Na-BENTONITA	28
6 ZAKLJUČKI	31
VIRI.....	33

KAZALO SLIK

Slika 1: Nastanek bentonita - primer Wyoming (Sutherland, 2014).	3
Slika 2: Manjši izkop bentonita na Bavarskem (Köster, 2015).	3
Slika 3: Izdanek kakovostnega naravno ekspandiranega bentonita (Simandl, 2009).	4
Slika 4: Bentonitna ruda (UnivDatos, 2021).	4
Slika 5: Izkop jarka z bentonitno suspenzijo (Harvey, 2013).	5
Slika 6: Polaganje GCL trakov (Wayne, 2021).	5
Slika 7: Tesnjenje zemeljskih pregrad (BentoniteSa, 2017).	6
Slika 8: Vpliv koncentracije soli na mejo židkosti bentonitov (levo: Ying, 2021; desno: Dutta, 2015).	7
Slika 9: Vpliv koncentracije soli v porni vodi na strižno trdnost bentonita (Ying, 2021).	7
Slika 10: Vpliv različne koncentracije soli v porni vodi na nabrekanje bentonita (prirejeno po Elmashad, 2016).	7
Slika 11: Vpliv različne koncentracije soli v porni vodi na nabrekanje bentonitov (Dutta, 2015).	8
Slika 12: Vzorci bentonitnih mešanic za reološke preiskave pri različnih slanostih porne tekočine (Ying, 2016).	8
Slika 13: Tehtanje Na-bentonita v prahu za pripravo vzorcev.	9
Slika 14: Rezultat meritev pH kislih raztopin za pripravo vzorcev in vode.	11
Slika 15: Priprava vzorcev za ugotavljanje meje židkosti.	12
Slika 16: Preiskava ugotavljanja meje židkosti s konusom 60 g/60 °.	12
Slika 17: 5-točkovna metoda za izvrednotenje meje židkosti.	12
Slika 18: Reometer Brookfield DV3T HB, levo spodaj krilna sonda V-74.	13
Slika 19: Dimenzije krilnih sond (Brookfield, 2014).	14
Slika 20: Meritve reoloških lastnosti.	15
Slika 21: Sedimentirana vzorca Ca-bentonita za preiskavo reoloških lastnosti. Vidna je izločena voda oz. raztopina na površini.	15
Slika 22: Preiskava nabrekanja – v ozadju centrifugirke.	17
Slika 23: Neenakomerno nabrekanje bentonita.	18
Slika 24: Meje židkosti Ca in Na bentonita pri različnih slanostih porne raztopine.	19
Slika 25: Meje židkosti Na-bentonita pri različnih kislostih porne raztopine.	19
Slika 26: Nedrenirana strižna trdnost Ca-bentonita pri različnih koncentracijah soli v porni raztopini.	21
Slika 27: Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri različnih koncentracijah soli v porni raztopini.	21
Slika 28: Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri treh različnih koncentracijah soli v porni raztopini.	22

Slika 29: Nedrenirana strižna trdnost Ca-bentonita merjena s konusom pri koncentracijah soli 45 in 66 g/L.	22
Slika 30: Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri različnih kislostih porne raztopine.	23
Slika 31: Rezultati reoloških preiskav svežih suspenzij Ca-bentonita.	23
Slika 32: Rezultati reoloških preiskav 48 ur starih suspenzij Ca-bentonita.	24
Slika 33: Izločanje porne raztopine med preiskavo reoloških lastnosti.	24
Slika 34: Rezultati reoloških preiskav sveže in 48 ur stare suspenzije Ca-bentonita in vode.	25
Slika 35: Rezultati reološke preiskave 24 ur stare suspenzije Na-bentonita pri vlažnosti 1797 %.	25
Slika 36: Rezultati reoloških preiskav 24 ur starih suspenzij Na-bentonita.	26
Slika 37: Nabrekanje Ca-bentonita po standardni metodi.	26
Slika 38: Nabrekanje Na-bentonita po standardni metodi.	27
Slika 39: Primerjava nabrekanja Na-bentonita po standardni in po hitri metodi.	27
Slika 40: Normiran prikaz meje židkosti v odvisnosti od porne raztopine.	28
Slika 41: Nedrenirana strižna trdnost Ca in Na-bentonita zamešanih z vodo.	28
Slika 42: Nedrenirana strižna trdnost Ca in Na-bentonita pri različnih koncentracijah soli v porni tekočini.	29
Slika 43: Primerjava rezultatov reoloških preiskav slanih suspenzij Na in Ca-bentonita.	29

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Preiskani vzorci in izvedene laboratorijske meritve.	10
Preglednica 2: Materiali in količine za preiskavo nabrekanja.	17
Preglednica 3: Datumi priprave vzorcev in izvedbe meritev za določanje meje židkosti.	20
Preglednica 4: Rezultati meritev nabrekanja po 7 dneh.	26

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS**Simboli**

c_{ur}	Nedrenirana strižna trdnost pregnetenega vzorca
w	Gravimetrična vlaga
w_L	Meja židkosti
m	Masa konusa v gramih
i	Povprečni pogrezek konusa pri dveh zaporednih meritvah
c	Konstanta konusa, odvisna od kota konice
g	Težnostni pospešek

Okrajšave

RPM	Rounds per minute – Obrati na minuto
Na-bent.	Natrijev bentonit oz. Na-bentonit
Ca-bent.	Kalcijev bentonit oz. Ca-bentonit
KS	Krilna sonda

1 UVOD

1.1 Motiv naloge in predstavitev problema

Bentonit je naravni proizvod, ki si svojo pot že več kot stoletje vztrajno utira v številne panoge po celem svetu. Ena izmed njih je tudi geotehnika okolja, kjer se ponuja vrsta različnih načinov uporabe te montmorilonitne gline. Nove tehnologije torej narekujejo nove možnosti rabe bentonita, hkrati pa se odpirajo tudi nova vprašanja o lastnostih in obnašanju v različnih okoljih uporabe.

V sklopu te naloge smo si zastavili vprašanje - kako se bo bentonit obnašal v različno slanih okoljih ter okoljih z nizko vrednostjo pH (kislo okolje)? Bodo ugotovljene lastnosti pri dveh različnih vrstah bentonita enake? In nenazadnje kako zastaviti preiskave pred samo uporabo bentonita v geotehniki okolja.

1.2 Cilji in hipoteze

Cilji raziskave, izvedene v sklopu te naloge, so naslednji:

1. pridobiti podatke iz literature o lastnostih bentonitov in njihovi uporabi v geotehniki okolja,
2. ugotoviti, kako na lastnosti bentonita vplivajo različne koncentracije soli v porni vodi,
3. ugotoviti, kako na bentonit vpliva različen pH porne vode,
4. preiskati morebitne razlike/podobnosti v obnašanju natrijevega in kalcijevega bentonita, če sta izpostavljena istim vplivom ter
5. podati smernice za načrtovanje preiskav pred uporabo bentonita v okoljih, kjer ta lahko pride v stik s slano vodo (npr. morsko okolje) ali z vodo oz. porno tekočino z nizkim pH (npr. deponije).

Hipoteze:

1. z višanjem koncentracije soli oz. nižanjem pH porne tekočine bo upadala meja židkosti bentonitov,
2. z višanjem koncentracije soli oz. nižanjem pH porne tekočine bo upadala nedrenirana strižna trdnost bentonitov,
3. z višanjem koncentracije soli oz. nižanjem pH porne tekočine bo upadal nabrekalni potencial bentonitov,
4. z višanjem koncentracije soli oz. nižanjem pH porne tekočine se bo zmanjšala viskoznost bentonitov,
5. natrijev bentonit bo aktivnejši in bolj nabrekljiv od kalcijevega.

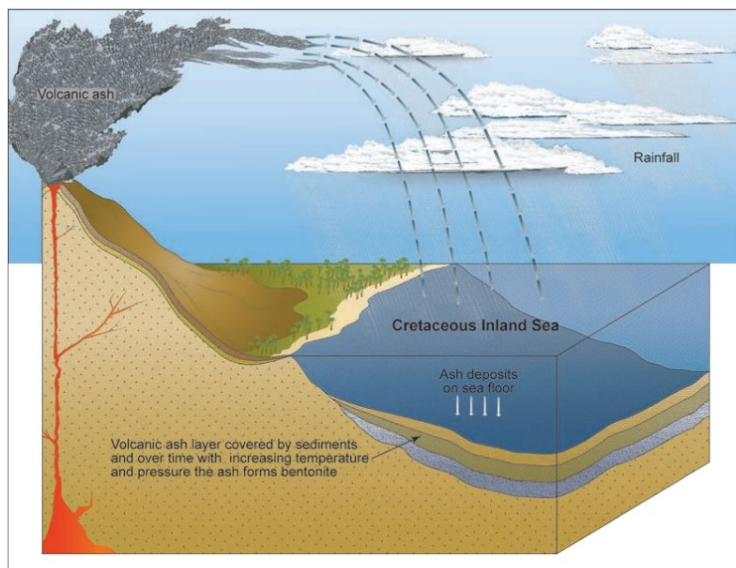
1.3 Metodologija dela

Poudarek pri tej nalogi je bil na laboratorijskih preizkusih, opravljenih na dveh različnih komercialnih proizvodih, za katera smo sledljivo uporabljali oznaki Ca-bentonit in Na-bentonit. Z analizo dobljenih rezultatov smo skušali doseči zastavljene cilje in preveriti hipoteze. Izvedli smo preiskave za določanje meje židkosti, nedrenirane strižne trdnosti, preiskave reoloških lastnosti in nabrekanja. Pridobljene rezultate preiskav smo primerjali tudi s podatki iz literature.

»Ta stran je namenoma prazna.«

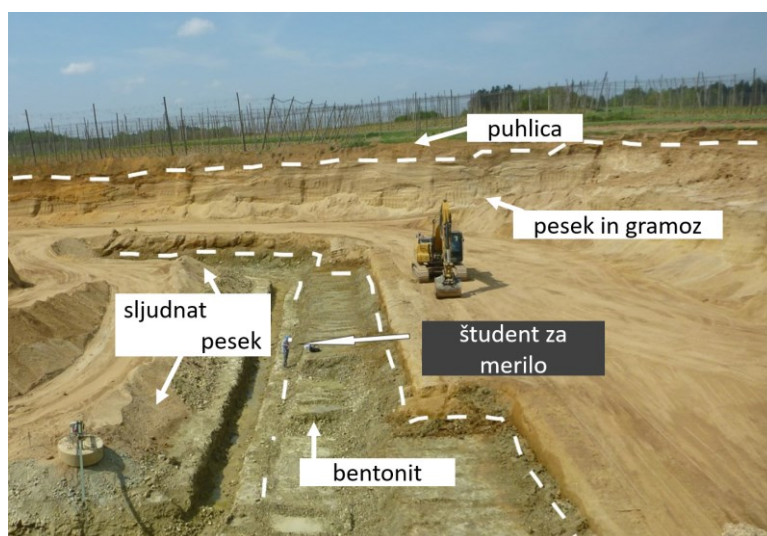
2 BENTONIT IN NJEGOVA UPORABA V GEOTEHNIKI OKOLJA

Bentonit je vrsta izredno vpojne in nabreklijve gline. Poimenovana je bila po mestu Fort-Benton (Wyoming, ZDA), v bližini katerega je bilo odkrito prvo večje nahajališče leta 1888. Bentoniti običajno nastanejo s preperevanjem vulkanskega pepela ali tufa ob prisotnosti morske vode oz. zaradi vremenskih vplivov in erozije (povzeto po Držaj, 1962).



Slika 1: Nastanek bentonita - primer Wyoming (Sutherland, 2014).

Bentonit pridobivamo z rudarjenjem na različnih nahajališčih in v kamnolomih. Primer manjšega rudnika je prikazan na Slika 2. V naravi lahko zasledimo bentonite številnih barv (rumenkaste, bele, rjave, sive, zelenkaste, rožnate), kar je posledica izjemne sposobnosti absorpcije različnih kovin in mineralov (Nored, 2012).



Slika 2: Manjši izkop bentonita na Bavarskem (Köster, 2015).

Med plastmi bentonita lahko v naravi zasledimo tudi različne organske in anorganske snovi, odvisno od okolja nastanka. Posledično variirata videz in oblika bentonita, ki se nahaja v naravnih okoljih, kot prikazujeta slika 3 in slika 4.



Slika 3: Izdanek kakovostnega naravno ekspaniranega bentonita (Simandl, 2009).



Slika 4: Bentonitna ruda (UnivDatos, 2021).

Ker pa z naraščanjem števila različnih primesi (in nečistoč) v bentonitu raste tudi nepredvidljivost v njegovem obnašanju, je tovrsten bentonit pretežno neuporaben. Še posebej kadar bi želeli doseči točno določene karakteristike, je njegova homogena sestava še kako pomembna. Danes se širom sveta nahajajo rudniki, kjer je bentonitna ruda čistejša in s tem primernejša za nadaljnjo predelavo. Z nekaj industrijske obdelave dobimo produkt, ki ga uporabljajo številne panoge – od kmetijstva, prehranske, kozmetične industrije pa do livarstva in geotehnike okolja. Najpogosteje je v uporabi proizvod v obliki granul, peletov ali praška.

Ne glede na obliko, v kateri je proizvod, je bentonit pretežno sestavljen iz mineralov glin iz skupine smektita, med katerimi prevladuje montmorilonit. Ta daje bentonitu prav posebne lastnosti. Ena od njih je sposobnost vpijanja velike količine vode (in drugih polarnih snovi) ob hkratnem nabrekanju. Najbolj razširjena in uporabljena sta tako imenovana natrijev (Na) in kalcijev (Ca) bentonit, poimenovana po svojih prevladujočih kationih. Natrijev bentonit je visoko nabreklijiv, medtem ko je kalcijev bentonit nizko nabreklijiv.

Ob primešanju zadostne količine vode bentonit postane gelast, kar je še ena od posebnih lastnosti zaradi montmorilonita. Ta gel lahko ob mešanju preide v tekočo obliko, ob mirovanju pa spet v trdno obliko, kot tiksotropijo obrazloži Držaj (1962).

Tiksotropijo bentonita izkoriščamo pri izkopih jarkov (Slika 5), saj bentonitna suspenzija maže rezalne glave vrtalne naprave in hkrati služi kot vmesni podporni material, ki nadomešča druge tehnike podpiranja izkopov. Suspenzija do neke mere prodre v stene izkopa in tvori t. i. neprepustno filtrno pogačo, s čimer je preprečeno prekomerno izhajanje tekočine v okolico. V fazi betoniranja beton preprosto izpodrine bentonitno suspenzijo, ki je pogosto lahko ponovno uporabljena pri nadaljnjem izkopavanju. Tako tehniko uporabljamo pri izkopih globine tudi do 100 m, ki v širino merijo od 0,80 do 1,50 m (povzeto po Harvey, 2013).



Slika 5: Izkop jarka z bentonitno suspenzijo (Harvey, 2013).

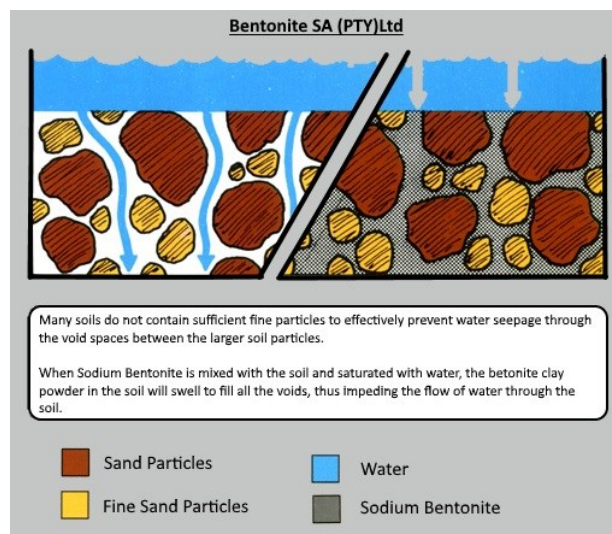
Naslednja možnost je injektiranje razpok v temeljnih tleh (lahko v kamninah ali zemljinah), s čimer preusmerjamo in/ali oviramo tok odpadne ali onesnažene vode skozi prepustna tla. Bentonit je lahko mazivo za vgradnjo pilotov ter vleko kablov, cevi skozi kanale. Najdemo ga tudi v predorogradnji, kjer ob vrtanju nudi začasno podporo oz. zaščito (Harvey, 2013). Najpogostejši primeri uporabe bentonita pa so tesnjenje deponij odpadkov, ribnikov ali pa kanalizacijskih zadrževalnikov. Navadno gre za kombinacijo bentonitne plasti oz. bentonitnih trakov ter geotekstila in/ali geomembrane, bolj znano pod imenom GCL (geosynthetic clay liner) (Slika 6).



Slika 6: Polaganje GCL trakov (Wayne, 2021).

Pri izgradnji zemeljskih jezov oz. pregrad lahko zemljinam s premajhno vsebnostjo finih frakcij primešamo bentonit. Ob postopni saturaciji bentonit nabrekne in zapre praznine med zrni zemljine. S tem se znatno zmanjša pretakanje vode oz. celo trajno prepreči izgube vode (Slika 7) (BentoniteSA, 2017).

V zadnjih 30 letih se bentonit uvaja tudi v jedrski industriji, kjer ga vgrajujemo v odlagališča jedrskih odpadkov. Visoko zgoščenega se vgradi med posode z odpadki in okoliško kamnino, kjer v primeru pojava razpok bentonit nabrekne in jih zapre (Nored, 2012).

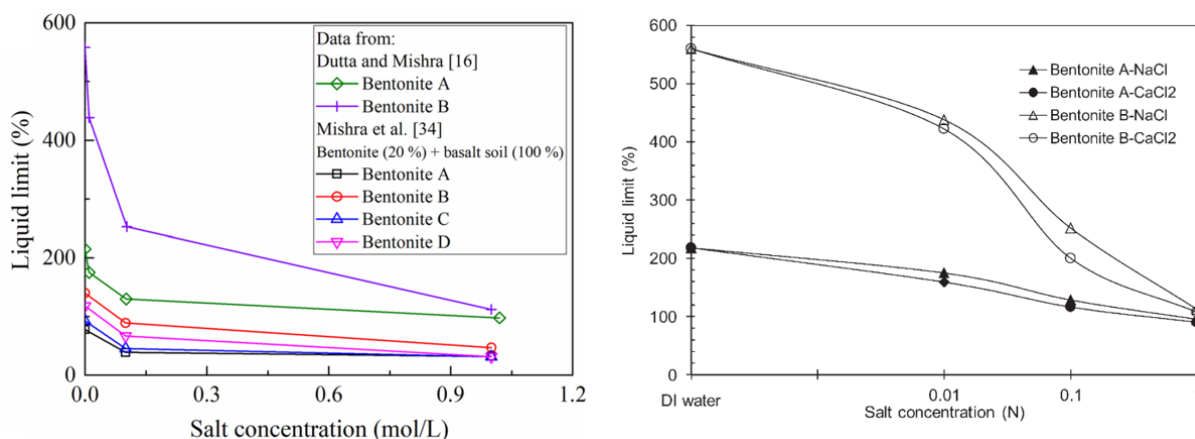


Slika 7: Tesnjenje zemeljskih pregrad (BentoniteSa, 2017).

Bentonit se uporablja tudi za remediacijo onesnaženih zemljin. Kot učinkovit se je izkazal za remediacijo zemljin onesnaženih s težkimi kovinami, kot sta npr. cink in baker (Chaves, 2017 in Tito, 2016). Pojem remediacija označuje postopke zmanjševanja in odstranjevanja vsebnosti nevarnih snovi, ki so se nakopičile v tleh.

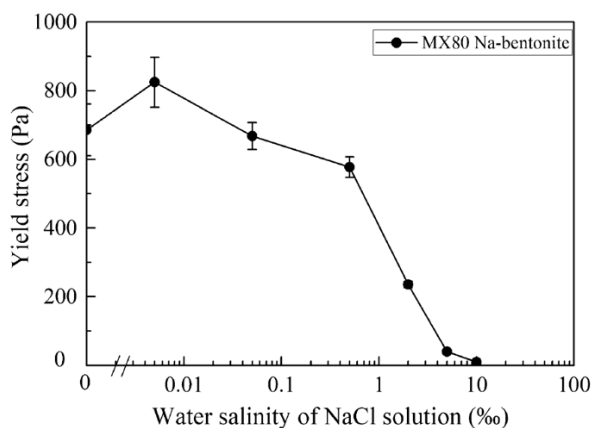
Bentonit je torej naraven, inerten material, ki ni okolju škodljiv, zato je njegova uporaba zaželena. Pozornost pa je treba nameniti dejstvu, da zaradi nabrekanja in krčenja lahko poškoduje ali uniči plitvejšje koreninske sisteme. Na izpostavljenih bentonitnih nahajališčih tako pogosto naletimo na gol ali malo raščen teren (Nored, 2012). Nabrekanje in krčenje bentonita je treba upoštevati tudi pri uporabi v geotehniki in geotehniki okolja, kjer npr. pri tesnjenju krčivne razpoke niso dopustne.

Nujno potrebno je preveriti, kakšen bo odziv bentonita, ki bo izpostavljen bolj kislim okoljem (nizek pH) ali pa ob prisotnosti visoke koncentracije soli v porni vodi. Tako Dutta (2015) kot Ying s sodelavci (2021) so v raziskavah zabeležil velik padec meje židkosti ob povečani koncentraciji soli v porni vodi (Slika 8).



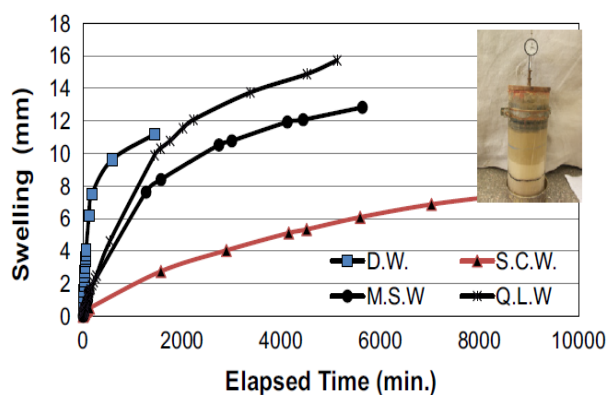
Slika 8: Vpliv koncentracije soli na mejo židkosti bentonitov (levo: Ying, 2021; desno: Dutta, 2015).

Na grafu na sliki 9 opazimo, da se je s povečevanjem koncentracije soli zmanjšala strižna trdnost.



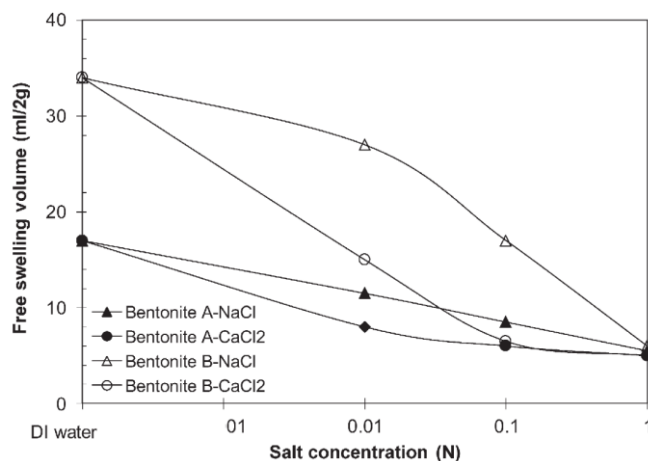
Slika 9: Vpliv koncentracije soli v porni vodi na strižno trdnost bentonita (Ying, 2021).

Elmashad (2016) je ugotovil, da povečana koncentracija soli vpliva tudi na nabrekanje (Slika 10). Nabrekanje se ob višanju koncentracije soli upočasni, pri višjih koncentracijah soli pa tudi občutno upade. Upad nabrekanja ob povečani koncentraciji soli je opazil Dutta (Slika 11).



koncentracija soli v porni vodi [ppm]			
D.W.	Q.L.W.	M.S.W.	S.C.W.
Distilled water	Qarun lake water	Mediterranean Sea water	Soft clay area water
0	29050	37056	106852

Slika 10: Vpliv različne koncentracije soli v porni vodi na nabrekanje bentonita (prirejeno po Elmashad, 2016).



Slika 11: Vpliv različne koncentracije soli v porni vodi na nabrekanje bentonitov (Dutta, 2015).

Na sliki 12 so prikazani vzorci bentonitnih mešanic za reološke preiskave pri različnih slanostih, ki so bili zamešani pri isti vlažnosti. Tu so razlike opazne tudi brez izvedenih meritev.



Slika 12: Vzorci bentonitnih mešanic za reološke preiskave pri različnih slanostih porne tekočine (Ying, 2016).

3 LABORATORIJSKE PREISKAVE

3.1 Zasnova preiskav

Preiskave smo izvedli na dveh tipih bentonitov. Surovina za proizvodnjo obeh bentonitov je bila pridobljena v rudniku kalcijevega bentonita "Sokolac", Šipovo, Republika Srpska, BiH. V podjetju Bentoproduct se izvaja tudi postopek aktivacije natrijevega bentonita.

Prvi preiskovani proizvod je bil nizko nabreklijiv kalcijev bentonit (Ca-bentonit), drugi pa visoko nabreklijiv natrijev bentonit (Na-bentonit). Oba bentonita sta bila proizvedena v letu 2023 in v laboratorij dostavljena v obliki suhega prahu (Slika 13). Vse preiskave smo izvajali v geotehničnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani pri sobni temperaturi približno 21°C.



Slika 13: Tehtanje Na-bentonita v prahu za pripravo vzorcev.

Kazalo preiskanih vzorcev in izvedenih laboratorijskih preiskav je v preglednici 1.

Preglednica 1: Preiskani vzorci in izvedene laboratorijske meritve.

Bentonit	Porna tekočina	Preiskava			
		Ugotavljanje meje židkosti	Ugotavljanje nedrenirane strižne trdnosti	Meritve reoloških lastnosti	Meritve nabrekanja
Ca bentonit	Čista, pitna voda (Ljubljanski vodovod)	✓		✓	✓
	Slana voda, koncentracija 33 g/L	✓		✓	✓
	Slana voda, koncentracija 45 g/L	✓		✓	✓
	Slana voda, koncentracija 66 g/L	✓		✓	✓
Na bentonit	Čista, pitna voda (Ljubljanski vodovod)	✓		✓	✓
	Slana voda, koncentracija 33 g/L	✓		✓	✓
	Slana voda, koncentracija 45 g/L	✓		✓	✓
	Slana voda, koncentracija 66 g/L	✓		✓	✓
	Alkoholni kis → pH = 2	✓		✓	✓
	Voda z dodatkom alkoholnega kisa → pH = 5	✓		X	✓

Za pripravo bentonitov z različno koncentracijo soli smo uporabili raztopino kuhinjske soli (NaCl) in čiste pitne vode Ljubljanskega vodovoda (v nadaljevanju: voda). Zanimalo nas je obnašanje bentonita pri koncentraciji soli 33 g/L, kar je povprečna slanost oceanov, pri 45 g/L, ki je vmesni korak do zgornje izbrane koncentracije, 66 g/L. Slednja je bila izbrana, ker lahko v obmorskih okoljih, kjer prihaja do izhlapevanja vode iz morskega mulja, pričakujemo bistveno višjo slanost, kot jo ima morska voda. Vzorce z različnim pH smo pripravili z alkoholnim kisom, brez redčenja za pH 2 in z redčenjem z vodo do pH 5. Vrednost pH smo določili z indikatorskimi lističi, kar je prikazano na sliki 14. Vzorca bentonitov, ki smo jima primešali čisto vodo, sta služila kot referenčna za vzorce bentonitov, pripravljene z različno slanimi raztopinami in z raztopinami z različnimi vrednostmi pH.

Pred pričetkom izvedbe preiskav smo v vrčih pripravili tri raztopine različnih slanosti. Vrče z raztopinami smo pokrili s parafilmom, da je bilo preprečeno izhlapevanje vode. Pripravljene slane raztopine smo uporabljali za izvedbo več preiskav in jih uporabili v nekaj dneh od priprave. Ko je raztopin zmanjkalo, smo po enakem postopku pripravili nove raztopine. Drugače je bilo z raztopino iz

kisa in vode, ki jo je bilo potrebno pripraviti tik pred izvedbo preiskave, sicer je s časom prišlo do nevtralizacije, zato priprava vnaprej ni bila mogoča.



Slika 14: Rezultat meritev pH kislih raztopin za pripravo vzorcev in vode.

Vse preiskave, z izjemo preiskav nabrekanja, so zahtevale predhodno pripravo vzorcev, kar pomeni, da so bili bentoniti z vodo ali eno od raztopin navlaženi oz. zamešani vsaj 17 ur pred izvedbo meritev, da se je bentonit aktiviral in je prišlo do ekvibracije vlage. Datumi priprave vzorcev oz. časi od priprave do izvedbe meritev so zapisani v poglavju 4.

Preiskave smo zasnovali in prilagodili tako, da bi lahko ugotovili, kakšno obnašanje bentonita lahko pričakujemo v različno kislem in slanem okolju in nenazadnje ali se ob izpostavitvi istim pogojem Na in Ca-bentonit obnašata podobno.

Za potrebe ugotavljanja meje židkosti, nedrenirane strižne trdnosti in reoloških lastnosti smo preizkušancem izmerili vlažnost po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1 (SIST 17892-1, 2004). V tem primeru je potrebno opozoriti na naslednja odstopanja od standardne metode:

1. Masa enega sveže pripravljenega preizkušanca za sušenje je bila v nekaterih primerih manjša od predpisane, 25 g. To smo ocenili kot dopustno zaradi izjemne homogenosti materiala.
2. Vlago smo določali na preizkušancih z veliko vsebnostjo montmorilonita, kjer standard opozarja na možnost nereprezentativnih rezultatov.
3. Vlago smo določali na preizkušancih, kjer so koncentracije soli presegle vrednost 35 g/L.

Zadnji dve odstopanji smo privzeli za sprejemljivi, ker je namen preiskav primerjava učinka različnih koncentracij soli na vzorcih, zamešanih iz istega bentonita in preiskanih po enakih postopkih. Nismo iskali kvantitativne primerljivosti rezultatov z morebitnimi sorodnimi preiskavami.

3.2 Ugotavljanje meje židkosti

Vsaj 17 h pred izvedbo meritev smo v steklenih posodah pripravili vzorce za ugotavljanje meje židkosti iz preglednice 1, tako da smo v 200 g suhega bentonita postopoma ročno vmešali toliko vode oz. raztopine, da je nastala gosta pasta in je bil ves bentonit omočen (Slika 15). Pripravljene vzorce smo v času ekvibracije vlage (najmanj 17 ur) prekrili s PVC vrečko, da je bilo preprečeno izhlapevanje.

Že med pripravo vzorcev je bilo mogoče zaznati razlike v konsistenci. Veliko hitreje in z manj dodane vode/raztopine smo pripravili vzorce z večjo koncentracijo soli in tiste z nižjim pH. Najtežje, v smislu

mešanja do homogenosti zmesi, je bilo pripraviti vzorce z vodo. Pri mešanju Na-bentonita in alkoholnega kisa smo opazili reakcijo v obliki intenzivnega mehurjenja, med mešanjem pa so se tvorile grudice, do česar pri dodajanju solnih raztopin ni prišlo.

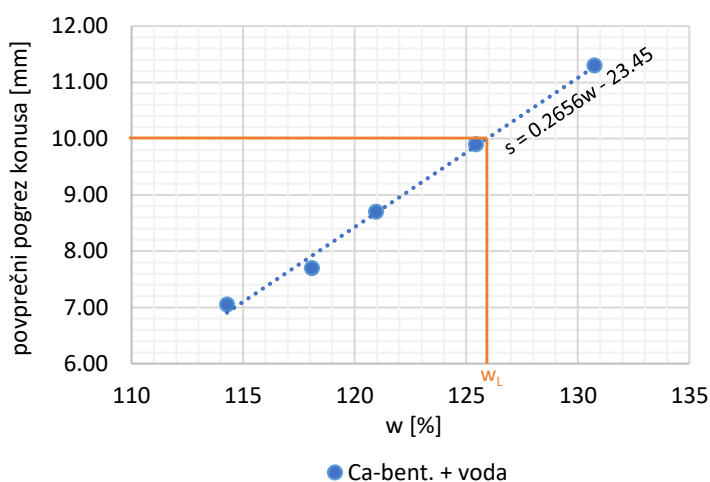
Preiskavo ugotavljanja meje židkosti bentonita smo izvedli po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12, (SIST 17892-12, 2004). Uporabili smo konus z maso 60 g in 60° konico (Slika 16), za izvedenost pa je bila izbrana 5-točkovna metoda. To pomeni, da smo pri petih različnih vlažnostih izmerili pogredek konusa in meritve prikazali na grafu povprečnega pogreza konusa [mm] v odvisnosti od vlage [%] (Slika 17). Narisali smo trendno črto (premico, ki se najboljše prilega merjenim točkam) in mejo židkosti (w_L) odčitati pri 10 mm pogreza.



Slika 15: Priprava vzorcev za ugotavljanje meje židkosti.



Slika 16: Preiskava ugotavljanja meje židkosti s konusom 60 g/60°.



Slika 17: 5-točkovna metoda za izvedenost meje židkosti.

3.3 Ugotavljanje nedrenirane strižne trdnosti

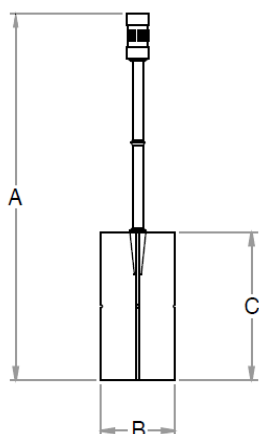
Najprej smo iz meritev, izvedenih v sklopu ugotavljanja meje židkosti (poglavje 3.2), iz vrednotili nedrenirano strižno trdnost (c_{ur}). To je bilo mogoče storiti zaradi enakega postopka izvedbe meritev za obe preiskavi. Na istih vzorcih smo s časovnim zamikom (mirovanje vzorca) nadaljevali z meritvami nedrenirane strižne trdnosti s konusom po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-6 (SIST 17892-6, 2004). Preiskavo smo izvedli z dvema konusoma, 60 g/60° in 10 g/60°. Tudi za izvedbo meritev nedrenirane strižne trdnosti s konusom veljajo vsa odstopanja od standardne metode, ki so navedena pod točko 3.2.

Poleg meritev nedrenirane strižne trdnosti s konusom smo izvedli tudi kontrolne meritve nedrenirane strižne trdnosti s krilno sondo z reometrom Brookfield DV3T HB (Slika 18). Na preizkušancu iste vlažnosti smo takoj po preiskavi s konusom izvedli še meritve s krilno sondo.



Slika 18: Reometer Brookfield DV3T HB, levo spodaj krilna sonda V-74.

Izbrali smo program *Configure Yield Test*, ki je bil že sprogramiran v aparaturi. Uporabili smo krilni sonde V-74 za vzorce z nižjo vlago in V-75 za vzorce z višjo vlago (dimenzije na sliki 19), hitrost vrtenja smo v obeh primerih nastavili na 0,250 obratov na minuto. Z manjšo sondo (V-74) smo meritve lahko izvedli v isti vzorčevalni posodici kot meritve s konusom (Slika 18). Pri uporabi večje sonde (V-75) pa smo uporabili večjo plastično čašo, da se krila sonde niso preveč približala dnu ali stenam posode. Sondo smo morali pred vsako meritvijo očistiti in previdno potisniti v vzorec do oznake na vratu sonde. Pri vgradnji vzorca smo se skušali izogniti nastanku zračnih mehurčkov, med izvedbo meritev pa smo poskrbeli, da ni prišlo do premikanja vzorčne posodice. Kontrolne meritve z reometrom Brookfield smo izvedli zgolj na nekaj preizkušancih, kar je razvidno v prikazanih rezultatih v poglavju 4.2. Prednost metode je, da se po meritvi samodejno izpiše nedrenirana strižna trdnost preizkušanca.



Spindle	Vane Length	Vane Diameter
V-71	2.708 in. / 6.878 cm	1.354 in. / 3.439 cm
V-72	1.706 in. / 4.338 cm	0.853 in. / 2.167 cm
V-73	0.998 in. / 2.535 cm	0.499 in. / 1.267 cm
V-74	0.463 in. / 1.176 cm	0.232 in. / 0.589 cm
V-75	0.632 in. / 1.61 cm	0.316 in. / 0.803 cm

Slika 19: Dimenzije krilnih sond (Brookfield, 2014).

3.4 Preiskava reoloških lastnosti

Reološke lastnosti bentonitov smo merili z reometrom Brookfield DV3T HB s krilno sondo z oznako V-71 (Slika 19, Slika 20). Z reometrom merimo odnos med strižno napetostjo in hitrostjo strižne deformacije na robu sonde. Ker nas pri konkretni nalogi zanima le relativen odnos reoloških lastnosti za različne porne tekočine, smo kot rezultat podali kar izkoriščenost (izmerjen navor deljeno z največjim navorom naprave) v odvisnosti od števila obratov na minuto (RPM). Z izbiro velikosti sonde je treba zagotoviti, da je izkoriščenost pri vseh meritvah v območju 10 do 100 %.

Meritve smo opravili po postopku upada hitrosti, kjer se je število obratov krilne sonde po stopnjah zmanjševalo od 250 obr/min do 2 obr/min. Pri vsaki hitrosti se je sonda vrtela vsaj eno minuto. Med meritvami smo beležili čas, število obratov sonde na minuto (RPM) in izkoriščenost sonde (%). Izkoriščenost sonde smo določili kot povprečje (zadnjih) šestih meritev posamezne stopnje (pri isti hitrosti vrtenja). Tako kot pri meritvah nedrenirane strižne trdnosti, smo tudi tu morali paziti, da je posoda s preizkušancem mirovala in se je vrtela zgolj sonda. Podoben postopek z istim aparatom v svojem delu navaja Smolar (2016).

Za izvedbo preiskav smo morali pripraviti vzorce, na katerih je bila možna izvedba meritev z izbrano (isto) sondo. To je predstavljalo izziv, saj je aktivnost bentonita v vodi, različno slanosti raztopin in raztopinah z različnim pH znatno različna. Za izvedbo meritev z isto sondo smo se odločili zaradi lažje neposredne primerjave merjenih vrednosti (brez dodatnih vrednotenj). Izkoriščenost sonde se je morala gibati med 0 % (spodnja meja merjenja) in 100 % (zgornja meja merjenja). Poenostavljeno povedano, zamešati smo morali ne prerediti in ne pregost vzorec, pri čemer so morali imeti vsi vzorci, ne glede na porno raztopino, primerljivo vlago.



Slika 20: Meritve reoloških lastnosti.

Prvi sklop preiskav reoloških lastnosti smo izvedli s Ca-bentonitom. Izhodiščni vzorec je bil zamešan iz suhega Ca-bentonita in vode s pomočjo mešala, da smo dobili gladko in čim bolj homogeno suspenzijo. Poskrbeli smo, da se suh bentonit ni oprijel sten posode. Na tako pripravljenem vzorcu smo meritev izvedli takoj po pripravi in še enkrat po 48 urah mirovanja vzorca v pokritem vrču, da se je aktiviral ves bentonit in vlaga uravnotežila. Pred zagonom sonde smo vzorec še enkrat homogeno premešali, saj je v času mirovanja prišlo do sedimentacije vzorca in izločanja vode oz. raztopine na površini (Slika 21). Takoj po izvedbi meritve smo vzorcu določili vlago po standardu za ugotavljanje vlažnosti kot pri prejšnjih dveh raziskavah.



Slika 21: Sedimentirana vzorca Ca-bentonita za preiskavo reoloških lastnosti. Vidna je izločena voda oz. raztopina na površini.

Drugi sklop preiskav smo opravili z Na-bentonitom, ki je bolj aktiven in nabrekljiv od Ca-bentonita. Najprej smo pripravili kontrolni vzorec bentonita zamešan z vodo, pri čemer je bil cilj doseči konsistentno stanje homogene tekoče suspenzije. Na-bentonit pomešan z vodo pridobi ustrezno konsistenco za merjenje reoloških lastnosti pri izredno visoki vlagi ($w = 1797\%$). Ker pa je tudi Na-bentonit v slanem okolju in okolju z nizkim pH bistveno manj aktiven kot v vodi, smo ugotovili, da je ta vlaga previsoka za pripravo vzorcev z ostalimi raztopinami. Po mešanju z ostalimi raztopinami je bila pripravljena suspenzija tako redka, da izvedba meritev reoloških lastnosti z izbrano krilno sondo ni bila možna oz. so bili odčitki izven merskega območja naprave.

Zato smo za pripravo vzorcev Na-bentonita z različnimi pornimi raztopinami uporabili vlago izhodiščnega, 48 ur starega vzorca s Ca-bentonitom ($w = 213\%$). Tudi v tem primeru pa preiskave vzorca Na-bentonita zamešanega z alkoholnim kisom ($\text{pH} = 5$) ni bilo možno izvesti, saj je bila suspenzija oz. zmes pregosta in posledično ni bilo doseženo mersko območje naprave (z izbrano sondo).

Ker je bentonit v različnih okoljih različno aktiven, je priprava suspenzij enake vlažnosti težavna. Zato smo dopustili manjša odstopanja v začetni vlagi, ki so razvidna v poglavju z rezultati 4.3.

3.5 Preiskava nabrekanja

Nabrekanje bentonita v raztopinah različne slanosti in kislosti smo opazovali na dva načina.

Pri prvem načinu smo za vodilo izbrali ameriški standard ASTM D5890-11 (ASTM, 2011). Standardni postopek smo zaradi narave vzorcev in razpoložljive laboratorijske opreme nekoliko prilagodili. Namesto 100 mL merilnega valja smo uporabili 50 mililitrske centrifugirke (Slika 22). Poleg tega smo uporabili 40 oz. 50 gramov tekočine (Preglednica 2) namesto predvidenih 100 mL. Temperatura tekom preiskave ni bila merjena. Rezultat preiskave je bil končni izmerjen volumen nabreklega vzorca v mL po 7 dneh od pričetka poskusa. Kasnejši odčitki so se izkazali za nesmiselne zaradi izrazite tvorbe mehurčkov v usedlini bentonita. Vzroka za tvorbo mehurčkov s preiskavami, ki smo jih izvedli, nismo uspeli pojasniti.



Slika 22: Preiskava nabrekanja – v ozadju centrifugirke.

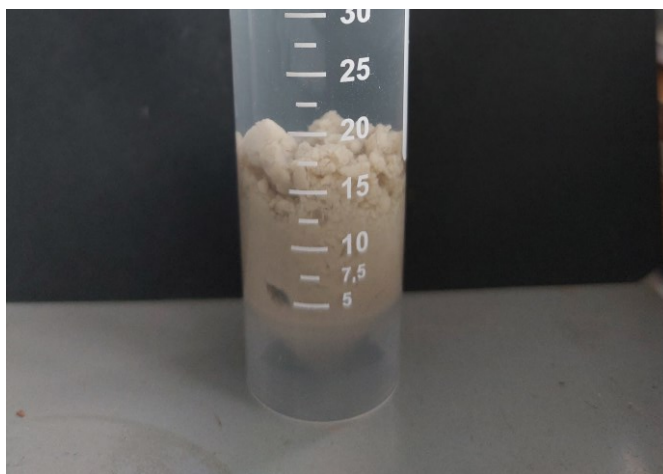
Preiskave smo izvedli na vzorcih, ki so navedeni v preglednici 1. Iz preglednice 2 je razvidno, da smo pri postopku, ki sledi standardu ASTM, za Na-bentonit uporabili samo 1,7 g suhega bentonita in 50 g tekočine. Razlog za to je izredno intenzivno nabrekanje, ki bi že v začetni fazi izvedbe poskusa preseglo merilno območje, če ne bi zmanjšali mase suhega bentonita. V tem primeru je šlo za sprotno prilagoditev poskusa – poleg zmanjšanja mase smo dodali 10 g več tekočine, da bi se lahko proces nabrekanja nemoteno nadaljeval.

Preglednica 2: Materiali in količine za preiskavo nabrekanja.

uporabljena metoda	vrsta bentonita	masa suhega bentonita [g]	masa tekočine [g]
ASTM standard	Ca-bent.	2,0	40
Hitra metoda	Ca-bent.	2,0	40
ASTM standard	Na-bent.	1,7	50
Hitra metoda	Na-bent.	2,0	40

Hitro metodo smo izvedli v enakih centrifugirkah na štirih vzorcih Ca-bentonita in na šestih vzorcih Na-bentonita (Preglednica 1). Ne gre za standardno metodo, postopek izvedbe smo določili sami, saj nas je zanimalo, če bi bila metoda lahko uporabljena kot indikativna preiskava. Sprva smo v vsako centrifugirko natehtali 2,0 g bentonita, ki smo ga nato hipno prelili s 40 g vode oz. druge izbrane porne tekočine. Enako kot pri standardni metodi smo pred zaprtjem centrifugirk poskrbeli za odstranitev zračnih mehurčkov. Temperature vzorcev nismo merili, za rezultat pa smo zapisali končni izmerjen volumen nabreklih vzorcev v centrifugirki v mL po 7 dneh od pričetka poskusa.

Pri obeh metodah je bilo odčitavanje višine nabreklih vzorcev v centrifugirkah nekoliko nenatančno, saj bentonit po celotni površini centrifugirke ni nabrekal enakomerno (Slika 23).



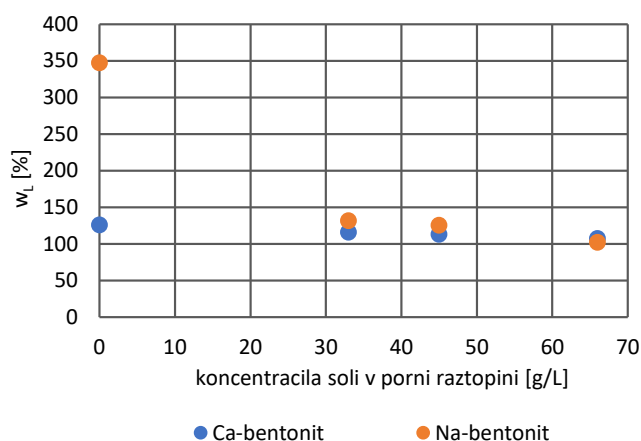
Slika 23: Neenakomerno nabrekanje bentonita.

4 REZULTATI LABORATORIJSKIH PREISKAV

4.1 Meja židkosti

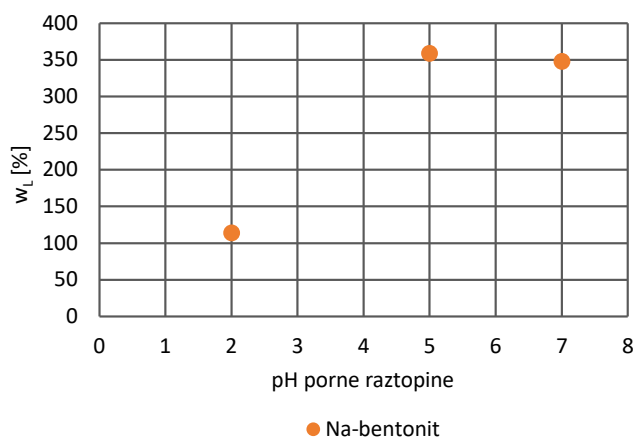
Rezultati na sliki 24 kažejo, da meja židkosti z večanjem koncentracije soli upada, tako pri vzorcih, pripravljenih iz Na-bentonita, kot tudi pri vzorcih iz Ca-bentonita. Torej smo s to preiskavo prišli do enakih ugotovitev kot drugi avtorji, navedeni v poglavju 2.

Pri Na-bentonitu smo opazili velik skok v meji židkosti med vzorcem, pripravljenim z vodo in preostalimi tremi slanimi vzorci. Med največjo in najmanjšo vrednostjo meje židkosti je namreč 246 % razlike.



Slika 24: Meja židkosti Ca in Na bentonita pri različnih slanostih porne raztopine

Podoben učinek kot slana porna raztopina ima na mejo židkosti tudi nizek pH (Slika 25). Vzorec Na-bentonita, pripravljen z alkoholnim kisom s pH = 2, je izkazoval znaten upad meje židkosti. Meja židkosti vzorca, pripravljenega z raztopino s pH = 5, pa je bil primerljiva meji židkosti vzorca, pripravljenega z vodo.



Slika 25: Meja židkosti Na-bentonita pri različnih kislostih porne raztopine.

V preglednici 3 so zapisani datumi priprave vzorcev in izvedbe preiskav. Urnik preiskav smo usklajevali še s študijskim urnikom, zato je pretečen čas med pripravo vzorcev in izvedbo meritev različen, kar lahko označimo kot manjšo pomanjkljivost preiskave.

Preglednica 3: Datumi priprave vzorcev in izvedbe meritev za določanje meje židkosti.

Ca-bentonit	Datum		Na-bentonit	Datum	
	priprave vzorca	meritve		priprave vzorca	meritve
Ca-bent. + voda	21. 03. 2023	24. 03. 2023	Na-bent. + voda (pH 7)	04. 04. 2023	12. 04. 2023
Ca-bent. + 33 g/L	21. 03. 2023	24. 03. 2023	Na-bent. + 33 g/L	03. 04. 2023	05. 04. 2023
Ca-bent. + 45 g/L	21. 03. 2023	22. 03. 2023	Na-bent. + 45 g/L	03. 04. 2023	05. 04. 2023
Ca-bent. + 66 g/L	21. 03. 2023	22. 03. 2023	Na-bent. + 66 g/L	03. 04. 2023	04. 04. 2023
/			Na-bent. + pH 5	14. 04. 2023	17. 04. 2023
/			Na-bent. + pH 2	14. 04. 2023	18. 04. 2023

4.2 Nedrenirana strižna trdnost

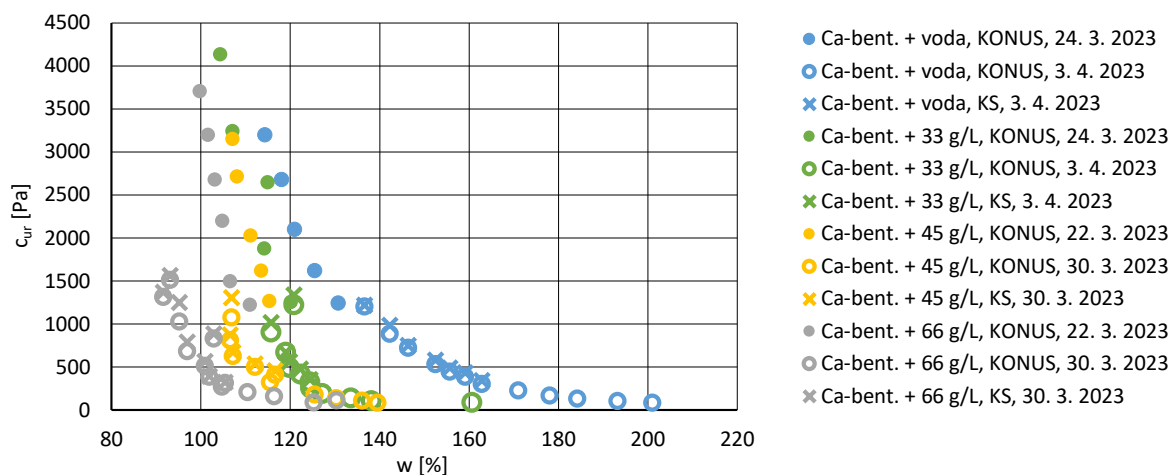
Na slikah 26 do vključno 30 so rezultati preiskav nedrenirane strižne trdnosti vzorcev bentonita, pripravljenih z vodo in z različnimi raztopinami. Podani so kot soodvisnost nedrenirane strižne trdnosti (c_{ur}) in vlage pregnetenega vzorca (w). Datumi priprave vzorcev so enaki tistim v preglednici 3, v legendah ob grafih pa so navedeni datumi izvedbe preiskav in oznaka uporabljene naprave. KONUS pomeni meritev po standardu SIST 17892-6 (2004), KS pa označuje meritev s krilno sondo. Ker se je pri vseh meritvah s konusom uporabljala 60° konica konusa in so bili vzorci pregneteni, je nedrenirana strižna trdnost izračunana po enačbi (1):

$$c_{ur} = cg \frac{m}{i^2} \quad (1)$$

Pri tem velja, da je koeficient $c = 0,27$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, masa konusa $m = 60,00 \text{ g}$ in i povprečni pogrez konusa dveh zaporednih meritev v mm.

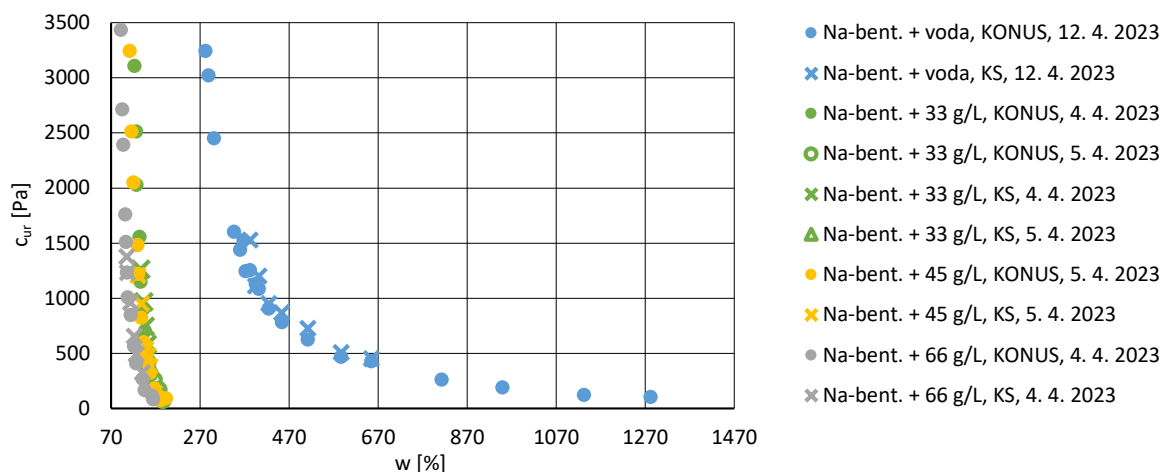
Pri meritvah s krilno sondo smo rezultat razbrali z zaslona naprave, zato izračun ni bil potreben. Rezultati meritev nedrenirane strižne trdnosti s konusom so bili primerljivi rezultatom meritev s krilno sondo.

Z večanjem vlažnosti se je zmanjševala nedrenirana strižna trdnost tako Na kot Ca-bentonita. Z višanjem koncentracije soli je nedrenirana strižna trdnost še dodatno upadala. Isti trend smo lahko opazili v zbrani literaturi v poglavju 2.



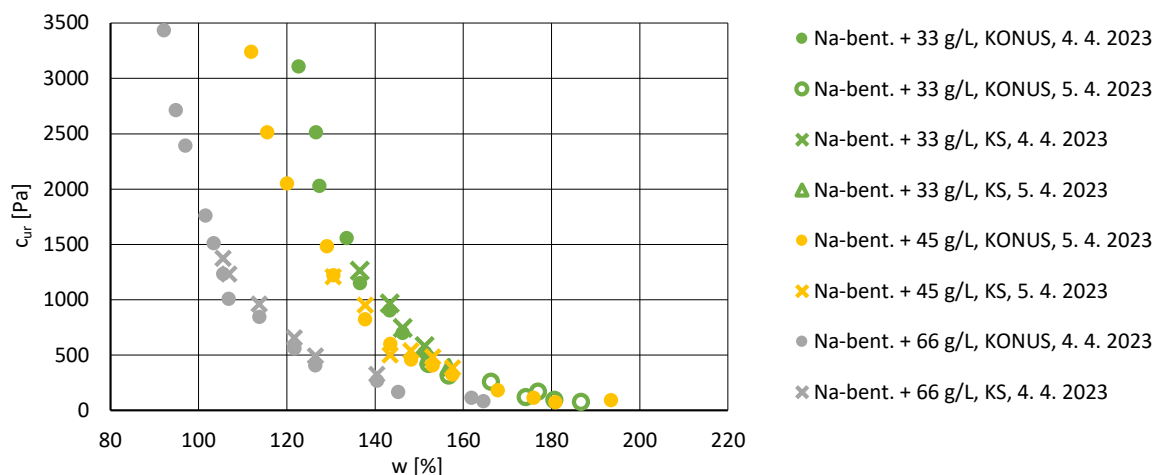
Slika 26: Nedrenirana strižna trdnost Ca-bentonita pri različnih koncentracijah soli v porni raztopini.

Z Na-bentonitom smo lahko zamešali vzorce izredno visokih vlažnosti (Slika 27), ki so bili še vedno merljivi s konusom. Pri vzorcu Na-bentonita, pripravljenem z vodo, smo dosegli vlago 1282 %, kar pomeni, da je vzorec vseboval skoraj 13-kratno maso vode napram masi suhega bentonita.



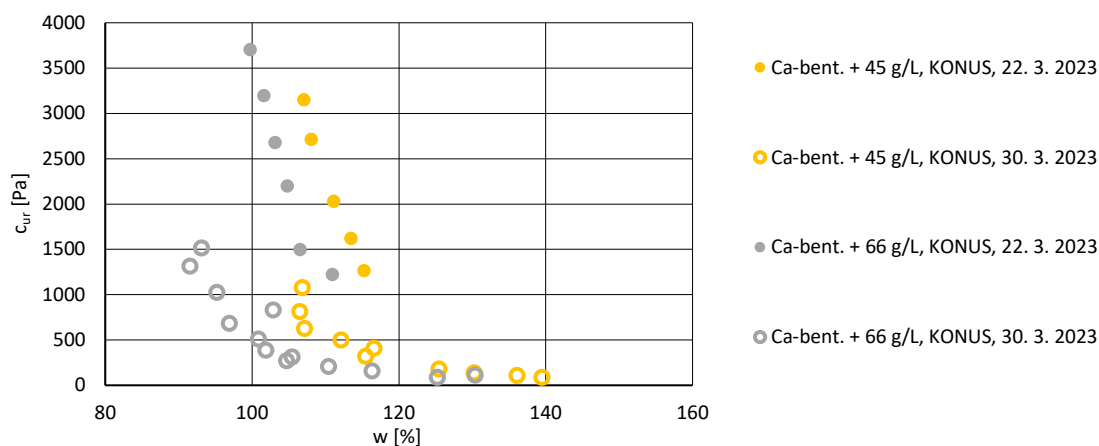
Slika 27: Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri različnih koncentracijah soli v porni raztopini.

Zaradi boljše preglednosti smo na sliki 28 ločeno prikazali graf nedrenirane strižne trdnosti Na-bentonita pri treh različnih koncentracijah soli v porni raztopini. Najbolj vidne razlike med vzorci različnih slanosti so se pojavile pri vlažnosti, manjši od 140 %, pri višji vlažnosti pa so bili rezultati slanih vzorcev primerljivi.



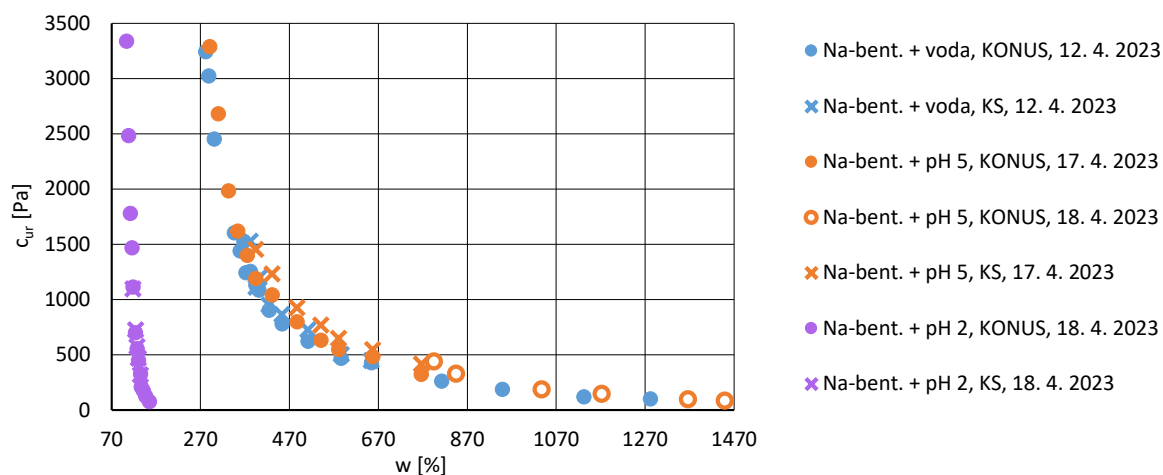
Slika 28: Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri treh različnih koncentracijah soli v porni raztopini.

Na sliki 29 sta detajlno prikazana vzorca Ca-bentonita zamešana s solnima raztopinama koncentracije 45 in 66 g/L. Vidimo lahko »preskok« v rezultatih meritev, izvedenih 22. 3. 2023 in 30. 3. 2023 (legenda k sliki 29). »Preskok« lahko pripišemo različnemu času med pripravo vzorcev in izvedbo preiskav. Po 9 dneh mirovanja vzorcev so primerljive vrednosti nedrenirane strižne trdnosti dosežene pri nižjih vlagah, kot pri preiskavi, izvedeni po enem dnevu mirovanja vzorcev. Izrazit »preskok« smo opazili le pri vzorcih Ca-bentonita, pripravljenega s slano raztopino koncentracij 45 g/L in 66 g/L, pri ostalih dveh preiskanih vzorcih z istim bentonitom podobnega obnašanja nismo prepoznali. Najverjetneje je časovno pogojena sprememba lastnosti, na velikost katere vpliva delež soli v porni vodi, posledica reakcij med bentonitom in porno raztopino.



Slika 29: Nedrenirana strižna trdnost Ca-bentonita merjena s konusom pri koncentracijah soli 45 in 66 g/L.

Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri $\text{pH} = 5$ je primerljiva nedrenirani strižni trdnosti vzorca, pripravljenega z vodo. Pri nižji vrednosti vrednost pH porne tekočine ($\text{pH} = 2$) pa nedrenirana strižna trdnost občutno upade (Slika 30).

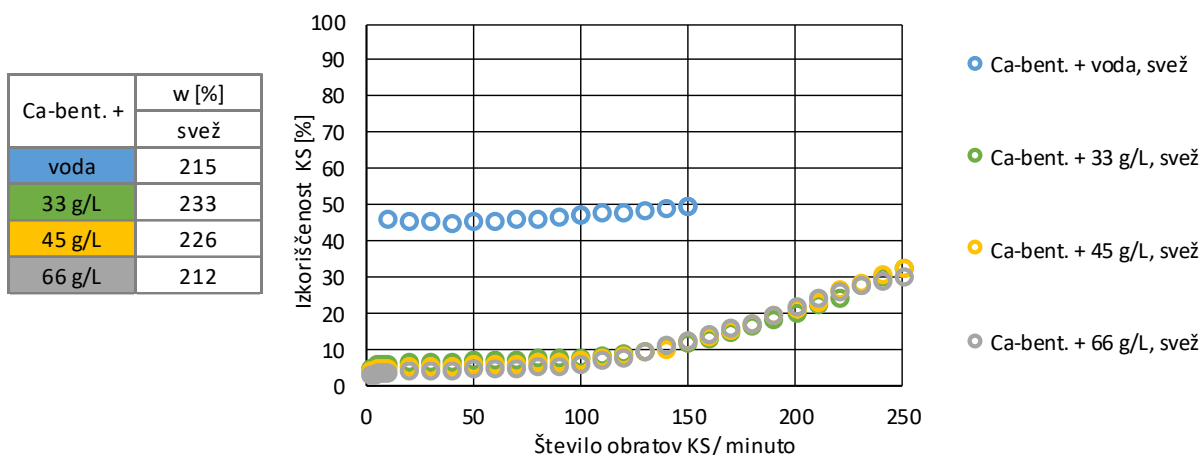


Slika 30: Nedrenirana strižna trdnost Na-bentonita pri različnih kislostih porne raztopine.

4.3 Reološke lastnosti

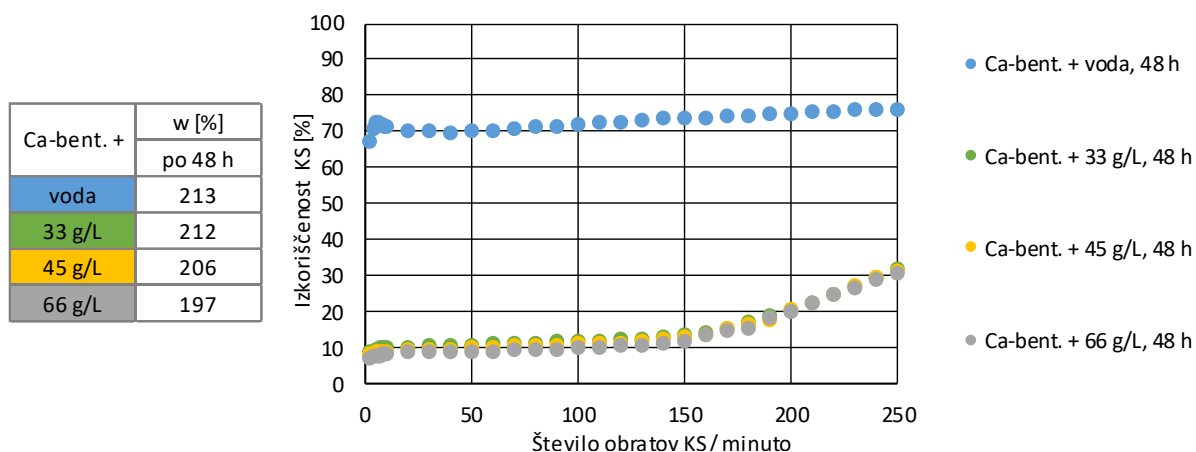
Rezultati preiskav reoloških lastnosti so na spodnjih grafih (Slika 31 do 36) prikazani kot odvisnost med izkoriščenostjo izbrane krilne sonde V-71 v % in številom obratov krilne sonde na minuto. Ob vsakem grafu je prikazana tabela, ki podaja starost vzorca in vlago posameznega vzorca pri preiskavi.

Iz dobljenih rezultatov smo razbrali, da z večanjem koncentracije soli izkoriščenost krilne sonde pada, torej so suspenzije vedno manj viskozne.



Slika 31: Rezultati reoloških preiskav svežih suspenzij Ca-bentonita.

Po preteklih 48 urah smo opazili, da je pri slanih vzorcih nekoliko upadla vlaga, izkoriščenost sonde pa je pri ostala skoraj enaka (Slika 32).



Slika 32: Rezultati reoloških preiskav 48 ur starih suspenzij Ca-bentonita.

Tekom meritev je pri nekaterih vzorcih prišlo do izločanja porne raztopine na površini vzorca, kot je to prikazano na sliki 33. Ti vzorci so bili:

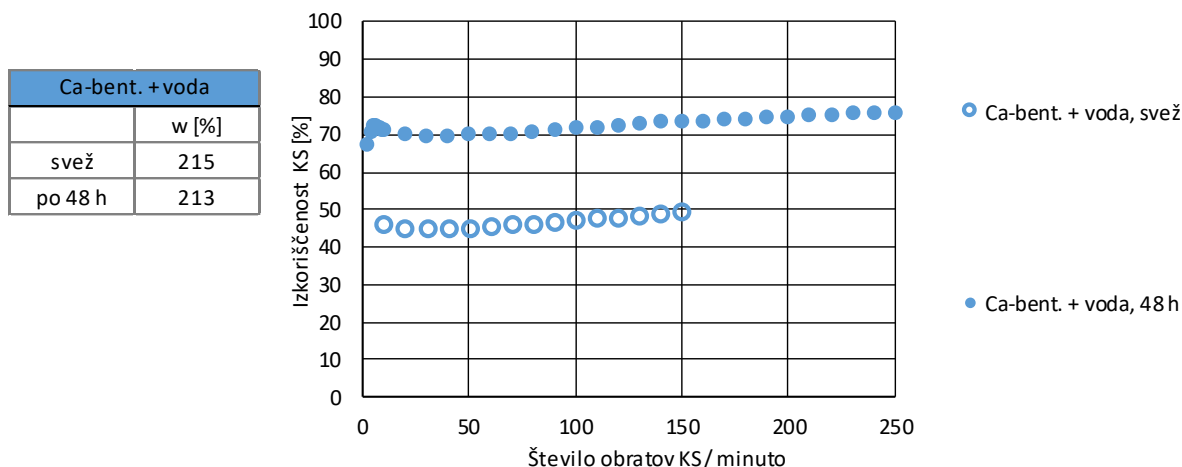
- Ca-bent. + 66 g/L, svež vzorec,
- Ca-bent. + 33 g/L, 48 h star vzorec,
- Ca-bent. + 45 g/L, 48 h star vzorec,
- Ca-bent. + 66 g/L, 48 h star vzorec.

Posledično rezultati teh meritev veljajo v absolutnem smislu za nekoliko nižje vlažnosti, zato jih je treba razumeti le kot medsebojno primerjavo reološkega obnašanja različno slanih pornih raztopin.



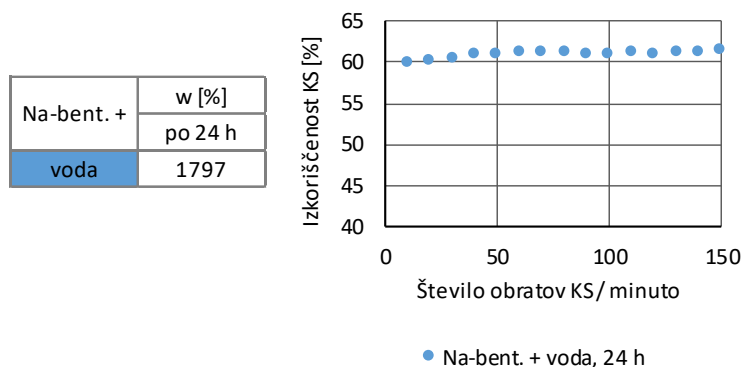
Slika 33: Izločanje porne raztopine med preiskavo reoloških lastnosti.

Na sliki 34 smo dodatno prikazali rezultate reoloških preiskav sveže in 48 ur stare suspenzije Ca-bentonita in vode, saj se je izkoriščenost sonde pri meritvah na istem vzorcu po dveh dneh povečala za več kot 20 %. Torej je s časom suspenzija postala bolj viskozna.



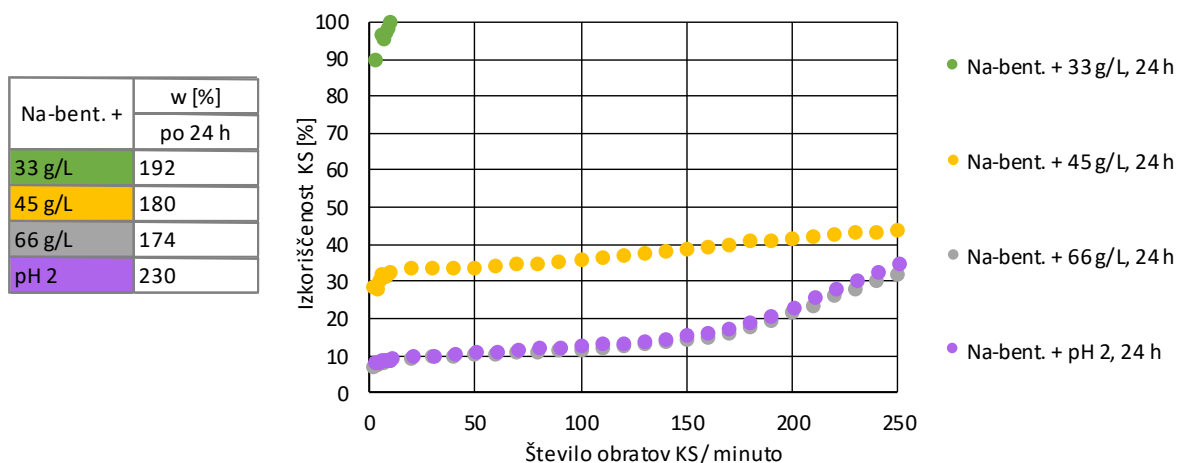
Slika 34: Rezultati reoloških preiskav sveže in 48 ur stare suspenzije Ca-bentonita in vode.

Opazimo, da je vlaga mešanice Na-bentonita in vode bistveno višja od vlage ostalih mešanic (Slika 35). Ustrezno konsistenco tega vzorca smo dosegli šele pri vlagi 1797 %, preostali vzorci z Na-bentonitom, pripravljene pri tej vlagi, pa so bili preredki in so izpadli iz merilnega območja. Suspenzije s preostalimi raztopinami smo zato pripravili pri vlagi 213 %, da so bile v ustreznem stanju za izvedbo preiskav reoloških lastnosti (Slika 36). Suspenziji Na-bentonita in vode ter Na-bentonita in raztopine s pH 5 sta bili pri tej vlažnosti bistveno pregosti za izvedbo meritev. Meritev pa smo lahko izvedli na vzorcu Na-bentonita in raztopine s pH 2 (Slika 36), kar pomeni, da nižji pH povzroči zmanjšanje viskoznosti suspenzije.



Slika 35: Rezultati reološke preiskave 24 ur stare suspenzije Na-bentonita pri vlažnosti 1797 %.

Na grafu na sliki 36 so rezultati meritev za suspenzijo Na-bentonita in solne raztopine koncentracije 33 g/L prikazani le v petih točkah, saj je bila izkoriščenost sonde pri višjih obratih presežena. Poleg tega na istem grafu opazimo, da je učinek slane raztopine koncentracije 66 g/L na zmanjšanje izkoriščenosti sonde primerljiv z učinkom kisle raztopine s pH 2.



Slika 36: Rezultati reoloških preiskav 24 ur starih suspenzij Na-bentonita.

Meritev reoloških lastnosti svežih mešanic Na-bentonita nismo izvedli zaradi sprotnega zgoščanja suspenzij v času aktivacije bentonita, ko je vzorec miroval 24 ur. Zaradi časovnih sprememb konsistenčnega stanja vzorcev bi bili rezultati take preiskave nesmiselni.

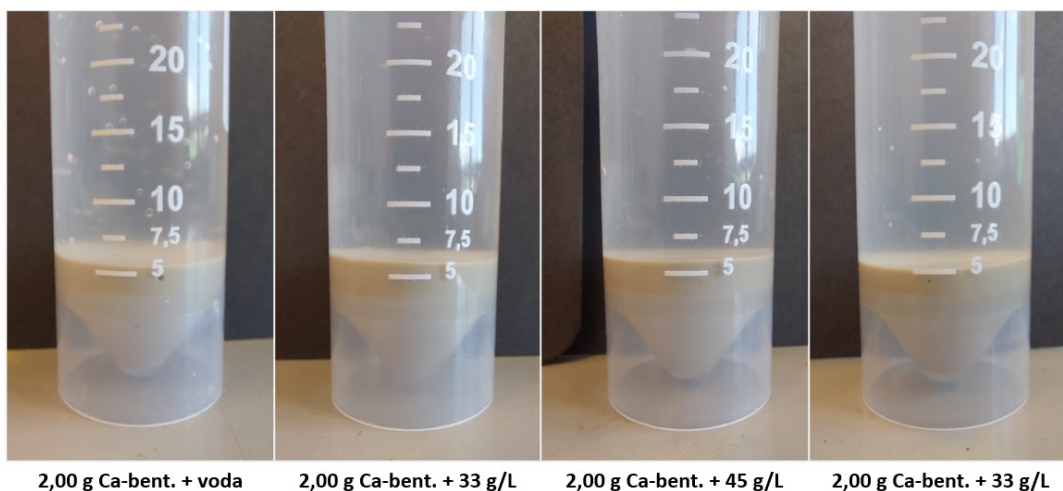
4.4 Nabrekanje

V preglednici 4 so zapisani rezultati nabrekanja Ca in Na-bentonita po standardni in po hitri metodi.

Preglednica 4: Rezultati meritev nabrekanja po 7 dneh.

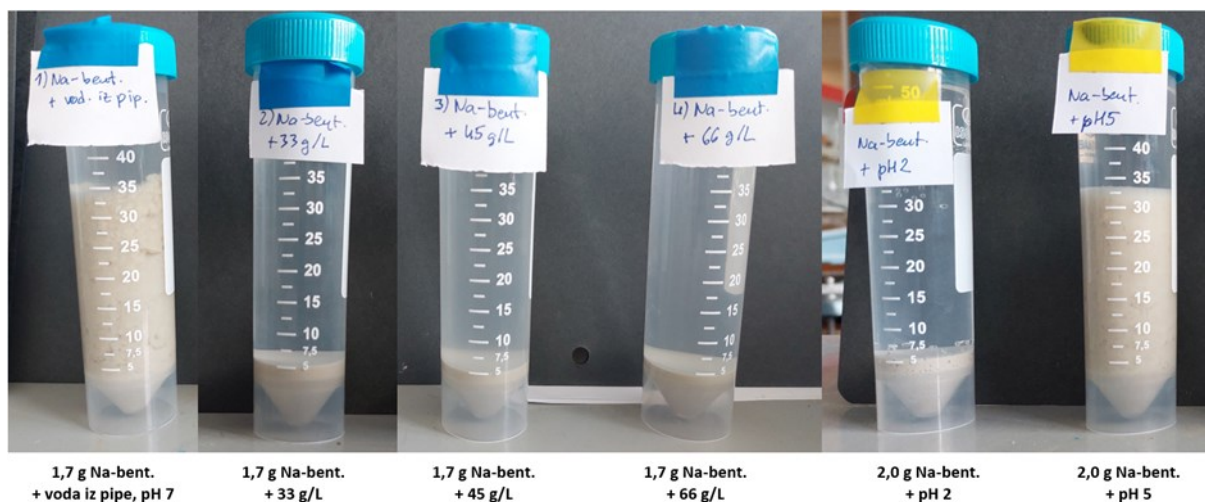
uporabljena metoda	vrsta bentonita	masa suhega bentonita [g]	masa tekočine [g]	rezultat po 7 dneh [mL]					
				voda	NaCl 33 g/L	NaCl 45 g/L	NaCl 66 g/L	pH 2	pH 5
ASTM standard	Ca-bent.	2,0	40	5.4	5.8	5.6	5.0	/	/
Hitra metoda	Ca-bent.	2,0	40	< 5	< 5	< 5	< 5	/	/
ASTM standard	Na-bent.	1,7	50	35	5	5	< 5	5.5	34
Hitra metoda	Na-bent.	2,0	40	21	5.2	5	< 5	< 5	20

Ugotovili smo, da Ca-bentonit nima nabrekalnega potenciala oz. je ta neznan (Slika 37 in Preglednica 4). Pri hitri metodi Ca-bentonit ni nabrekli niti do spodnje meje skale na centrifugirkah.



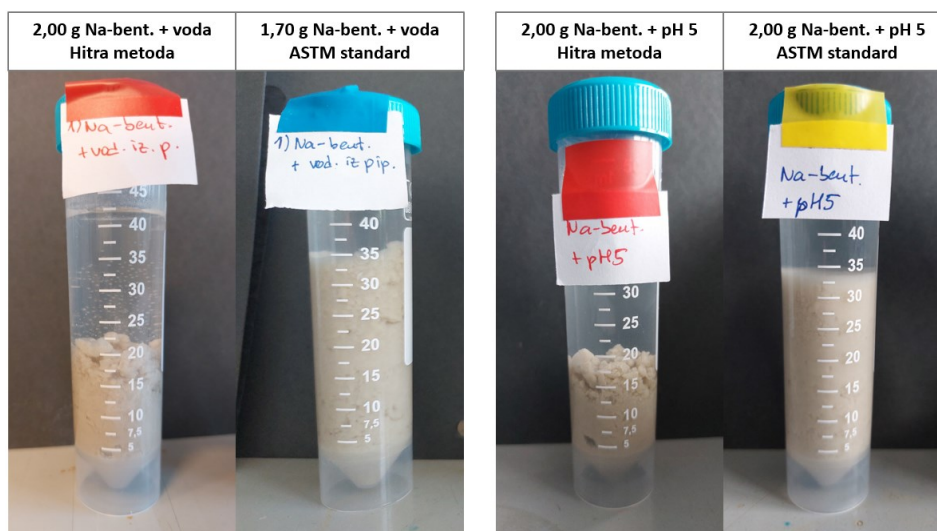
Slika 37: Nabrekanje Ca-bentonita po standardni metodi.

Glede na rezultate iz preglednice 4 in slike 38 lahko zapišemo, da povečana koncentracija soli v porni raztopini zmanjša nabrekalni potencial Na-bentonita. To smo zasledili tudi v pregledani literaturi. Do zmanjšanja nabrekalnega potenciala je prišlo tudi ob znižanju vrednosti pH. Pri opazovanju slike 38 moramo biti pozorni na različno maso bentonita v vzorcih.



Slika 38: Nabrekanje Na-bentonita po standardni metodi.

Če primerjamo standardno in hitro metodo, opazimo, da je bilo pri hitri metodi nabrekanje manjše (Slika 39). To se je najverjetneje zgodilo, ker vsa zrna bentonita niso prišla v stik s porno tekočino, saj je zgornji omočen bentonit tvoril neprepustno bariero.



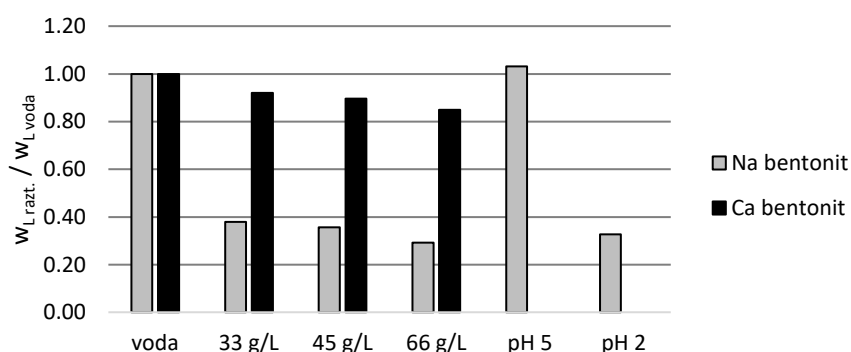
Slika 39: Primerjava nabrekanja Na-bentonita po standardni in po hitri metodi.

5 PRIMERJAVA REZULTATOV OPRAVLJENIH PREISKAV Ca IN Na-BENTONITA

Meja židkosti

Mejo židkosti, ki jo je Ca-bentonit dosegel s primešanjem navadne vode, je Na-bentonit dosegel pri vzorcu s koncentracijo soli 45 g/L. Aktivnost Na-bentonita je bila v primerjavi s Ca-bentonitom v okolju s koncentracijo soli 33 g/L in 45 g/L nekoliko višja. Pri višji koncentraciji soli v porni vodi, 66 g/L, pa se je razlika v obnašanju preiskanih bentonitov izničila.

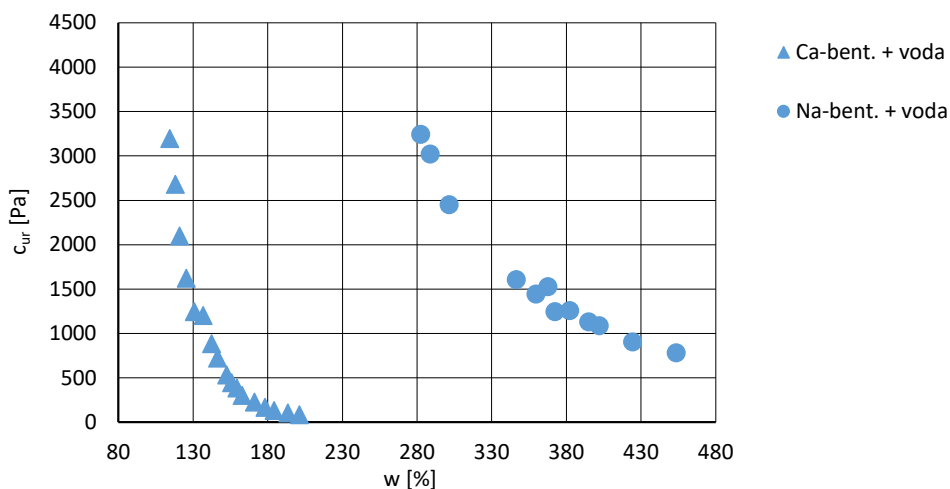
Podobno ugotavlja tudi Elmashad (2017), ko zapiše, da pri bentonitu z višjo mejo židkosti z vodo kot porno raztopino pride do izredno velike razlike v izmerjeni meji židkosti ob povečevanju koncentracije soli. Ta razlika je razvidna iz normiranega prikaza na sliki 40.



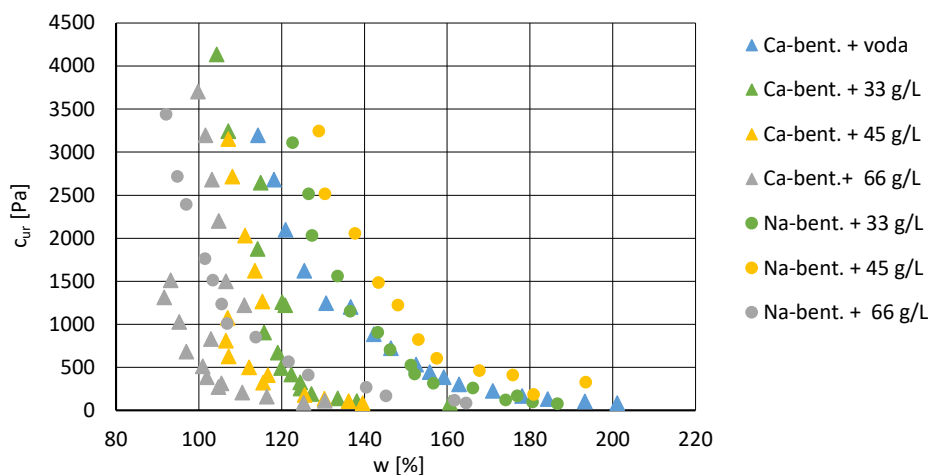
Slika 40: Normiran prikaz meje židkosti v odvisnosti od porne raztopine.

Nedrenirana strižna trdnost

Na-bentonit je sposoben doseči višjo nedrenirano strižno trdnost kot Ca-bentonit glede na vlažnost vzorca, kar je prikazano na slikah 41 in 42. Vzorec Na-bentonita, zamešan z raztopino s koncentracijo soli 33 g/L, je dosegel približno enako strižno trdnost kot Ca-bentonit, zamešan z vodo pri primerljivih vlažnostih. Pri visoki koncentraciji soli, 66 g/L, pa se je razlika med obnašanjem bentonitov izničila.



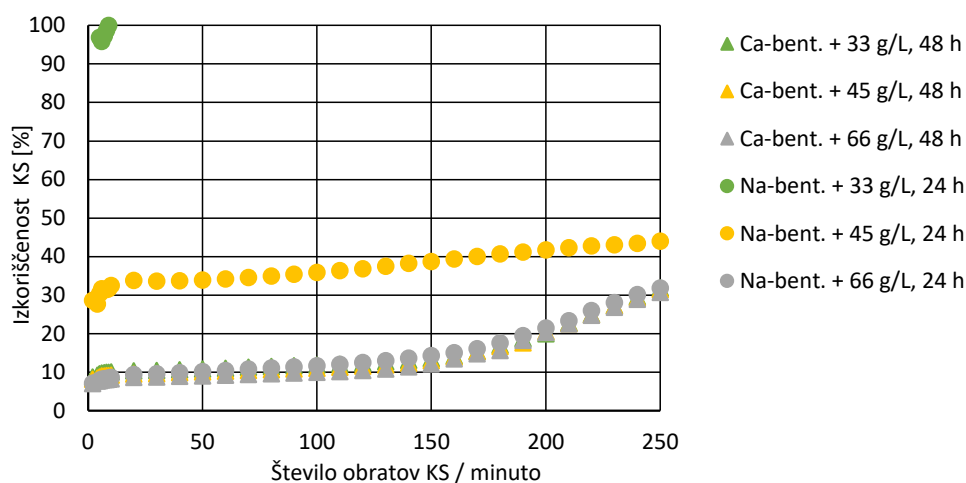
Slika 41: Nedrenirana strižna trdnost Ca in Na-bentonita zamešanih z vodo.



Slika 42: Nedrenirana strižna trdnost Ca in Na-bentonita pri različnih koncentracijah soli v porni tekočini.

Reološke lastnosti

Pri primerjavi rezultatov Na in Ca-bentonita moramo biti pozorni na različne časovne intervale izvedbe meritev. Opazimo pa, da je Na-bentonit že po enem dnevu pri vzorcih koncentracije soli 33 g/L in 45 g/L dosegel višje deleže izkoriščenosti krilne sonde kot Ca-bentonit po 48 urah pri enakih pornih tekočinah (Slika 43). Aktivnost Ca-bentonita in z njo posledično izkoriščenost krilne sonde, je že v stiku z manjšo koncentracijo soli (33 g/L) strmo upadla. Temu primerljive vrednosti smo zabeležili še pri vzorcih Ca-bentonita koncentracij soli 45 ter 66 g/L in pa pri vzorcu Na-bentonita zamešanega s porno raztopino koncentracije soli 66 g/L.



Slika 43: Primerjava rezultatov reoloških preiskav slanih suspenzij Na in Ca-bentonita.

Nabrekanje

Na-bentonit zamešan z vodo se je izkazal za izredno nabreklijivega, vzorci Na-bentonita, ki smo jih zamešali s slanimi raztopinami, pa so izgubili nabrekalni potencial (Preglednica 4). Pri slanih vzorcih Ca-bentonita smo opazili, da se je pri koncentracijah soli 33 in 45 g/L volumen nabreklega bentonita, v primerjavi s kontrolnim vzorcem z vodo, rahlo povečal. Ker pa gre za tako majhne spremembe in razlike v volumnu, lahko zapišemo, da ima Ca-bentonit, ne glede na vsebnost soli v porni raztopini, izredno nizek nabrekalni potencial. Pri vzorcih z Na-bentonitom, kjer smo spreminjali vrednost pH, se je z

nižanjem pH zmanjševal nabrekalni potencial. V primerjavi z učinkom soli na nabrekanje bentonita, je bilo zmanjševanje nabrekalnega potenciala ob nižaju pH bolj postopno.

6 ZAKLJUČKI

Tekom te naloge smo z laboratorijskimi metodami spoznali obnašanje dveh bentonitov – natrijevega in kalcijevega, v različno slanah oz. kislih okoljih. Z večanjem koncentracije soli sta se pri obeh bentonitih zmanjšali meja židkosti in nedrenirana strižna trdnost. Z zadržkom zaradi izločanja raztopine med izvedbo meritev, lahko zapišemo, da se je z višanjem koncentracije soli zmanjševala tudi viskoznost suspenzij. Ca-bentonit se je izkazal za izredno nenabreklijiv tip bentonita, medtem ko smo morali pri Na-bentonitu zaradi intenzivnega nabrekanja prilagoditi standardiziran poskus. Sorazmerno s povečanjem koncentracije soli je pri Na-bentonitu nabrekanje strmo upadlo.

Meji židkosti vzorca Na-bentonit + pH 5 in Na-bentonit + voda sta bili primerljivi. Ko pa smo meritve izvedli na vzorcu s pH 2, je meja židkosti občutno padla. Enako obnašanje smo opazili pri nedrenirani strižni trdnosti. Reološke preiskave niso dale povsem zadovoljivih rezultatov zaradi težavnosti izvedbe meritev, ki so posledica velikega razpona vrednosti strižne odpornosti vseh pripravljenih vzorcev. Pri meritvah nabrekanja je nabreklijivost padala z zniževanjem pH-ja.

Generalno je Na-bentonit dosegel višje vrednosti meje židkosti, nedrenirane strižne trdnosti, izkoriščenosti krilne sonde pri reoloških preiskavah in se izkazal za izrazito bolj nabreklijivega. Pri najvišji koncentraciji soli v porni tekočini, 66 g/L, pa so se razlike med Ca in Na-bentonitom zmanjšale oz. izničile.

To sicer ni bil predmet naše naloge, vendar smo ugotovili, da ima na lastnosti bentonita izredno velik vpliv tudi časovna komponenta. Glede na to, da smo pri pripravi vzorcev opazili časovno spreminjanje (nabrekanje, sprememba konsistence) bentonita, bi veljalo preiskave ponoviti v enakih časovnih intervalih od priprave vzorcev. Na ta način bi se izognili vplivom časovno pogojenih lastnosti vzorcev. Z izvedbo meritev po različnih časih od priprave vzorcev (npr. 24 ur, 48 ur, 7 dni, 14 dni ...) pa bi lahko tudi spremljali spremenljivost lastnosti materiala.

Opravljenе meritve so pokazale, da ne moremo pričakovati enakega obnašanja bentonita v različno slanah oz. kislih okoljih. Pred uporabo bentonita v geotehniki je torej smiselno izvesti preiskave za ugotavljanje lastnosti bentonita ob izpostavitvi določenim pogojem. Za dobro indikativno preiskavo se je izkazala standardna metoda merjenja nabrekanja. Z njo lahko ugotovimo, kakšen je nabrekalni potencial bentonita v izbranih pogojih, hkrati pa beležimo tudi čas nabrekanja. S tem lahko predvidimo spremembo volumna bentonita in hitrost nabrekanja. Preiskava reoloških lastnosti je razmeroma preprosta za izvedbo, omogoča pa tudi dober vpogled v časovno spreminjanje lastnosti bentonita. Smiselno jo je izvesti po tem, ko ugotovimo, kakšna je meja židkosti. Ti dve preiskavi bi bilo potrebno opraviti pred izkopom jarkov, da ugotovimo, v kakšnem razmerju je potrebno zamešati suspenzijo za mazanje vrtnalnih glav in koliko časa mora preteči od zamešanja pa do uporabe. Z reometrom lahko dodatno preverimo, če je nedrenirana strižna trdnost bentonita zadostna za podpiranje sten izkopenega jarka. Na podoben način lahko na primer ugotovimo, kakšna suspenzija bo ustrezala pogojem za bentonitni obrizg pri predorogradnji.

Ob koncu naloge lahko zapišemo, da je bentonit v smislu spreminjanja lastnosti v različno slanah oz. kislih okoljih izredno dinamičen material. Koristno je odkritje, da te spremembe niso naključne, temveč

sledijo nekim trendom zaradi česar lahko predvidimo obnašanje materiala. Zavedati pa se moramo, da lastnosti variirajo tudi v odvisnosti od vrste bentonita, zato je preiskave potrebno opraviti za vsako vrsto bentonita, ki ga želimo uporabiti.

VIRI

ASTM. 2011. Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners, D5890-11. ASTM International.

BentoniteSA. 2017. Principle of Sealing With Bentonite. <https://www.bentonitesa.co.za/principle-of-sealing-with-bentonite/>. (Pridobljeno 15. 7. 2023.)

BENTOPRODUCT. 2020. <https://bentoproduct.ba/en/gradevinska-industrija/>. (Pridobljeno 16. 8. 2023.)

Britannica. 2023. Bentonite". 2023. <https://www.britannica.com/science/bentonite>. (Pridobljeno 16. 8. 2023.)

Brookfield. Engineering Laboratories. 2014. More solutions to sticky problems. Middleboro.

C. C. Harvey in G. Lagaly. 2013. „Chapter 4.2 - Industrial Applications“. V Developments in Clay Science, uredil Faïza Bergaya in Gerhard Lagaly, 5:451–90. Handbook of Clay Science. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098259-5.00018-4>. (Pridobljeno 8. 8. 2023.)

Chaves, L. H. G. (ur), Tito, G. A. (ur). 2017. Bentonite Application in the Remediation of Zinc Contamination Soil. Chemical Engineering Transactions, vol. 58, 745-750. <https://www.aidic.it/cet/17/58/125.pdf>. (Pridobljeno 8. 8. 2023.)

Dehn, J., McNutt, S. R.. 2015. Chapter 74 - Volcanic Materials in Commerce and Industry. The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition): 1285-1294. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/bentonite>. (Pridobljeno 1. 6. 2023.)

Dutta, J., Mishra, A. K. 2015. A study on the influence of inorganic salts on the behaviour of compacted bentonites. Applied Clay Science, 116–117: 85–92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131715300855>. (Pridobljeno 21. 3. 2023.)

Elmashad, M. E., Ata, A. A. 2016. Effect of seawater on consistency, infiltration rate and swelling characteristics of montmorillonite clay. HBRC Journal, 12: 175–180. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404814001035>. (Pridobljeno 21. 3. 2023.)

Harvey, C. C.; Lagaly, G. 2013. Chapter 4.2 – Industrial Applications. Developments in Clay Science, Volume 5: 451-490. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080982595000184>. (Pridobljeno 26. 8. 2023.)

Köster, M. 2015. Travelinggeologist: Bentonite formation in Bavaria with Mathias Köster. <https://www.travelinggeologist.com/2015/06/bentonite-formation-in-bavaria-with-mathias-koster/>. (Pridobljeno 1. 6. 2023.)

Nored, G. (Aneyefortexas). 2012. Colors of bentonite. <https://aneyefortexas.wordpress.com/2012/03/22/colors-of-bentonite/>. (Pridobljeno 26. 3. 2023.)

Patni, H. 2021. UnivDatps: Rising energy demand leading to large drilling activities is likely to propel bentonite market. <https://univdatos.com/bentonite-market/>. (Pridobljeno 15. 7. 2023.)

Simandl, G. 2009. NONMETALLIC MINERALS OTHER THAN COAL: Industrial minerals, gemstones and aggregate in British Columbia, Canada. The Papers, 02: str. 11. https://www.researchgate.net/publication/242618368_Nonmetallic_minerals_other_than_coal_Industrial_minerals_gemstones_and_aggregate_in_British_Columbia_Canada. (Pridobljeno 15. 7. 2023.)

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin. Del 1, Ugotavljanje vlažnosti.

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin. Del 12, Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti.

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-6:2004/AC:2010. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin. Del 6, Preskus s konusom.

Smolar, J. Prepoznavanje lastnosti in trajnostno upravljanje s sedimenti iz vodnih okolij. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=87684>. (Pridobljeno 26. 3. 2023.)

Sutherland, W. M. 2014. Wyoming Bentonite. <https://www.wsgs.wyo.gov/products/wsgs-2014-bentonite-summary.pdf>. (Pridobljeno 26. 3. 2023.)

Tito, G. A. (ur), Chaves, L. H. G. (ur), Feitosa de Vasconcelos, A. C. (ur), idr. 2016. Bentonite application in the remediation of copper contaminated soil. Academic Journals, vol. 11(14), 1218-1226. https://www.researchgate.net/publication/301624920_Bentonite_application_in_the_remediation_of_copper_contaminated_soil. (Pridobljeno 8. 8. 2023.)

Wayne, A. 2021. GCL at Wentworth Waste lagoons. <https://www.geosynthetics.com.au/gcl-at-wentworth-waste-lagoons>. (Pridobljeno 7. 9. 2023.)

Ying, Z. (ur), Cui, Y. (ur), Duc, M. (ur), idr. 2021. Salinity effect on the liquid limit of soils. Acta Geotechnica, 16: 1101–1111. https://www.researchgate.net/publication/346401632_Salinity_effect_on_the_liquid_limit_of_soils. (Pridobljeno 21. 3. 2023.)