

# Et Laboratoriestudie på Hviletrykkskoeffisientens Utvikling under Kryp for både Uforstyrret og Omrørt, Rekonsolidert Tillerleire

Bård Arvid Gjengstø

Geotechnics and Geohazards Innlevert: juli 2016 Hovedveileder: Gustav Grimstad, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet Institutt for bygg, anlegg og transport



#### NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

Oppgavens tittel: Et Laboratoriestudie på Hviletrykkskoeffisientens Utvikling under Kryp for både Uforstyrret og Omrørt, Bakonsolidert Tillerleire	Dato: 31.07.2016 Antall sider (inkl. bilag): 110			
for bade offorstynet og Onnørt, Kekonsondert finenene	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave	
Navn:				
Bård Arvid Gjengstø				
Faglærer/veileder:				
Gustav Grimstad				
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:				

#### Ekstrakt:

For å løse mange geotekniske problemer er det nødvendig med antagelser om hvilke initielle spenningstilstander jorden er påvirket av. Forholdet mellom horisontal og vertikal effektiv spenning beskrives med jordtrykkskoeffisienten  $K_0$  og ved noe kunnskap om jordtype og lasthistorie kan en verdi for  $K_0$  ofte velges basert på observasjoner eller den indre friksjonsvinkelen for jorden. Det er  $K_0^{NC}$  som brukes i modellering både for å bestemme spenningsnivået in situ og anisotropien til jorden ved å rotere flytekurven.

Kryp fører til en uekte økning i prekonsolideringsspenningen og ekte overkonsoliderte leirer kan ha en K<sub>0</sub>-verdi på over 1, mens den samme verdien for normalkonsoliderte leirer varierer typisk mellom 0,4 og 0,6. Det er gjort flere forsøk på hvordan K<sub>0</sub> utvikler seg under kryp med sprikende resultater der det viser seg at verdien kan både øke, synke og være konstant over tid.

Under forsøkene vil det være viktig at utstyret står i et temperaturkontrollert rom for å unngå feilkilder da sensorene og membranene i ødometeret er svært følsom for temperatursvingninger.

Det er viktig å påpeke at splittet ring ødometeret ble overbelastet under prøveforsøkene og reparasjonen av apparatet ikke ga vellykkete resultater som har påvirket datagrunnlaget i rapporten.

Det ble utført totalt tre forsøk med splittet ring ødometeret. Det første forsøket på uforstyrret leire ga ubrukelige resultater da toppfilteret tørket ut og sugde alt porevannet ut av leirprøven. De to neste forsøkene var på henholdsvis omrørt, rekonsolidert leire og uforstyrret leire. Resultatene fra disse var noe vanskelig å tolke da tallverdiene ble vurdert til å ikke være pålitelige.

For Split Ring 2, som er det omrørte og rekonsoliderte forsøket, hadde utvikling av  $K_0$ ' under krypfasen ikke endret seg på over 7 døgn. Mot slutten av dette forsøket startet  $K_0$ ' å øke relativt hurtig.

For Split Ring 3 øker  $K_0$ ' hele veien gjennom krypfasen, men hastigheten på økningen avtar i større grad desto lengre ut i forsøket en undersøker.

Forsøket som skulle gjøres som ødotreaksial ble ikke gjennomført på grunn av problemer med forsøksapparatet.

Uten mulighet til å vurdere tallverdiene kan det konkluderes, med noe usikkerhet på grunn av krypoppførselen i membranene og lavt datagrunnlag, at  $K_0$ ' for Tillerleire fra dybden ca. 2,5 meter øker under kryp både ved pålasting på uforstyrret leire og ved pålasting på omrørt, rekonsolidert leire.

Stikkord:

1. Jordtrykkskoeffisitent

2. Splittet Ring Ødometer

3. Kryp

4. Ødotreaksial

### Forord

Denne rapporten er den avsluttende masteroppgaven utført det siste semesteret ved sivilingeniørstudiet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet og teller 30 studiepoeng i utdanningsplanen. Valg av oppgave er frivillig og denne er utarbeidet sammen med veileder Gustav Grimstad som kom opp med idéen. Oppgaven er valgt av eget ønske om å få jobbe praktisk med faget og skal gi innsikt og fordypning i det aktuelle emnet.

Arbeidet med oppgaven har vært spennende og lærerikt, men samtidig til dels frustrerende på grunn av svikt i laboratorieutstyret. Arbeidet har gitt et godt innblikk i laboratoriearbeid og tolkning av resultatene samt teorien bak forsøkene.

Jeg ønsker å takke veilederen min Gustav Grimstad sammen med professorene Gudmund Eiksund og Steinar Nordal for god hjelp og veiledning. På laboratoriet ønsker jeg å takke Per Østensen for hjelp til det tekniske ved utstyret og Helene Kornbrekke for veiledning til utføring av forsøkene. Også takk til Espen Andersen, som reparerte splittet ring ødometeret, Tage Westum, som laget utstyret for rekonsolidering, og Karl Ivar Volden Kvisvik, som hjalp til på laboratoriet. Til slutt ønsker jeg å takke medstudentene Ole Johan Quarsten, Lars Gudmund Botnen og Matthew Adamson for godt samarbeid og god stemning på laboratoriet.

### Sammendrag

For å løse mange geotekniske problemer er det nødvendig med antagelser om hvilke initielle spenningstilstander jorden er påvirket av. Forholdet mellom horisontal og vertikal effektiv spenning beskrives med jordtrykkskoeffisienten K<sub>0</sub> og ved noe kunnskap om jordtype og lasthistorie kan en verdi for K<sub>0</sub> ofte velges basert på observasjoner eller den indre friksjonsvinkelen for jorden. Det er  $K_0^{NC}$ som brukes i modellering både for å bestemme spenningsnivået in situ og anisotropien til jorden ved å rotere flytekurven.

Kryp fører til en uekte økning i prekonsolideringsspenningen og ekte overkonsoliderte leirer kan ha en K<sub>0</sub>-verdi på over 1, mens den samme verdien for normalkonsoliderte leirer varierer typisk mellom 0,4 og 0,6. Det er gjort flere forsøk på hvordan K<sub>0</sub> utvikler seg under kryp med sprikende resultater der det viser seg at verdien kan både øke, synke og være konstant over tid.

Under forsøkene vil det være viktig at utstyret står i et temperaturkontrollert rom for å unngå feilkilder da sensorene og membranene i ødometeret er svært følsom for temperatursvingninger.

Det er viktig å påpeke at splittet ring ødometeret ble overbelastet under prøveforsøkene og reparasjonen av apparatet ikke ga vellykkete resultater som har påvirket datagrunnlaget i rapporten.

Det ble utført totalt tre forsøk med splittet ring ødometeret. Det første forsøket på uforstyrret leire ga ubrukelige resultater da toppfilteret tørket ut og sugde alt porevannet ut av leirprøven. De to neste forsøkene var på henholdsvis omrørt, rekonsolidert leire og uforstyrret leire. Resultatene fra disse var noe vanskelig å tolke da tallverdiene ble vurdert til å ikke være pålitelige.

For Split Ring 2, som er det omrørte og rekonsoliderte forsøket, hadde utvikling av K<sub>0</sub>' under krypfasen ikke endret seg på over 7 døgn. Mot slutten av dette forsøket startet K<sub>0</sub>' å øke relativt hurtig.

For Split Ring 3 øker K<sub>0</sub>' hele veien gjennom krypfasen, men hastigheten på økningen avtar i større grad desto lengre ut i forsøket en undersøker.

Forsøket som skulle gjøres som ødotreaksial ble ikke gjennomført på grunn av problemer med forsøksapparatet.

Uten mulighet til å vurdere tallverdiene kan det konkluderes, med noe usikkerhet på grunn av krypoppførselen i membranene og lavt datagrunnlag, at K<sub>0</sub>' for Tillerleire fra dybden ca. 2,5 meter øker under kryp både ved pålasting på uforstyrret leire og ved pålasting på omrørt, rekonsolidert leire.

### **Summary**

To solve many geotechnical problems it is necessary to assume at which initial stress state the soil is at. The relationship between horizontal and vertical effective stress is described by the earth pressure coefficient  $K_0$  and with some knowledge about soil type and load history, a value of  $K_0$  can be chosen based on prior observations or the internal friction angle. To model the soil, both for determining in situ stress level and to represent the anisotropy in the soil by rotating the yield surface, one uses the  $K_0^{NC}$ .

Creep causes a quasi-increase preconsolidation stress and true overconsolidated clays may have a  $K_0$ -value well above 1, while the same value for normal consolidated clays may vary between 0,4 and 0,6. Several experiments on the development of  $K_0$  during creep are done with inconsistent results in total.  $K_0$  is found to increase and decrease as well as be constant.

During the laboratory experiments, it is important that the equipment is placed in a temperaturecontrolled room to avoid errors because of the sensors and membrane in the oedometer is very sensitive to temperature fluctuations.

It is important to point out that the split ring oedometer was overloaded during trial testing and that the repair of the apparatus did not give successful results that have influenced the recorded data in this report

It was conducted three tests with the split ring oedometer. The first test was done on undisturbed clay and gave useless results because the top filter dried out and then drained the sample. The next two tests was done on remoulded, reconsolidatet clay and undisturbed clay. The results from these tests was hard to interpret because the numbers in the results was considered not reliable.

The second test on remoulded and reconsolidated clay the development of  $K_0'$  was absent during more than 7 days. At the end of the this test  $K_0'$  begun to increase rapidly.

The last test  $K_0'$  increased during the whole creep phase, but the increase speed decreases during the test.

The oedotriaxial test could not be conducted because of problems with the apparateus.

Without the opportunity to evaluate the numbers it can be concluded, with some uncertainties because of creep behavior in the membrane and low amount of data recorded, that  $K_0$ ' for Tiller clay from the depth about 2,5 meters increases during creep both with loading on undisturbed clay and loading on remoulded, reconsolidatet clay.

## Innhold

Fo	orord		I			
Sa	mmeno	ndrag	111			
Su	ımmary	у	V			
In	nhold		VII			
Fi	gurliste	e	XI			
Та	belliste	e	XV			
Sy	mbollis	iste	XVII			
Fo	orkortel	elser	XIX			
1	Innle	ledning	1			
	1.1	Bakgrunn og formål	1			
	1.2	Omfang og begrensning av arbeidet	1			
	1.3	Rapportens oppbygging	2			
	1.4	Spesielle forhold	2			
2	Teor	pri				
	2.1	Leirens egenskaper	3			
	2.1.1	.1 Generelt				
	2.1.2	.2 Spenning-Tidshistorikk	3			
	2.1.3	.3 Spenningssti	5			
	2.1.4	.4 Struktur	7			
	2.1.5	.5 Effekt av Temperatur og Tøyningshastighet	8			
	2.2	Horisontalt Jordtrykk	11			
	2.2.1	.1 Generelt	11			
	2.2.2	.2 Jordtrykkskoeffisienten K <sub>0</sub>	11			
	2.2.3	.3 K <sub>0</sub> i Krypfasen	13			
	2.2.4	.4 Tidligere undersøkelser for K <sub>0</sub> i Krypfasen	13			
	2.2.5	.5 Vurdering av in situ Spenningsforhold	17			
	2.2.6	.6 Mikrostruktur	18			
	2.3	Kontinuerlig Ødometer	18			
	2.3.1	.1 CRS	19			
	2.3.2	.2 Teori	19			
3	Split	ittet Ring Ødometer	21			
	3.1	Overbelastning og reparasjon av membranen på sidestykkene	21			
	3.2	Utstyr	3.2 Utstyr			

	3.3	Prosedyre		22
	3.4	Kalibrering a	av Splittet Ring Ødometer	24
4	Labo	ratoriet		27
	4.1	Tidligere un	dersøkelser av leirmaterialet	27
	4.1.2	Prøveta	aking	27
	4.1.2	Leirens	Aktivitet	28
	4.2	Forsøk		28
	4.3	Treaksialfor	søk	29
	4.3.2	. Appara	ıtur	29
	4.3.2	Ødotre	aksialforsøk	29
	4.4	Ødometer		30
	4.4.2	. Utstyr (	og Prosedyre	30
	4.4.2	Vurder	ing av prøveforstyrrelse	31
	4.5	Rekonsolide	ring av omrørt prøve	32
	4.5.2	Utstyr.		32
	4.5.2	Prosed	yre	33
	4.6	Temperatur	endinger	35
5	Resu	ltater		37
	5.1	Kalibrering .		37
	5.2	Resultater fi	ra indekstesting	37
	5.3	CRS Ødome	ter	41
	5.4	Splittet Ring	; Ødometerforsøk	43
	5.4.2	. Split Ri	ng 1 - Uforstyrret CRS - 250 kPa	43
	5.4.2	Split Ri	ng 2 - Omrørt CRS - 100 kPa	45
	5.4.3	Split Ri	ng 3 - Uforstyrret CRS - 250 kPa	47
	5.5	Ødotreaksia	ıl	49
	5.6	Prøvekvalite	٤t	50
	5.7	Spenningsav	vhengighet for $K_0'$ (Stress Dependency of $K_0'$ )	50
	5.8	Struktur		51
	5.9	Påvirkning a	$_{\rm IV}$ K_0' ved valg av parametre	52
6	Kon	lusjon og Vi	dere arbeid	55
	6.1	Oppsumme	ring og Konklusjon	55
	6.2	Anbefalinge	r til forbedringer og Videre arbeid	55
7	Kilde			57

Vedlegg A – Utledning av Smith og Wahls (1969) Matematiske Modell	. 61
Vedlegg B – Inndeling av prøvesylinder	. 65
Vedlegg C – Skjema for indekstesting	. 67
Vedlegg D – Kornfordelingskurver	. 69
Vedlegg E – Kalibrering av Split Ring radielle trykksensorer	. 71
Vedlegg F – Temperaturstabilitet med og uten isoporkasse	. 73
Vedlegg G – Bilder av innbyggingsprosedyre Splittet Ring Ødometer	. 75
Vedlegg H – Resultater fra Split Ring Ødometerforsøk	. 77
Vedlegg I – Bilder av innbyggingsprosedyre for Ødometer	. 83
Vedlegg J – Resultater fra Ødometerforsøk	. 85

## Figurliste

Figur 1: Struktur i sedimentert leire, venstre: i saltvann, høyre: i ferskvann (Aarhaug, 1984)
Figur 2: -a- Konsolideringshistorieb- Egenskapenes grenseverdier for en naturlig leire (Leroueil og
Tavenas, 1987) 4
Figur 3: Flytekurver for naturlige leirer gruppert etter friksjonsvinkel. Samlet og gruppert av
$\mathbf{E}_{\mathbf{r}} = \mathbf{r} + $
Figur 4: Spenningssti fra ødometerforsøk på bløt leire og to sedimenterte bergarter (Janbu, 1995) 6
Figur 5: Mulig forskjell i effektiv spenningssti i laboratorie- og in situ KU-lasting (Lansivaara, 1999) 6
Figur 6: Spenningssti ved førstegangs pålasting, avlasting og pålasting på nytt (Mayne og Kulhawy,
1982)
Figur 7: Ødometerforsøk på uforstyrret og rekonstruert leire fra Gøteborg fra 5 m dybde
sammenlignet med ICL og SCL fra Burland (1990). (Olsson 2013) 8
Figur 8: Effekt av temperaturendringer mot volumendringer for mettet Illitt (Michell, 1993, original data fra Campanella og Mitchell, 1968)
Figur 9: Effekt av forskjellige tøvningshastigheter i en «effektivspenning mot tøvning»-graf på leire fra
Bäckehol (Sällfors 1975)
Figur 10: Effekten av (a) tøvningshastighet og (b) temperatur nå flytekurven for Berthierville leire
(Boudali, 1995, hentet fra Leroueil, 2006
Figur 11: Kileformet fylling som viser forholdet mellom K₀ langs OC og fullt mobilisert friksionsvinkel
(n i ABO (Michalowski 2005)
Figur 12: Utvikling av KO over tid (Kavazanijan og Mitchell 1984)
Figur 13: Utvikling av Ko over tid for både uforstyrret og omrørt leire (Jamiolkowski et al. 1985) 15
Figur 14: Utvikling av K0 over tid med svingninger i temperatur (Holtz, Jamiolkowski og Jancellotta
Figur 15: Litvikling av K. over tid for 4 forskiellige leirer (Mesri og Castro, 1087)
Figur 16. Simularing av K0 mod forekjellig fosong nå kornene ved lesting (start mod K0 mollom 0.5 og
Figur 16: Simulering av Komed forskjeling fasong på komene ved fasting (start med Komenon 0,5 og
0,6) og avlasting (Avsluttet med Ku över 0,8) för enakslatt trykkförsøk (knan et al., 2014)
Figur 17: Forenkiet tverrsnitt av ødometer med splittet ring (Senneset, 1989)
Figur 18: -a- Messingplate med vanlig gummibaliongb- Messingplaten over splittet ring ødometer
c- Stalsylinder med hull til saranslanged- Splittet ring ødometer, messingplate og stalsylinder
montert i pressen klar til kalibreringe- Trykkalibreringsenhet.
Figur 19: Prinsippskisse av apparat for treaksialforsøk (Vegdirektoratet, 2014)
Figur 20: Prinsippskisse for spenningsstien til et ødotreaksialforsøk (NTNU, 2014) 30
Figur 21: -a- Utstyret: Plastrør høyde 13 cm og diameter 74-74,5 mm (1), Plastikkdeksel til tetting av
bunn (2), Stempel (3), Styrestag (4), Toppstykket som holder staget vertikalt (5), Papirfiltre (6)b-
Stativet med montert sylinderc- Nærbilde av montert sylinderd- Nytt papirfilter i bunnen
montert. Revnen i filteret hadde ingen betydning for tettingen
Figur 22: -a- Ferdig innbygd prøveb- Ferdig innbygd prøve plassert i stativc- Innpakket i plast med
vekter på toppen
Figur 23: -a- Prøven som skulle rekonsolideresb- Sikting av omrørt prøvec- Ferdig slurryd-
Humusrester i siktet
Figur 24: -a- Utpresset vann på toppen av prøvenb- Toppen av prøven etter utpresset vann er tømt
avc- Bunnen måtte kappes av for å få presset ut prøvend- Ferdig utpresset prøve med noen
forstyrrelser langs sidene fra utpressingen
Figur 25: K <sub>0</sub> ' over tid med store variasjoner (Sletten, 2015)

Figur 26: Isoporkassen som ble laget for å holde temperaturen mest mulig konstant. Nederst sees	
luken for å kunne kontrollere forsøket inne i kassen	36
Figur 27: -a- Montering av sylinder før utpressing av prøveb- Utpressing av prøve	38
Figur 28: Utpressed prøve delt i tre med dybder -a- fra 2,03 m til 2,23 m, -b- fra 2,23 m til 2,53 m, -c	C-
fra 2,53 m til 2,80 m	39
Figur 29: -a- Humus i leirenb- størrelse på noen av humus- og skjellrestene som er funnet	39
Figur 30: Brent leire for undersøkelse av humusinnhold	41
Figur 31: Spenning-tøyningskurve for alle ødometerforsøk	42
Figur 32: K <sub>0</sub> ' - Tid - Splittet ring ødometer 1	44
Figur 33: Horisontal - Vertikalspenning - Splittet ring ødometer 1	44
Figur 34: Vertikalspenning - Tøyning - Splittet ring ødometer 1	45
Figur 35: Bilde av prøven fra Split Ring 2 etter den er tatt ut fra apparatet. Merk inntrykkingen ved t	tre
plasser hvor prøven ble hentet ut ved hjelp av fingrene	46
Figur 36: K <sub>0</sub> ' - Tid - Splittet ring ødometer 2	46
Figur 37: Horisontal - Vertikal effektivspenning - Splittet ring ødometer 2	47
Figur 38: Vertikal effektivspenning - Tøyning - Splittet ring ødometer 2	47
Figur 39: K <sub>0</sub> ' - Tid - Splittet ring ødometer 3	48
Figur 40: Horisontal - Vertikal effektivspenning - Splittet ring ødometer 3	48
Figur 41: Vertikal effektivspenning - Tøyning - Splittet ring ødometer 3	49
Figur 42: -a- Tilskjæring av prøveb- Humus i prøven	50
Figur 43: -a- Ferdig tilskjært prøve i vugge med to tydelige laginndelinger i leirenb- Ferdig innbygd	Ł
prøve i treaksialcelle	50
Figur 44: K <sub>0</sub> ' plottet mot normalisert spenning	51
Figur 45: Et backscatter bilde (bilde tatt ved refleksjon av bølger eller partikler) ved bruk av EPMA	
skanning av Tillerleire. Her vises tre forskjellige grader av forstørrelse med identifikasjon av utvalgte	e
mineralerkorn (Gylland et. al., 2013)	52
Figur 46: -a- Illustrering av volumendring for prøver med kant mot flate struktur og flate mot flate	
struktur	53
Figur 47: Poretrykket fordelt som en parabel over prøvehøyden i et CRS-forsøk. (Ramberg, 2009)	63
Figur 48: Inndeling av prøvesylinder	65
Figur 49: Resultater for indekstesting	67
Figur 50: Kornfordelingkurver	69
Figur 51: Kalibrering av Splittet Ring Ødometer	71
Figur 52: K <sub>0</sub> ′/Temperatur – Tid målt uten isoporkasse på kjølerom. Merk hvordan K <sub>0</sub> ′ følger	
temperaturendringene i distinkte områder	73
Figur 53: Temperatur - Tid målt med isoporkasse på kjølerom.	73
Figur 54: -a- Tilskjæring av prøveb- Ferdig tilskjærte siderc- Ferdig avrettet bunnd- Bunnfilter i	på
plass med silikontettingsmasse og vannfilm i bunne- Prøve plassertf- Chuck strammet og topp p	วå
prøve ferdig trimmetg- Toppfilter på plass, mangler toppstykke og plassering i pressenh- Kopp	
med vann for å øke luftfuktigheten. Nylontråder skaper kapillært sug av vann slik at toppfilter ikke	
tørker uti- Ferdig innpakket ødometer i plast. Se Figur 26 for bilde av isoporkassen	75
Figur 55: Spenninger - Tid - Splittet ring ødometer 1	77
Figur 56: K <sub>0</sub> '/Temperatur - Tid - Splittet ring ødometer 1	77
Figur 57: Tøyning - Tid - Splittet ring ødometer 1	78
Figur 58: Spenningssti - Splittet ring ødometer 1	78

Figur 59: Spenninger - Tid - Splittet ring ødometer 2 79
Figur 60: K <sub>0</sub> '/Temperatur - Tid - Splittet ring ødometer 2
Figur 61: Tøyning - Tid - Splittet ring ødometer 2 80
Figur 62: Spenningssti - Splittet ring ødometer 2 80
Figur 63: Spenninger - Tid - Splittet ring ødometer 3 81
Figur 64: K <sub>0</sub> '/Temperatur - Tid - Splittet ring ødometer 381
Figur 65: Tøyning - Tid - Splittet ring ødometer 3
Figur 66: Spenningssti - Splittet ring ødometer 3 82
Figur 67: -a- Prøve klar til å presses inn i ringenb- Prøve presset inn og første trimming fra midten
og ut unnagjortc- Trimming av bunn ferdigd- Plassering av platee- Stativet snudd opp nedf-
Trimming av topp ferdigg- Prøven montert i ødometereth- Prøven låses fast og toppstykket
plasseresi- Prøven kjøres til kontakt med lastmåleren før forsøket kan settes i gang
Figur 68: Spenning - Tøyning Ødometer 1 86
Figur 69: Spenning - Modul - Ødometer 1 86
Figur 70: Spenning - Poretrykk - Ødometer 1
Figur 71: Spenning - Cv - Ødometer 1 86
Figur 72: Spenning - Tøyning - Ødometer 2
Figur 73: Spenning - Modul - Ødometer 287
Figur 74: Spenning - Poretrykk - Ødometer 287
Figur 75: Spenning - Cv - Ødometer 2 87
Figur 76: Spenning - Tøyning - Ødometer 3 88
Figur 77: Spenning - Modul - Ødometer 3 88
Figur 78: Spenning - Poretrykk - Ødometer 3
Figur 79: Spenning - Cv - Ødometer 3 88

## Tabelliste

Tabell 1: Oppsummering av prøveresultater på utvikling av K <sub>0</sub> i krypfasen fra forsøk	14
Tabell 2: Kriterier for evaluering av prøveforstyrrelser kvantifisert ved forholdet $\Delta ee0$ og OCR. (Lu	nne
et. al., 2006)	31
Tabell 3: Vanninnhold fra indekstesting og forsøk	37
Tabell 4: Konsistensgrenser	38
Tabell 5: Densiteter, porøsitet og poretall	39
Tabell 6: Resultat fra konusforsøk	40
Tabell 7: Saltinnhold	40
Tabell 8: Humusinnhold	40
Tabell 9: Nøkkeltall og prøvekvalitetskategori fra ødometerforsøkene.	42
Tabell 10: Nøkkeltall og prøvekvalitetskategori fra splittet ring ødometerforsøkene	43
Tabell 11: Sammenligning av ligning (28) og ligning (30)	63
Tabell 12: Variasjon av $\alpha$ ved endring av b/r	64

## Symbolliste

#### Greske bokstaver:

Symbol	Beskrivelse	Benevning
α	Faktor som beskriver poretrykksfordelingen i prøven	-
γ	Tyngdetetthet	kN/m³
$\gamma_{\rm s}$	Tyngdetetthet av fast stoff	kN/m <sup>3</sup>
γ <sub>w</sub>	Tyngdetetthet av vann	kN/m <sup>3</sup>
$\delta_v$	Deformasjon i vertikal retning	mm
ε	Tøyning	-
Ė	Tøyningshastighet	-
$\varepsilon_a$	Tøyning i aksial retning	-
$\varepsilon_{vol}$ - $\varepsilon_v$	Volumetrisk tøyning	-
ρ	Densitet, massetetthet	g/cm <sup>3</sup>
$ar{ ho}$	Gjennomsnittlig densitet	g/cm³
$ ho_s$	Korndensitet	g/cm³
σ	Spenning	kPa
$\sigma'_1$	Største prinsipielle effektivspenning	kPa
$ar{\sigma}_1'$	Gjennomsnittlig største prinsipielle effektivspenning	kPa
$\sigma'_{1,0}$	Startverdi av største prinsipielle effektivspenning i ødotreaksialforsøk	kPa
$\sigma'_3$	Minste prinsipielle effektivspenning	kPa
$\sigma'_{3,0}$	Startverdi av minste prinsipielle effektivspenning i ødotreaksialforsøk	kPa
$\sigma'_h$	Horisontal effektivspenning	kPa
$\sigma'_m$	Gjennomsnittlig effektivspenning over et intervall	kPa
$\sigma'_{v}$	Vertikal effektivspenning	kPa
$\sigma_{v0}^\prime$ - $\sigma_{vi}^\prime$	Initiell effektiv vertikalspenning, overlagringsspenning	kPa
$\sigma'_v/\sigma'_{cv}$	Normalisert spenning	-
$\sigma_p'$ - $\sigma_{cv}'$	Effektiv prekonsolideringsspenning	kPa
$\sigma_{\chi}$	Spenning i x-retning	kPa
$\sigma_y$	Spenning i y-retning	kPa
$ au_{max}$	Maksimal skjærspenning	kPa
$ au_{xy}$	Skjærspenning på xy-planet	kPa
$\varphi - \varphi'$	Friksjonsvinkel	0
φ <sub>c</sub>	Kritisk friksjonsvinkel	0
φ <sub>cv</sub>	Konstant volumetrisk friksjonsvinkel	0
$\phi_{\text{p}}$	Maksimal friksjonsvinkel	0
ψ	Dilatansvinkel	0

#### Romerske bokstaver:

Symbol	Beskrivelse	Benevning
а	Attraksjon	kPa
av	Kompressibilitetskoeffisient	-
A <sub>0</sub>	Initielt tverrsnittetsareal av prøve i treaksialapparat	mm <sup>3</sup>
b	Konstant poretall med dybden	-

b/r	Endringsforhold av dimensjonsløst poretall i prøven	-
c'	Kohesjon	kPa
Cv	Konsolideringskoeffisient	m²/år
$C_c^*$	Differanse mellom $e^*_{100}$ og $e^*_{1000}$	-
e	Poretall	-
ē	Gjennomsnittlig poretall i prøven	-
e <sub>0</sub>	Initielt poretall	-
$e_{100}^{*}$	Poretall for rekonstituert materiale ved referansespenning 100 kPa	-
$e_{1000}^*$	Poretall for rekonstituert materiale ved referansespenning 1000 kPa	-
$e_{R}$	Poretall i bunnen av prøven	-
$e_T$	Poretall i toppen av prøven	-
$\Delta e/e_0$	Poretallsforholdet	-
F	Kraft	kN
Н	Høyde av prøven	mm
ΙL	Flyteindeks	-
l <sub>p</sub>	Plastisitetsindeks	%
I,	Poreindeksen	-
k	Permeabilitetskoeffisient	m/år
K <sub>0</sub> ′	Effektiv hviletrykkskoeffisient	-
$K_{0\nu}$	Hviletrykkskoeffisienten ved avlasting	-
$K_0^{NC}$	Hviletrykkskoeffisient i normalkonsolidert område	-
$K_0^{OC}$	Hviletrykkskoeffisient i overkonsolidert område	-
$\Delta K_0$	Inkrementell hviletrykkskoeffisient	-
M	Ødometermodul	kPa
n	Porøsitet	%
p'	Gjennomsnittlig effektivspenning	kPa
p <sub>c</sub> '	Effektiv prekonsolideringsspenning	kPa
q	Deviatorisk spenning	kPa
r	Endringshastighet av gjennomsnittlig poretall	S
R	Konstant deformasjonshastighet	m³/s
$S_0$	K <sub>0</sub> -linje i ødotreaksialforsøk	-
$S_r$	Omrørt skjærstyrke	kPa
$S_r$	Metningsgrad	%
$S_t$	Sensitivitet	-
$S_u$	Udrenert skjærstyrke	kPa
t	Tid	min eller s
$\Delta \log t$	Endring i logaritmisk tid	min eller s
и	Poretrykk	kPa
$u_b$	Det målte poretrykket i bunnen av ødometeret	kPa
V	Volum av prøven	m³
Vs	Volum av fast stoff	m³
w - w <sub>n</sub>	Vanninnhold	%
WL	Flytegrense	%
Wp	Plastisitetsgrense	%
Z	Dybde fra overflaten	m

### Forkortelser

Forkortelse	Beskrivelse
CL	Kontinuerlig lasting
CPR	Constant Pore pressure Ratio
СРТ	Cone Penetration Test
CRS	Constant Rate of Strain
DEM	Descrete Element Method
EPMA	Electron Probe Micro Analyser
ICL	Intrinsic Compression Line
IL	Trinnvis lasting
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MG	Marin Grense
NC	Normalkonsolidert
OC	Overkonsolidert
OCR	Over Consolidation Ratio
SCL	Sedimentation Compression Line

### 1 Innledning

Dette kapittelet gir en kort bakgrunn for oppgaven og formulerer denne med formål og avgrensing.

### 1.1 Bakgrunn og formål

For å løse mange geotekniske problemer er det nødvendig med antagelser om hvilke initielle spenningstilstander jorden er påvirket av. Forholdet mellom horisontal og vertikal effektiv spenning beskrives med jordtrykkskoeffisienten K<sub>0</sub>' og ved noe kunnskap om jordtype og lasthistorie kan en verdi for K<sub>0</sub>' ofte velges basert på observasjoner eller den indre friksjonsvinkelen for jorden. Det er  $K_0^{NC}$  som brukes i modellering både for å bestemme spenningsnivået in situ og anisotropien til jorden ved å rotere flytekurven.

Ekte overkonsoliderte leirer har ofte K<sub>0</sub>'-verdi godt over 1,0, mens det er typisk for normalkonsoliderte leirer å ha K<sub>0</sub>'-verdi mellom 0,4 og 0,6. Kryp er en faktor som får jorden til å oppføre seg som om den er overkonsolidert ved at forskjellige prosesser øker overkonsolideringsspenningen. Hvordan K<sub>0</sub> utvikler seg, og i heletatt om den gjør dette, er omstridt da forskjellige laboratorieforsøk gir forskjellige resultater for utviklingen.

Årsaken til at dette er viktig er fordi konstruksjoner som påvirkes av jordtrykk i dag dimensjoneres for et visst jordtrykk basert på  $K_0^{NC}$ -verdien. Utvikler K<sub>0</sub> seg over tid til å bli mye høyere enn den opprinnelig var kan det føre til brudd i konstruksjonen.

Oppgaven er definert som «Et laboratoriestudie på hviletrykkskoeffisientens utvikling under kryp for både uforstyrret og omrørt, rekonsolidert Tillerleire» og tar sikte på å undersøke om K<sub>0</sub>' øker, avtar eller holder seg stabil under krypfasen.

Hovedformålene ved denne rapporten er:

- 1. Presentere relevant teori om leire og horisontalt jordtrykk
- 2. Presentere tidligere forsøk på K<sub>0</sub> under kryp
- 3. Presentere de mest relevante laboratorieforsøkene som er tenkt gjennomført
- 4. Gjennomføre laboratorieforsøk for å observere K<sub>0</sub> under krypfasen
- 5. Presentere resultater og påpeke viktige funn

### 1.2 Omfang og begrensning av arbeidet

Rapporten bygger på det litterære forstudiet i prosjektoppgaven «Et litterært studie på jordtrykkskoeffisienten under kryp» av Gjengstø (2016). Mye av teorien er hentet fra prosjektoppgaven og det er ikke gjort referanser til denne. Det er også gjort litteratursøk for denne rapporten for å utfylle teorien.

Laboratorieundersøkelser og tolking av disse resultatene er hovedessensen for rapporten. Materialet som er brukt er Tillerleire som er forsket på, og fortsatt forskes på, i stor grad hos NTNU. Det er tatt sikte på å utføre minst seks forsøk med splittet ring ødometer og et ødotreaksialforsøk i hovedsak. Disse skal suppleres med nødvendige indekstester og treaksialforsøk.

### 1.3 Rapportens oppbygging

Rapporten er videre bygget opp på følgende måte:

Kapittel 2 presenterer relevant teori for leire, horisontalt jordtrykk og kontinuerlig ødometer.

**Kapittel 3** tar for seg splittet ring ødometeret som er det viktigste laboratorieutstyret for resultatene i denne rapporten.

**Kapittel 4** beskriver tidligere undersøkelser på materialet som er brukt under forsøkene og tar også for seg hvilke andre forsøk som skal gjennomføres med enkelte utfordringer.

I kapittel 5 presenteres resultatene som har framkommet av forsøkene som er utført,

Kapittel 6 er resultatene oppsummert og konklusjonen presentert

Kapittel 7 beskrives forslag til forbedringer og videre arbeid med temaet.

I kapittel 8 er alle kildene som er brukt listet.

Etter kapittel 8 følger vedleggene for rapporten.

#### **1.4 Spesielle forhold**

Under forsøkene har det oppstått uventede forhold som har påvirket datagrunnlaget i rapporten. Splittet ring ødometeret ble overbelastet under det siste testforsøket og det tok tilnærmet 8 uker å få fikset det da det var tenkt å bytte ut de overbelastede delene med nye og forbedrede deler. Da disse ikke skulle ankomme før innleveringsfristen for denne rapporten ble de originale delene på splittet ring ødometeret reparert. Reparasjonen var ikke helt vellykket og dette har også påvirket datagrunnlaget for rapporten.

I tillegg til overbelastningen i splittet ring ødometeret ble også ødotreaksialforsøket ødelagt da låsepinnen mellom motoren og cellen brøt sammen under konsolideringen. Grunnet ferieavvikling kunne ikke treaksialapparatet repareres tidsnok for denne rapporten og de andre treaksialapparatene var opptatt med andre forsøk. Dette medførte at det ikke ble innsamlet noen data for ødotreaksialforsøk til denne rapporten.

### 2 Teori

### 2.1 Leirens egenskaper

Dette kapittelet vil presentere teori om hvordan leire oppfører seg med vekt på egenskaper som kan påvirke jordtrykkskoeffisienten.

### 2.1.1 Generelt

Leire er jord som er meget finkornet, diameter mindre enn 2 µm og flakformet. Den dannes gjennom forvitring og erosjon for deretter å avsettes i rolig vann, for det meste i havet. Det skilles mellom leire som er sedimentert i saltvann (under marin grense, MG) eller i ferskvann (over MG). Leire som er sedimentert i saltvann MG kalles marin leire og har ladet overflate på kornene grunnet saltinnholdet i vannet. Denne ladningen er forskjellig fra flatsiden av kornene til kantsidene og medfører at kornene danner en kant-mot-flate struktur. I denne strukturen er det hulrom som saltvannet bindes inn i og marin leire har derfor naturlig høyt vanninnhold. Er leiren derimot satt av i ferskvann vil kornene få en horisontal struktur og dette gir lite rom for vann og dermed et lavt vanninnhold. Se Figur 1 for skisse på strukturer.



Figur 1: Struktur i sedimentert leire, venstre: i saltvann, høyre: i ferskvann (Aarhaug, 1984)

Leirens vann- og saltinnhold avgjør i stor grad de mekaniske egenskapene. Leire holder meget godt på vann da leirflakene gir mye areal for vannet å binde seg til. Leire med høyt vanninnhold er plastisk og leire med lite/intet vanninnhold er hard og oppfører seg sprøtt. Saltet bidrar med å skape bindinger mellom leirflakene og mindre innhold av salt fører til dårligere og færre bindinger.

### 2.1.2 Spenning-Tidshistorikk

En av de viktigste parameterne for å vurdere deformasjoner i sedimentert leire er prekonsolideringsspenningen. Denne spenningen er den maksimale vertikale effektive spenningen leiren tidligere har blitt utsatt for, men brukes mest om den spenningen leiren trenger for å begynne å flyte under en ødometertest. Når leire blir sedimentert er det både mekaniske og tidsavhengige faktorer som avgjør hvordan leiren oppfører seg og hvilken struktur den har. Det vil bli forklart her hvordan dette utvikler seg.

I Figur 2a vises det hvordan disse faktorene påvirker leiren. Her vil økning av den effektive vertikale spenningen få en reduksjon i poretallet ved å følge jomfrukompresjonslinjen  $\alpha$  -  $\alpha$  i et  $\sigma'_{\nu}$  - e plot. Denne kompresjonslinjen er bestemt leirens egenskaper gjennom mineralogi og området leiren er sedimentert. Når avsetningen stopper vil det være en konstant effektivt spenning,  $\sigma'_{\nu i}$ , på leiren i punkt I. Leiren er nå i likevekt og kan ifølge Bjerrum (1973) klassifiseres som en ung normalkonsolidert leire. Ved fortsatt å øke spenningen vil dette punktet bevege seg videre langs  $\alpha$  - $\alpha$ -linjen. Punkt I er også flytepunktet som finnes ved å kjøre en ødometertest på uforstyrret prøve. Forblir spenningen på leiren konstant vil poretallet fortsette å reduseres over tid på grunn av sekundær konsolidering. Gjennom reduksjonen av poretallet fra I til A vil aldringen av leiren føre til økt motstand mot ytterligere påkjenning. En slik aldret normalkonsolidert leire vil i følge Bjerrum (1967) nå flytepunktet ved punkt B (som også er prekonsolideringsspenningen) på jomfrukompresjonslinjen  $\alpha$  -  $\alpha$  og har dermed en høyere flytespenning enn leiren har tidligere opplevd. I tillegg vil tiksotropi og sementering kunne øke prekonsolideringsspenningen til en uekte prekonsolideringsspenning i punkt P.

Både erosjon og endringer i vannstanden vil kunne gi lavere vertikal effektiv spenning enn tidligere opplevd, og leiren kan da klassifiseres som overkonsolidert. I stedet for å nå punkt A vil plottet komme til punkt O. Leiren vil fortsatt bevege seg mot punkt B og P når den blir lastet på igjen.

Når det så lastes på nytt på leiren vil den gradvis miste strukturen sin og etter hvert ende opp på  $\alpha$  -  $\alpha$ -linjen igjen. For leire som har nådd punkt P vil store tøyninger oppstå når poretallet reduseres mot jomfrukompresjonslinjen. Forekommer det utvasking av salt i leiren vil det bli likevekt på en ny kompresjonslinje,  $\beta$  -  $\beta$ , i det samme plottet som ligger lavere og dermed fører til et stort fall i stivheten til leiren om prekonsolideringsspenningen overskrides.

Det er også verdt å nevne at effekten av struktur, aldring og overkonsolidering er ofte vanskelige å skille fra hverandre.



Figur 2: -a- Konsolideringshistorie. -b- Egenskapenes grenseverdier for en naturlig leire (Leroueil og Tavenas, 1987)

I Figur 2b vises effekten av avsettingen av leire i forhold til flytegrense der gjennomsnittlig spenning er plottet mot skjærspenning. Länsivaara (1999) har samlet sammen et stort antall med laboratorietester på leire som gir indikasjoner på at flytekurvene er anisotropiske. I disse forsøkene er leiren sett på som K<sub>0</sub>-konsolidert og viser at flytekurvene sentrerer seg rundt K<sub>0</sub>-linjen (se Figur 3). I Figur 2b ser man flytekurven Y<sub>i</sub> som forekommer ved slutten på avsettingen. Denne vil under kryp gradvis utvide seg homotetisk. På grunn av tiksotropi og sementering vil flytekurven endre form til Y<sub>p</sub>, men ved videre lasting over prekonsolideringsspenningen vil kurven følge FD-linjen i stedet da man bryter ned sprø bindinger mellom partiklene. Dette viser at flytespenningen avhenger av spenningsstien opp til flyt.



Figur 3: Flytekurver for naturlige leirer gruppert etter friksjonsvinkel. Samlet og gruppert av Länsivaara (1999)

#### 2.1.3 Spenningssti

Ved et ødometerforsøk starter lastingen fra null vertikal spenning. Poretallet vil være mer eller mindre likt med in situ avhengig av grad av forstyrrelse fra prøvetaking og innbygging i forsøksutstyret. I all hovedsak vil leire aldri utsettes for påkjenning fra spenningstilstand med null vertikal spenning og selv om lastforholdene med ingen horisontal deformasjon er riktig vil reaksjonen som observeres i ødometeret ikke nødvendigvis være representativt for den virkelige lastsituasjonen in situ.

Janbu (1995) presenterte i Figur 4 spenningsstien for bløt Eberg leire og to sedimenterte bergarter. Selv om materialene er svært forskjellige og de påførte spenningene er av ulik størrelse er likheten i spenningsstien påfallende like. Også Leroueil og Vaughan (1990) presenterte svært like spenningsstier for resultater fra forsøk på sensitiv canadisk leire, Keuper Marl (sedimentert bergart), kunstig bundet jord og kalk. Når spenningen er under prekonsolideringsspenningen ser man at reaksjonen er svært stiv mot skjærspenningen i begynnelsen. Dette tilsvarer et elastisk materiale med lavt Poissons tall. Flyt forekommer så typisk i den øvre delen av flytekurven. Etter flyt vil skjærspenningen holde seg tilnærmet konstant samtidig som spenningsstien beveger seg mot K<sub>0</sub>linjen i normalkonsolidert område. Når spenningsstien når K<sub>0</sub>-linjen vil den følge denne videre.



Figur 4: Spenningssti fra ødometerforsøk på bløt leire og to sedimenterte bergarter (Janbu, 1995)

I Figur 5 er det presentert en spenningssti for leire in situ basert på resultater av Leroueil og Tavenas (1986). Det er i tillegg lagt til en typisk spenningssti for et ødometerforsøk. Her vises det betydelige forskjeller i flytespenningen og atferden etter flyt. I eksempelet brukt i Figur 5 har spenningsstien for in situ en flytespenning som er 27 % høyere enn for ødometeret. Länsivaara (1999) fant ut at flyt ved K<sub>0</sub> forhold, både for laboratoriet og in situ, sjeldent forekommer ved en spenningstilstand som tilsvarer en normalkonsolidert K<sub>0</sub> verdi.



Figur 5: Mulig forskjell i effektiv spenningssti i laboratorie- og in situ KO-lasting (Länsivaara, 1999)

For lasting, avlasting og lasting på nytt har Mayne og Kulhawy (1982) presentert en forventet spenningssti i et  $\sigma'_v - \sigma'_h$  plot i Figur 6. OA representerer førstegangs pålasting som tilsvarer sedimentering og normalkonsoliderte forhold. Det vises i figuren at jordtrykkskoeffisienten under førstegangspålasting,  $K_0^{NC}$ , er konstant. Reduseres de vertikale effektive spenningene (avlasting) resulterer dette i en overkonsolidering av jorden som fører til at spenningsstien følger ABC. Under avlastingen har OCR en markant effekt på K<sub>0</sub>. Hvis det lastes på nytt vil denne spenningen følge en lignende som CD. Ved påfølgende av- og pålasting igjen (som følge av for eksempel endring i grunnvannstanden) vil spenningsstien følge ABCDA. Ved videre pålasting fra A vil spenningsstien følge en linje som er en forlengelse av OA.





#### 2.1.4 Struktur

Strukturen i en viss jord avhenger av hvordan jordsmonnet er satt sammen, spenningshistorikk, nåværende spenningstilstand og miljøet. Mitchell (1993) definerte struktur som: *"The combination of fabric (orientation and arrangement of particles) and interparticle bonding."* Som følge av dette kan to jordsmonn med samme «fabric» oppføre seg mekanisk svært forskjellige på grunn av ulike interpartikulære bindinger.

Ved å introdusere konseptet «*intrinsic properties*, » indre egenskaper, for leirer kunne Burland (1990) vurdere struktur og bindinger i naturlig jord. Her blir jorden rekonstituert til 1,25 ganger flytegrensen for så å bli testet. Testingen skjer normalt endimensjonalt og de indre egenskapene er uavhengig av den opprinnelige strukturen i jorden. Burland (1990) introduserte de to kurvene ICL (Intrinsic Compression Line) og SCL (Sedimentation Compression Line) samt poreindeksen I<sub>v</sub> til hjelp for å beskrive jorden. Poreindeksen er definert som:

$$I_{\nu} = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*}$$
(1)

Her er  $e_{100}^*$  og  $e_{1000}^*$  poretallet for rekonstituert materiale ved referansespenning på henholdsvis 100 kPa og 1000 kPa. Det initielle poretallet kan beregnes ved  $e_0 = w \cdot \rho_s$  hvis jorden er fullt mettet og endringen av poretallet under kompresjon kan beregnes ved  $\Delta e = \varepsilon_a \cdot \frac{1+e_0}{e_0}$ . På grunn av at

strukturen i jord er sensitiv til spenningsendringer vil en uforstyrret prøve som utsettes for mekanisk deformasjon etter hvert nå ICL når det påføres nok spenning og strukturen forsvinner (se Figur 7).



Figur 7: Ødometerforsøk på uforstyrret og rekonstruert leire fra Gøteborg fra 5 m dybde sammenlignet med ICL og SCL fra Burland (1990). (Olsson 2013)

#### 2.1.5 Effekt av Temperatur og Tøyningshastighet

Temperatur påvirker jordens atferd på flere måter og en av disse er viskositeten til vannet sammen med permeabiliteten til jorden. I følge Länsivaara (1999) kan vann ha ca. dobbel så høy viskositet in situ enn inne i et laboratorie. Dette påvirker permeabiliteten til å bli nesten dobbelt så høy i laboratoriet som in situ.

En annen påvirkning på atferden er forskjellen på varmeutvidelseskoeffisienten til jordpartikler og vann. For jordpartiklene avhenger denne koeffisienten av sammensettingen av mineraler, og for vann er ikke koeffisienten konstant med temperatur. Det er også stor forskjell mellom jord og vann, og Tidfors (1987) fant ut at vann har varmeutvidelseskoeffisient som er rundt sju ganger høyere enn for typiske svenske leir mineraler. Ved temperaturøkning vil vann derfor ekspandere mer enn jordpartiklene og ved lav permeabilitet og/eller lang drensvei vil det dannes et poreovertrykk som fører til redusert effektivspenning. Når poretrykket med tid forsvinner eller det oppstår drenerte betingelser under temperaturøkningen vil poretallet for jorden reduseres. I motsatt tilfelle ved temperaturfall vil det oppstå et negativt poretrykk ved udrenert betingelser og det oppstår svelling etter hvert som poretrykket utlignes.

En tredje påvirkning er reduksjon av skjærstyrken mellom individuelle partikler i jorden ved økning av temperaturen (Mitchell, 1993). På grunn av dette vil det skje en delvis kollaps i strukturen i jorden og dermed vil poretallet reduseres inntil det er dannet tilstrekkelig mange nye bindinger. I motsatt tilfelle vil en reduksjon i temperatur føre til at styrken i strukturen øker. I Figur 8 vises det effekten av et drenert forsøk med temperaturendringer gjort på leirmineralet illitt, som er vanlig i norske leirer (Store norske leksikon, 2009). Her ble mineralet konsolidert over ca. en uke ved 36,1 °C for så å bli påført temperatursvingninger mellom 5 °C og 60 °C. Effekten av volumendringen avtar etter den

første temperatursyklusen fordi mye av vannet har blitt drenert, men også fordi nye bindinger relatert til den temperaturen allerede har blitt dannet. Formen på kurven er svært lik kompresjonskurver som fås gjennom førstegangs pålasting for så avlasting og pålasting på nytt. I tillegg skaper oppvarming og avkjøling av jorden en uekte prekonsolideringsspenning som er svært lik den som oppstår gjennom aldring.

Det er viktig å nevne at det ikke er bare jorden som påvirkes av temperaturendringer. Også laboratorieutstyr påvirkes av slike endringer. Det er dermed viktig å kontrollere temperaturen hvor forsøket gjennomføres og måle eventuelle endringer for å kunne dokumentere dette sammen med forsøksresultatene.



Figur 8: Effekt av temperaturendringer mot volumendringer for mettet Illitt (Michell, 1993, original data fra Campanella og Mitchell, 1968)

Effekten av hvilken hastighet som blir brukt på tøyninger under et forsøk er godt dokumenter gjennom litteraturen med eksempler som Crawford (1964), Sällfors (1975) og Janbu, Tokheim og Senneset (1981). En vanlig observasjon her er jo raskere pålastingen skjer jo høyere blir den effektive spenningen for en gitt tøyning. Dette kommer fram i Figur 9 hvor resultater for CRS-ødometer (konstant deformasjonshastighet) med forskjellige hastigheter på tøyningene er presentert av Sällfors (1975). En viktig konsekvens av dette er at prekonsolideringsspenningen som kommer ut av ødometerforsøket er avhengig av lasthastigheten som brukes.





Figur 9: Effekt av forskjellige tøyningshastigheter i en «effektivspenning mot tøyning»-graf på leire fra Bäckebol (Sällfors, 1975)

Leroueil (2006) samlet sammen flere testresultater som viser at formen på flyteområdet er påvirket av både hastigheten på tøyningene og temperatur som vist i Figur 10. Her vises det at høyere hastighet på tøyningene og lavere temperaturer gir tilsvarende effekt ved at flytekurven ekspanderer og prekonsolideringsspenningen øker. Det er antatt at temperaturen ikke påvirker  $K_0^{NC}$  og det er ikke funnet noen effekter på rotasjon av flytekurven.



Figur 10: Effekten av (a) tøyningshastighet og (b) temperatur på flytekurven for Berthierville leire (Boudali, 1995, hentet fra Leroueil, 2006

#### 2.2 Horisontalt Jordtrykk

I dette kapittelet vil det presenteres teori rundt jordtrykk og jordtrykkskoeffisienten. I tillegg vil det legges fram resultater fra tidligere forsøk som er utført på jordtrykkskoeffisienten.

#### 2.2.1 Generelt

Når jord ligger i ro er det bare vertikale krefter som påvirker den. Den horisontale deformasjon er begrenset og det er ingen friksjonskrefter som virker på sidene. Dette betyr at de prinsipielle spenningsplanene er vertikale og horisontale. Det er bare gravitasjonen som virker på jorden når den ligger i ro og all horisontal spenning som oppstår kommer av jordens egenvekt hvis overflaten er jevn, tilnærmet horisontal og tilstrekkelig vidstrakt. Det er jordmaterialets egenskaper som bestemmer forholdet mellom horisontale og vertikale spenninger. Ser man på et eksempel med vann, som er en væske og ikke har noen intern friksjonsvinkel, så er vertikale og horisontale spenninger lik. Ser man på kornet materiale er det mer komplisert. Forenkles materialet til å være av runde korn med samme størrelse og uten kohesjon vil kreftene fordeles gjennom kontakt og friksjon mellom kornene. Kontakten og friksjonen blir påvirket av den vertikale spenningen som er påført, poretallet og den mobiliserte friksjonsvinkelen. Selv om spenningsstien vil være kompleks er det fortsatt mulig å modellere den på en relativ lav skala som for eksempel DEM analyse etter Khan et al. (2014). Legges kohesjon og korn med irregulær fasong og struktur til blir spenningsstien mye mer kompleks og sammen med elektrostatiske krefter i bindinger gjør dette materialet vanskeligere å modellere og visualisere.

#### 2.2.2 Jordtrykkskoeffisienten K<sub>0</sub>

Forholdet mellom horisontalt og vertikalt jordtrykk uttrykkes ved jordtrykkskoeffisienten K<sub>0</sub>. Denne koeffisienten beskriver hvor mye av det effektive vertikale trykket som overføres som effektivt horisontalt trykk, eller hvor mye av gravitasjonen som overføres fra vertikal til horisontal retning gjennom kontakt og friksjon mellom partiklene i jorda.

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_\nu} \tag{2}$$

Jaky (1944) kom opp med en ligning for å finne jordtrykkskoeffisienten uten å måle det horisontale trykket.

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \frac{1 + \frac{2}{3} \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'}$$
(3)

Denne ligningen baserer seg på den effektive interne friksjonsvinkelen  $\varphi'$  i jorden (heretter  $\varphi$ ) og virker mest korrekt når  $\varphi$  er den kritiske friksjonsvinkelen,  $\varphi_c$ , og ikke den maksimale friksjonsvinkelen,  $\varphi_p$ , da  $\varphi_p$  består av enten  $\varphi_c$  eller den konstante volumetriske friksjonsvinkelen,  $\varphi_{cv}$ , og dilatansvinkelen,  $\psi$ .

Senere kom Jaky (1948) opp med en ny formulering av ligningen og fjernet den siste faktoren. Denne ligningen er allment kjent som Jakys formel.

$$K_0 = (1 - \sin \varphi) \tag{4}$$

I følge Terzaghi, Peck og Mesri (1996) gjelder denne ligningen bare for unge sedimenterte, normalkonsoliderte leirer og kornete jordarter. Disse leirene og jordartene skal ikke være kompakterte. Det er også en vanlig misforståelse at ligningen til Jaky (1948) er framstilt av empiriske data, men dette er feil. Jaky brukte stressfeltet til en kileformet fylling av kornet materiale (se Figur 11) for å utlede ligningen og antok at hvilevinkelen er den samme som den interne friksjonsvinkelen. Dette er rimelig for unge normalkonsoliderte materialer med hvilevinkel lik φ<sub>cv</sub>.

Jaky (1944) hevdet at det horisontale trykket som virker på OC i Figur 11 er jordtrykket når jorden er i ro. Samtidig er jorden i BCO i likevekt og jorden i ABO er helt på grense sin i og med at friksjonsvinkelen er mobilisert fullt ut. Det dannes så glideflater med en helning med horisontalen lik friksjonsvinkelen og går parallelt med hvilevinkelen. Spenningene i x- og y-retning samt skjærspenningen i ABO kan uttrykkes ved vekten av jorden i følgende ligninger.

$$\sigma_x = \gamma(y\cos\varphi - x\sin\varphi)\cos\varphi \tag{5}$$

$$\sigma_y = \gamma (y - x \tan \varphi) (1 + \sin^2 \varphi) \tag{6}$$

$$\tau_{xy} = \gamma(y\cos\varphi - x\sin\varphi)\sin\varphi \tag{7}$$

Den samme spenningstilstanden kan ikke føres videre inn i BCO da dette vil bryte med likevekten ved symmetriplanet. Skjærspenningen må for denne delen være lik skjærspenningen i ABO langs OB, men samtidig reduseres til 0 ved symmetriplanet OC. Her prøvde Jaky (1944) tre forskjellige fordelinger, en lineær og to forskjellige paraboler og endte opp med å bruke JK-parabolen som ga følgende ligning for skjærspenningen.

$$\tau_{xy} = \tau_{xy}^{OB} \frac{x^2}{x_1^2}$$
(8)

Ved å integrere differensialligningene for likevekt, sette inn ligning 8 og anta at forholdet for jordtrykkskoeffisienten var horisontal over vertikal spenning på symmetriplanet kom Jaky (1944) fram til hviletrykkskoeffisienten i ligning 3 på forrige side.



Figur 11: Kileformet fylling som viser forholdet mellom K<sub>0</sub> langs OC og fullt mobilisert friksjonsvinkel φ i ABO (Michalowski, 2005)
Jaky (1944) slo fast at en eksperimentell evaluering av K<sub>0</sub> ikke var nødvendig da K<sub>0</sub> entydig er knyttet til den indre friksjonsvinkelen for kornet materiale. Flere forskere (blant annet Mesri og Castro (1987), Leroueil og Tavenas (1987) og Olsson (2013)) har benektet dette og hevdet at K<sub>0</sub> er mer tilstandsavhengig. På grunn av at spenninger ved ro er under flytespenningen er det merkelig at K<sub>0</sub> kan bestemmes av en begrenset parameter.

Schmidt (1966) presenterte sammenhengen mellom avlasting og K<sub>0</sub> ved ligningen.

$$K_{0u} = K_0^{NC} \cdot OCR^{1,2 \cdot \sin \varphi} \tag{9}$$

Senere utførte Mayne og Kulhawy (1982) over 170 forsøk, hvorav 82 av disse var med kohesjon. Resultatene av disse forsøkene gav en K<sub>0</sub> lik Schmidt (1966) sin, der potensen  $(1,2 \cdot \sin \varphi)$  er byttet ut med  $0,018 + 0,974 \sin \varphi$ . Dette er i praksis det samme som sin  $\varphi$  og dermed blir K<sub>0</sub> ved avlasting.

$$K_{0u} = K_0^{NC} \cdot OCR^{\sin\varphi} \tag{10}$$

I tillegg foreslo Mesri og Castro (1987) at ligningen til Mayne og Kulhawy (1982) også kunne brukes til å beregne K<sub>0</sub> i overkonsolidert område.

$$K_0^{OC} = K_{0u} = K_0^{NC} \cdot OCR^{\sin\varphi} \tag{11}$$

Dette må imidlertid undersøkes videre for å bekrefte observasjonene for  $K_0^{OC}$ .

#### 2.2.3 K<sub>0</sub> i Krypfasen

Over tid vil avsetninger av leire som er belastet med konstant effektivt trykk bli påvirket slik at prekonsolideringstrykket,  $\sigma'_p$ , øker og blir høyere enn det eksisterende trykket fra overliggende lag,

 $\sigma'_{v0}$ . Dette betyr at overkonsolideringsgraden (OCR) øker ( $OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$ ) på grunn av tidsavhengige prosesser uten at erosjon eller endringer i grunnvannstanden er med på å påvirke økningen. Ifølge Mesri og Castro (1987) er det tre mekanismer som knyttes til en økning i interpartikulær fasthet (økning av OCR) sett bort fra reduksjon av det effektive vertikale trykket:

- 1. Krypfasen (sekundær konsolidering) resulterer i en reduksjon av poretallet og dermed en økning av partikkelinteraksjon.
- 2. Tiksotropisk økning i strukturell fasthet som krever ingen reduksjon av poretallet. Den økte interpartikulære fastheten skjer ved reorientering av leirflakene og reorganisering av ioner, ioniske komplekser og absorberte vannmolekyler. Dette gir en hardere leire.
- 3. Sementering ved kjemiske endringer av bindinger uten reduksjon av poretallet. Dette inkluderer kationbytter og bindinger av jorden ved komponenter som oksider, karbonater, silikater og organiske molekyler. Den økte fastheten kommer i dette tilfellet av svært små og relativt sterke, og derfor sprø, bindinger ved kontakt mellom partiklene.

### 2.2.4 Tidligere undersøkelser for K<sub>0</sub> i Krypfasen

Det er blitt utført flere forsøk av forskere på forskjellige leirer fra rundt om i verden. Kavazanjian og Mitchell (1984) fant ut at for normalkonsoliderte leirer vil K<sub>0</sub> øke mot 1,0 med den geologiske tiden og antydet at for overkonsoliderte leirer med K<sub>0</sub> høyere enn 1,0 vil den reduseres med tid. Senere undersøkelser av Jamiolkowski et al. (1985) konkluderte med at funnene til Kavazanjian og Mitchell (1984) enten ikke gjaldt for alle kohesive jordarter eller så er funnene deres forhastet. Dette mente de da etter deres forsøk forholdt K<sub>0</sub> seg i praksis konstant. Dette betyr at det ikke finnes noe klart svar på hvordan leire oppfører seg over tid da leire K<sub>0</sub> kan øke, reduseres eller være stabil over tid. Det er samlet sammen data fra seks forskjellige kilder i Tabell 1 hvor resultater fra referanse 2 til 5 er presentert i Figur 12, Figur 13, Figur 14 og Figur 15. I figurene vises det store forskjeller i hvordan utviklingen av K<sub>0</sub> forløper seg. Dette kan ha med forskjeller i forsøksutstyret og prosedyrene ved utførelse.

Opprinnelse testet	w [%]	w∟[%]	I <sub>p</sub> [%]	K <sub>0</sub>	$\Delta K_0/\Delta \log t$	Referanse
leire					$^{\prime}\Delta\log\iota$	
Bangkok	-	150	90	0,5	0,040	1
San Francisco	-	-	-	0,53	0,035	2
Panigaglia	45	65	40	0,59	-0,0046	3
Panigaglia, OC	45	65	40	1,6	0	"
Prøve A, uforstyrret	-	138	78	-	0,009	"
Prøve A, forstyrret	-	84	30	-	0,015	"
Prøve B, uforstyrret	-	66	32	-	0,008	"
Prøve B, forstyrret	-	50	17	-	0,005	"
Montalto di Castro	48±2	75±6	55±5	0,56	0	4
Saint-Alban	60	31-42	20-23	0,49	0,020	5
Broadback	45	28-36	≈10	0,51	0,045	"
Atchafalaya	65	82	49	0,66	0,038	"
Batiscan	86	49	27	0,55	0,070	"
Gøteborg	68	67	36	0,53	-	6
Gøteborg	78	70	34	0,52	-	"

Tabell 1: Oppsummering av prøveresultater på utvikling av K<sub>0</sub> i krypfasen fra forsøk

Referanser i Tabell 1: 1. Bjerrum og Holmberg (1971), 2. Kavazanjian og Mitchell (1984), 3. Jamiolkowski et. al. (1985), 4. Holtz, Jamiolkowski og Lancellotta (1986), 5. Mesri og Castro (1987) og 6. Olsson (2013)



Figur 12: Utvikling av K0 over tid (Kavazanjian og Mitchell, 1984)



Figur 13: Utvikling av K<sub>0</sub> over tid for både uforstyrret og omrørt leire (Jamiolkowski et al. 1985)



Figur 14: Utvikling av KO over tid med svingninger i temperatur (Holtz, Jamiolkowski og Lancellotta, 1986)



Figur 15: Utvikling av K<sub>0</sub> over tid for 4 forskjellige leirer (Mesri og Castro, 1987)

#### 2.2.5 Vurdering av in situ Spenningsforhold

En hver måling tatt fra et sted trenger nødvendigvis ikke å være for i-ro-tilstand for jordtrykket fordi det er vanskelig å måle den horisontale spenningen uten å forstyrre jorden på noen måte. Dessuten har overkonsolidering, som kommer av avlasting eller tidsavhengige faktorer, forskjellige effekter på det horisontale trykket. Her kan ligningen til Mayne og Kulhawy (1982) og andre ligninger som baserer seg på empiriske sammenhenger brukes til å estimere K<sub>0</sub> basert på OCR. På en annen side er det ikke ofte at prekonsolideringsspenningen som kommer ut av ødometerforsøker er den samme som in situ. Figur 5 viser forskjellen i spenningsstien for en laboratorieprøve i et ødometerforsøk og spenningsstien ved pålasting in situ.

### 2.2.6 Mikrostruktur

Å analysere et kornet jordmateriale på mikrostrukturnivå kan være nyttig for å forstå dens unike atferd og hvordan hvert korn påvirker hverandre. Dette leder til en bedre forståelse på makronivå. Selv om dette arbeidet ikke har direkte relevans med geoteknikk så kan det fortsatt ha betydning for ingeniørpraksis.

K<sub>0</sub> beskriver effekten av jordtrykk på makronivå, men er uten tvil forankret i mikromekanikk. Khan et al. (2014) utførte en DEM (Discrete Element Method) analyse på et kornet, sandlignende, tørt materiale med forskjellige fasonger. Analysen ble utført som et enaksialt trykkforsøk og resultatet er vist i Figur 16. Her avtar K<sub>0</sub> smått under pålasting og øker etterpå kraftig under avlasting. Det er fasongen på materialet for de forskjellige prøvene og hvordan disse påvirker de interpartikulære kreftene som gir forskjellene i K<sub>0</sub>. Mer kompleks fasong på kornene gir en høyere interpartikulær skjærmotstand gjennom låsing mellom kornene og flere kontaktpunkter, og den horisontale støtten for å holde materialet for en viss last kan være lavere.



Figur 16: Simulering av K0 med forskjellig fasong på kornene ved lasting (start med K0 mellom 0,5 og 0,6) og avlasting (Avsluttet med K0 over 0,8) for enaksialt trykkforsøk (Khan et al., 2014)

# 2.3 Kontinuerlig Ødometer

På 60- og 70-tallet ble det gjennomført en rekke forsøk for å sammenlignetrinnvis (IL) og kontinuerlig ødometer (CL). Trinnvis ødometer ble først utviklet rundt 1910 av J. Frontard i Frankrike (Bjerrum et. al., 1960) og videreutviklet av K. Terzaghi, A. Casagrande og D. Taylor ved MIT på 20-, 30- og 40-tallet. Kontinuerlig ødometer ble utviklet på 60-tallet.

For kontinuerlig ødometer finnes det tre velkjente prosedyrer: konstant tøyningshastighet (CRS), konstant kontinuerlig pålasting og kontinuerlig poretrykksforhold (CPR). Fordelene en så med å benytte kontinuerlig ødometer var i hovedsak i følge Janbu, Tokheim og Senneset (1981) redusert tidsbruk, lavere risiko for forstyrrelse av prøven da lasten påføres jevnt og resultatene kan presenteres direkte i spenning-tøynings-kurven.

Crawford (1964) var først ut med å gjennomføre forsøk hvor han brukte kontinuerlig pålasting. Poretrykket ble neglisjert ved å benytte en lav lastfrekvens og han kunne dermed enkelt fremstille effektivspenning mot tøyning. Selv om Crawford registrerte poretrykket ble ikke kompressibilitet og permeabilitet bestemt. Dette var antagelig fordi det manglet ligninger for tolkning av resultatene. Aboshi, Yoshikumi og Maruyama (1970) utledet senere tilfredsstillende tolkningsligninger for konstant kontinuerlig pålasting gjennom å utføre flere forsøk. Senere kom Lowe et. al. (1969) med en prosedyre hvor poretrykksgradienten kontrolleres konstant ved hele tiden å justere tøyningshastigheten. Dermed holdes poretrykket i bunnen konstant.

Smith og Wahls (1969) utviklet ligninger som kunne tilnærmet tolke CRS-forsøket ved å observere poretrykket i bunnen og anta en fordeling av poretrykket gjennom prøven. Under forsøkene ble poretrykket i bunnen registrert til opp mot 50 % av den påførte vertikale lasten. Dette tillater raske forsøk. Senere utdypet Wissa et. al. (1971) CRS-forsøket ved å se på den kortvarige perioden hvor poretrykket i bunnen justerer seg mot den bestemte tøyningshastigheten.

Crawford (1964) oppdaget at prekonsolideringsspenningen ble påvirket av lastpåføringshastigheten og at det var et samsvar mellom økt hastighet og økt  $p_c$ '. Senere viste IL-forsøk av Senneset (1978) og IL- og CL-forsøk av Ludvigsen (1978) og Senneset og Ludvigsen (1979) at denne effekten var vesentlig mindre enn det Crawford (1964) hadde oppdaget.

## 2.3.1 CRS

En av de tidligste benevningene av CRS-forsøk ble gitt av Hamilton og Crawford (1959) hvor det i hovedsak var diskusjon på prekonsolideringsspenningen for sensitive leirer. De så at CRS kunne brukes som en hurtig måte å bestemme både prekonsolideringsspenningen og poretalleffektivspennings-forholdet. Selv om forsøkene viser lavere kompressibilitet for CRS sammenlignet med tradisjonell testing så holder fasongen på kurvene seg nokså like.

Senere skrev Crawford (1964) om at effekten av tøyningshastigheten lenge hadde blitt ignorert i setningsanalyser. Ved bruken av tynne prøver i laboratoriet bemerket han at lastpåføringen under konsolidering skjedde ved en hastighet flere mollioner ganger høyere enn lastpåføringshastighetene in-situ. Data fra CRS lignet ganske mye på data fra standard konsolideringstester selv ved bruk av forskjellige belastningsvarigheter.

### 2.3.2 Teori

Både Crawford (1965) og Wahls og Degodoy (1965) brukte i sitt arbeid en antagelse for å relatere gjennomsnittlig poretrykk med det målte poretrykket i bunnen. Denne antagelsen må være til stede for å kunne bestemme effektivspenningene og dermed bestemme forholdet mellom poretallet og effektivspenningene. I motsetning til disse antagelsene baserte Smith og Wahls (1969) sin matematiske modell på visse initielle antagelser. Dermed ble forholdet mellom gjennomsnittlig poretrykk og det målte poretrykket i bunnen utledet som en del av teorien basert på disse initielle antagelsene. Tilnærmingen med initielle antagelser tillater også å bestemme forholdet mellom konsolideringskoeffisienten, cv, og poretallet. Dette har tidligere ikke blitt utviklet for CRS og dermed har også CRS-forsøkets nytte vært begrenset.

Formuleringen av Smith og Wahls (1969) matematiske modellen for CRS-forsøk er svært lik Terzaghis (1943) endimensjonale teori. CRS-modellen er fremstilt ved å introdusere fem av Terzaghis antagelser. Disse er:

- 1. Jordmaterialet er både homogent og mettet.
- 2. I forhold til jordskjelettet er både vannet og tørrpartiklene inkompressibel.
- 3. Darcys lov for strømming i jord er gyldig.
- 4. Jorden er avgrenset horisontalt slik at drenering bare oppstår vertikalt.
- 5. Både totale og effektiv spenninger er konstant langs horisontale plan. Dette betyr at forskjeller i spenninger forekommer bare mellom forskjellige horisontale plan.

Utledning av ligningene, for å kunne beregne poretrykket og konsolideringskoeffisienten i et CRSforsøk, i Smith og Whals (1969) matematiske modell er vist i Vedlegg A.

# 3 Splittet Ring Ødometer

Splittet ring ødometer ble utviklet ved institutt for geoteknikk ved datidens Norges Tekniske Høgskole (i dag Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet). Allerede i 1982 hadde de en mekanisk utgave av utstyret, men som senere er blitt videreutviklet og forbedret. Bakgrunnen for å utvikle dette utstyret er å måle de horisontale spenningene under vertikal pålasting. Dette kan ikke gjøres med standard ødometer da stålringen er fastmontert. Denne ringen ble derfor splittet i tre like store deler (sidestykker) og flere fordeler ble oppnådd. Fordelene var blant annet en lettere innbygging da stålet kunne klemmes rundt jordprøven og det kunne foretas målinger av de horisontale spenningene under vertikal påkjenning (Senneset 1989). Et alternativ til dette er å bruke treaksialapparat, men justering av celletrykket slik at det ikke forekommer noen horisontale deformasjoner er vanskelig.

For å bestemme komprimeringsparameterne for en jordprøve er det ofte bare standard ødometerforsøk som kan brukes i dag. En utfordring med dette er at K<sub>0</sub>-verdien er ukjent når jordprøven når flytegrensen. Noe som er interessant ifølge Leroueil og Tavenas (1987) er at flyt under K<sub>0</sub> forhold sjeldent forekommer ved  $K_0^{NC}$ -verdien hverken in situ eller i laboratoriet. Dette har betydning for bestemmelsen av parameterne fra ødometerforsøk. Prekonsolideringsspenningen kan være forskjellig fra den virkelige spenningen. Dette påvirker OCR og leder derfor til feil in situ tøyningshastighet. Ved å registrere det horisontale trykket kan spenningsstien tegnes.

Som nevnt tidligere er ringen delt i tre like store av stål. Disse er montert på en dreiechuck og kan justeres for enklere å kunne bygge inn en uforstyrret jordprøve. Til hver av de tre ståldelene er det limt på en membranplate av messing eller lignende metall. Inne i stålet står det i hver del en høysensitiv LVDT (en elektrisk transformer som måler lineær forflytning) inntil membranen. LVDT'ene leser av det horisontale trykket og hvordan dette utvikler seg gjennom å måle deformasjonen av et punkt i metallplaten på stålringen. Det er viktig å finne egendeformasjonen for å kunne avgjøre om dette er en feilkilde. Det er også viktig å holde temperaturen konstant da membranen og LVDT'ene er svært følsomme for temperaturendringer. Sidestykkene montert sammen med membranen og LVDT'ene kalles for radielle trykksensorer.

# 3.1 Overbelastning og reparasjon av membranen på sidestykkene

Under det siste testforsøket forekom det en feil i datamaskinen som fikk den til å starte på nytt like etter at kontortiden var over. Dette førte til at motoren ikke lenger fikk beskjed om å kjøre til maksimallasten som var bestemt for så å holde denne. Motoren fortsatte å kjøre med konstant deformasjonshastighet helt til neste morgen. Da hadde membranen i alle tre sidestykkene allerede blitt overbelastet. Dette medførte at alle tre hadde sprukket under de høye horisontale spenningene som hadde oppstått. Det står i manualen (Svaan, Sandven og Moen, 1992) at forsøket skal stoppe automatisk ved 4 mm deformasjon, men dette skjedde ikke i dette tilfellet, mulig på grunn av at datamaskinen hadde startet på nytt.

Det ble vurdert til at LVDT'ene og de radielle trykksensorene skulle byttes ut med nye deler som kunne måle trykket hele vegen langs sidestykket. De nye sensorene skulle også være temperaturuavhengige slik at forsøkene ikke er avhengig av temperaturkontrollerte rom. Det ble etter hvert klart at levering av disse kunne tidligst skje like rundt fristen for denne oppgaven og det ble derfor besluttet å forsøke å reparere delene som var ødelagt. Ved bruk av tilpassede biter fra en valset messingplate og limet Loctite ble delene reparert og kalibrering kunne utføres. Kalibreringen er beskrevet i kapittel 3.4.

Noe trøbbel ble registrert etter reparasjonen. Chucken ble tregere å skru sammen og ble sensorene skrudd tett sammen hoppet de radielle sensorene mest sannsynlig på grunn av påføring av aksial last da disse stakk noe utenfor kanten på sidestykkene.

# 3.2 Utstyr

For å kunne kjøre forsøket er det en del nødvendig utstyr som må være klargjort og tilstede.

### Forberedelse til kjøring av forsøk:

- Splittet ring ødometer
- Ødometerpresse
- Datamaskin med Labview programvare
- Spenningsregulator
- Tilpasningsenhet
- Måleenhet som registrerer voltverdiene fra forsøket og videresender disse til datamaskinen.
- Vugge
- Trådsag med tynn tråd
- Toppfilter m/diameter ca. 53,4 mm
- Bunnfilter
- Ultralydbad
- Skål med destillert vann for at topp- og bunnfilter skal være mettet
- Silikonolje
- Silikon tettingsmasse
- Eksikatorfett
- Spruteflaske med destillert vann

### For innpakking for å hindre uttørking av prøven:

- Kopp med destillert vann
- Nylongarn til transport av vann fra kopp til toppstykke
- Plastfolie til innpakking av presse
- Isoporkasse (Hindrer temperaturfluktuering)

# 3.3 Prosedyre

Svaan, Sandven og Moen (1992) har laget en detaljert beskrivelse på hvordan utstyret skal brukes. Manualen er noe gammel og det er gjort modifikasjoner på utstyret. Her er en oppsummering for kontinuerlig ødometer med innslag av nye detaljer som er tilført. Det er i tillegg vist et forenklet tverrsnitt av oppsettet i Figur 17. Bilder fra innbyggingsprosedyren er vist i Vedlegg G.

### Forberedelse og klargjøring av ødometeret:

- 1. Juster chucken ved hjelp av chucknøkkelen ved å frigjøre, flytte og så festes chucken.
- 2. O-ringen i sokkelen påføres eksikatorfett og sporet til ringen rengjøres.
- 3. Så påføres et tynt lag med silikonolje i sporet før O-ringen legges på plass og på innsiden av ringen. I tillegg skal det være silikonoljeolje i fugene mellom seksjonene.



Figur 17: Forenklet tverrsnitt av ødometer med splittet ring (Senneset, 1989)

#### Innbygging av prøve:

- 1. Fyll destillert, luftfritt vann i poretrykkskammeret og avløpsrøret. Skyv så bunnfilteret, som er ferdig renset og vakumert, på plass med den glatte siden opp.
- 2. Vei en ferdig tilskjært prøve med høyde på ca. 40 mm på. Pass på slik at de nederste 25 mm ikke blir forstyrret.
- 3. Nullstill poretrykksmåleren.
- 4. Plasser så prøven på sokkelen og fjern det overflødige vannet med en pipette eller papir.
- 5. Legg silikontetting mellom de tre delene til ringen.
- 6. Nullstill målerne av horisontalspenningene og stramme chuckene sammen til kontakt ved å se at det gir utslag på målerne.
- 7. Prøven må nå trimmes til riktig høyde ved å skjære fra senter av prøven og ut. Pass på at ståltråden ikke faller ned imellom sidestykkene hvis det er en liten åpning.
- 8. Avkappet veies så med en gang etter tilskjæring. Differansen mellom veiing i punkt 2 og denne veiing gir våtvekt av prøven.
- 9. Legg så toppfilteret, med en diameter på 53,6 mm, på plass med den glatte siden ned. Det er viktig å være nøye med plasseringen slik at feillasting ikke forekommer på prøven da prøvediameteren er 54 mm. Pass på at toppfilteret er mettet eller fuktig for å unngå uttørking av prøven.
- 10. Sett ødometeret på plass i pressen og sett på toppstykket.
- 11. Nullstill lastmåleren.
- 12. Etabler kontakt mellom toppstykket og lastmåleren. Det er viktig at toppstykket er sentrert. For å undersøke hvor langt det er igjen til kontakt kan toppstykket løftes forsiktig opp til kontakt registreres. (Husk å sette i låsepinnen).
- 13. Nullstill deformasjonsmåleren.
- 14. Velg tøyningshastighet og sett i gang lastingen. Her kan også maksimal vertikal last velges.
- 15. Forsøket er nå klart til å kjøre.

### Etter forsøket:

- 1. Stopp motoren og registreringen.
- 2. Skru ned pressen ved å vri på tannhjulet.
- 3. Ta ut ødometeret og åpne det med chucken.
- 4. Ta ut prøvemateriale og bruk gjerne papir som ikke løser seg opp i vann for å få med alt. Materialet tørkes så i 24 timer og tørrvekten veies.
- 5. Rengjør ødometeret og tørk bort eventuelt vannsøl.

# 3.4 Kalibrering av Splittet Ring Ødometer

Alle verdiene som måles blir registrert i volt (V) og det er derfor viktig å kunne omregne disse til kilopascal (kPa). Disse omregningsfaktorene er allerede lagt inn i dataprogrammet. Fra tidligere har både Ramberg (2009) og Sletten (2015) kalibrert utstyret uten å finne vesentlige avvik (Sletten (2015) kalibrerte de radielle trykksensorene og poretrykket). Det antas derfor at utstyret kan brukes uten kalibrering selv om det er blitt brukt i ettertid. For de radielle trykksensorene måtte det utføres ny kalibrering og legge inn de nye verdiene i programmet da membranene var byttet ut. Det er også verdt å legge til at en vesentlig endring i utstyret er at måleforsterkeren er fjernet.

Kalibreringen utføres på følgende måte:

#### Lastcelle:

Lastcellen skrus ut av pressen og settes inn i en ødometerrigg. Når vektarmen i ødometeret står i likevekt nullstilles lastmåleren. Det legges så vekt på vektarmen trinnvis og det registreres hvilke verdier lastcellen gir for de ulike pålastingene som gjøres. Pålastingen skjer helt opp til maksimal verdi for lastcellen. Derfor er det viktig at det sjekkes hva som er maksimal last denne tåler for å unngå overbelastning. Etter maksimal pålasting lastes riggen av og nullstillingen kontrolleres. (Svaan, Sandven og Moen, 1992).

Forekommer det forskjell mellom påført og avlest last må det en ny omregningsfaktor beregnes ved hjelp av påført last og registrert volt i lastcellen. Denne omregningsfaktoren legges inn i kalibreringsfilen.

#### Poretrykksmåler:

For kalibrering av poretrykksmåleren er der to muligheter.

Den første etter Svaan, Sandven og Moen (1992), med noe modifikasjon, tar for seg at poretrykkskammeret og avløpet fylles med luftfritt, destillert vann. O-ringen legges så på plass. En messingkloss eller lignende med en diameter større enn diameteren på O-ringen plasseres på denne sentrisk. Klossen spennes så fast slik at det blir klem på O-ringen. Poretrykket nullstilles og avløpet kobles til trykkluft og en kalibreringsenhet. Trykkluften påføres og økes litt etter litt. Det utføres avlesning av voltverdi og trykkverdi på kalibreringsenheten. Deretter avlast til null. Pass på å ikke overskride maksimal kapasitet for poretrykksmåleren.

Den andre er etter Ramberg (2009). Her fylles også poretrykkskammeret og avløpet med luftfritt, destillert vann og O-ringen legges på plass. Ved å tre en pakning rundt en messingplate og legge denne på O-ringen kan trykkluft påføres pakningen. På samme måte som tidligere påføres trykkluft og avlesninger blir foretatt.

#### Deformasjonsmåler: (kontinuerlig i presse)

Før kalibreringen av deformasjonsmåleren kan starte må den posisjoneres riktig da deformasjonsmåleren sitter fast i åket, på toppen av pressen. Dette gjøres ved å plassere en stålkloss med høyde 20 mm i på bunnen i ødometeret med tilhørende filter og toppstykke over. Et micrometer plasseres i toppen av ødometerpressen. Micrometeret måler forskyvningen i mm i forhold til endringen i voltspenningen. Ødometeret plasseres så i pressen og det etableres kontakt mellom pressen og toppstykket. Deformasjonsmåleren løsnes så fra åket med en unbrakonøkkel og justeres til avlesningen er tilnærmet 0 før den festes. Ødometeret fjernes nå fra pressen og bunnplaten beveges så til maksimalt utslag for på deformasjonsmåleren. Forskyvningen og antall volt leses av micrometeret. (Svaan, Sandven og Moen, 1992).

#### Radielle trykksensorer:

Kalibreringen av sidetrykket er gjort på en noe annen måte enn hva som er beskrevet i Svaan, Sandven og Moen (1992) da stålrammen som skal benyttes manglet. I stedet ble selve pressen benyttet som ramme.

Klargjøringen av kalibreringen skjer ved at bunnfilteret legges på plass over poretrykkskammeret for så å dekkes av gummi eller papir for å unngå at ballongen ikke skal trenge inn i filterporene. Deretter skrus seksjonene sammen. En ballong festes så med en o-ring til sentrisk tapp med gjennomgående hull på en messingplate med diameter lik 120 mm (Figur 18 -a-). På oversiden av messingplaten er det en nippel slik at en saranslange kan festes. Messingplaten legges så på chucken så sentrisk som mulig med ballongen ned (Figur 18 -b-). Saranslangen går inn i en hul stålsylinder med et lite hull på siden hvor slangen kommer ut igjen. Denne sylinderen plasseres sentrisk over messingplaten (Figur 18 -c-). Chucken med messingplate og stålsylinder plasseres så i pressen og pressen skrus og strammes slik at stålsylinderen sitter godt i toppen (Figur 18 -d-, husk å demontere lastmåleren før montering). Saranslangen festes så til to nye slanger med en splitter hvor den ene slangen festes i en trykkalibreringsenhet (Figur 18 -e-) og den andre slangen til en trykkventil. Trykkventilen er koblet til trykkluft.

Før tilføring av trykkluften nullstilles sidetrykket. Ved forsiktig å tilføre trykkluft kontrolleres det tilførte trykket på kalibreringsenheten. Ved valgte intervaller leses så av de registrerte voltverdien for de tre sidetrykkssensorene av. Ut fra de registrerte voltverdiene og de påførte trykkintervallene kan omregningsfaktorer for hver av sidetrykksmålerne beregnes.

### Egendeformasjon:

Under pålasting måles ikke bare deformasjon av prøven, men også for måleapparatet. For å få riktige tøyninger må egendeformasjonen trekkes fra de registrerte deformasjoner. Disse kan finnes ved å plassere en stålkloss, eller stålskive, med høyde på 20 mm, filter og toppstykke i ødometeret. Ved pålasting vil ikke stålklossen deformeres og den målte deformasjonen kommer av at de resterende delene gir etter. Den påførte lasten plottes mot deformasjonen og kurven kan skrives om til en ligning. (Svaan, Sandven og Moen, 1992).

For utstyret som er brukt her er ligningen for egendeformasjonen beregnet av Ramberg (2009) til:

$$\delta_{egendeformasjon} = 0.057 \cdot F(kN)^{0.47}$$
(12)

#### Motorspenning:

Ved å innstille spenningsregulatoren på en kjent spenning kan hastigheten kalibreres. Dette gjøres ved å benytte et micrometer for å måle bevegelsen i løpet av et minutt. Ved å gjenta dette for forskjellige spenninger skal man se at hastigheten på motoren er proporsjonal med spenningen. (Ramberg, 2009).



-a-



-C-



-d-



Figur 18: -a- Messingplate med vanlig gummiballong. -b- Messingplaten over splittet ring ødometer. -c- Stålsylinder med hull til saranslange. -d- Splittet ring ødometer, messingplate og stålsylinder montert i pressen klar til kalibrering. -e-Trykkalibreringsenhet.

# 4 Laboratoriet

Dette kapittelet presenterer laboratoriearbeidet som skal gjennomføres (foruten splittet ring ødometeret) med enkelte problemstillinger.

# 4.1 Tidligere undersøkelser av leirmaterialet

Materialet som brukes i denne oppgaven er Tillerleire fra et område ca. 10 km sørøst for Trondheim i Norge på et område som blir kalt Kvenild. Denne leiren har ifølge Gylland et. al. (2013) blitt brukt til forskning av NTNU siden tidlig 1980-tallet på grunn av at det er mye kvikkleire i dette området, sin tykkelse, at den er ensartet, har høy sensitivitet og ligger nært Trondheim. Området ligger på ca. 125 meter over havet.

Prøven som brukes i dette forsøket er tatt fra dybden 2,0-2,8 m med en 74 mm stålsylinder. Ifølge de tidligere undersøkelsene skal denne leiren ikke være sensitiv og dermed ikke kvikk. I tillegg indikerer også dybden hvor prøven er tatt fra at det ikke er kvikkleireoppførsel da prøver fra denne dybden vanligvis er tørrskorpeleirer.

En av de viktigste parameterne for splittet ring ødometerforsøkene er  $p_c'$ . Fra Gylland et. al. (2013) er det gjort ett tidligere forsøk fra 54 mm stålprøvetaker på ca. 2,5 meters dybde som resulterte i  $p_c' \approx$ 190 kPa. Dette betyr at splittet ring ødometerforsøket skal kjøres med en vertikallast høyere enn 190 kPa.

Andre parametere som er funnet tidligere (disse er lest ut fra grafer):

- OCR registrert til ca 6
- Leirinnhold: 36-38 %
- Vanninnhold: 25-30 %
- Massetetthet: 1,93-2,02 g/cm<sup>3</sup>
- Omrørt skjærstyrke: 2-8 kPa
- Saltinnhold: 0,9 g/l
- Plastisk indeks, I<sub>P</sub>: 4,5 %
- Flyteindeks, I<sub>L</sub>: ≈ 2

Det vil bli gjort indextester på denne sylinderen for å se om verdiene er tilnærmet de samme eller avviker i stor grad.

### 4.1.1 Prøvetaking

Prøvetaking kan påvirke strukturen til leire om den ikke utføres på en god og forsiktig måte. Ved dårlig prøvetaking kan strukturen begynne å bryte ned. Som beskrevet tidligere er  $K_0$ ' avhengig av strukturen og selv om mindre prøveforstyrrelser normalt ikke påvirker  $K_0^{NC'}$  påvirker den leirens atferd, spesielt rundt prekonsolideringsspenning.

Ved å benytte 74 mm stålsylinder minker sjansen for forstyrret materiale samtidig som prøvene normalt sett holder høyere kvalitet. Det er vanlig at de ytterste 5 – 10 cm i hver ende er noe forstyrret. Det er derfor valgt å benytte leire fra midten av prøven til hovedforsøkene og for indekstestingen brukes leiren fra endene samt avkappet rundt leiren som benyttes til hovedforsøkene.

### 4.1.2 Leirens Aktivitet

Leirens aktivitet (Skempton, 1953) er en sammenheng mellom kationbytter og kolloidal aktivitet i materialet og er en beskrivelse av leirens potensiale til å binde vann (leirens hygroskopiske egenskaper) og dermed potensialet til å forme ioniske bindinger. I kapittel 2.2.3 er det forklart hvordan dette påvirker  $K_0'$  i hovedsak in situ. Leirens aktivitet beregnes slik:

$$Aktivitet = \frac{Plastisk \, Indeks \, (I_P) \, [\%]}{Andel \, Leire \, [\%]}$$
(13)

Aktiviteten deles inn i tre kategorier:

•	Inaktiv leire	– Aktivitet: < 0,75	(Lite aktiv)
•	Normal leire	– Aktivitet: 0,75 til 1,25	(Middels aktiv)

• Aktiv leire – Aktivitet: > 1,25 (Aktiv)

Fra Gylland et. al. (2013) er aktiviteten i leiren beregnet til 0,12.

# 4.2 Forsøk

På grunn av mindre tid etter overbelastningen av splittet ring ødometeret ble testprogrammet utarbeidet til å inkludere:

- 2 splittet ring ødometer (1 uforstyrret, 1 omrørt)
- 2 vanlig ødometer (For å kontrollere p<sub>c</sub>' og prøveforstyrrelse)
- 1 ødotreaksial (For å sammenligne med splittet ring ødometrene)
- 1 vanlig treaksial (For å kontrollere prøveforstyrrelse)

I løpet av forsøkene ble det gjort noen endringer grunnet trøbbel med forsøkene. Det ble kjørt et ekstra uforstyrret splittet ring forsøk på grunn av uttørking av det første og et ekstra ødometerforsøk på grunn av dårlige resultater. Dette medførte at det vanlige treaksialforsøket ble kuttet på grunn av mangel på leire. Det ble vurdert å åpne en ny sylinder, men meningen med å kontrollere prøveforstyrrelsen falt da bort.

Forsøkene splittet ring ødometer, ødotreaksial og treaksial krever prøvediameter på 54 mm. Til dette ble det brukt en ståltrådsag med tynn ståltråd for å minske risikoen for prøveforstyrrelser.

I tillegg til de overnevnte forsøkene er det gjennomført indekstesting for klassifisering av leiren. Følgende indekstester er blitt utført:

- Kornfordeling
- Vanninnhold
- Atterbergs konsistensgrenser
- Densitet
- Korndensitet
- Konus
- Saltinnhold
- Humus

# 4.3 Treaksialforsøk

I et treaksialapparat kan en prøve påføres forskjellige spenningstilstander slik at belastningsforsøk er tilpasset de aktuelle in-situ spenningene prøven har opplevd. Prøven bygges inn i en gummimembran i en tett celle slik at et vanntrykk (celletrykk) kan påføres for å skape isotropiske spenninger rundt prøven. Ved å belaste prøven vertikalt fås isotropiske spenninger. I et treaksialforsøk måles endringene i aksialt påført kraft, deformasjon, poretrykk og utpresset porevann fra prøven og et forsøk kan kjøres både drenert og udrenert.

### 4.3.1 Apparatur

Treaksialapparatene hos NTNU er beregnet på prøver som er sylindriske, 100 mm høye og 54 mm i diameter. For å kunne måle poretrykk og utføre drenerte forsøk er det koblet slanger til topp- og bunnstykket som leder ut av cellen og inn i en ventilblokk. Videre ut fra denne ventilblokken går det slanger til poretrykksmåler, byretten som måler utpresset porevann og til atmosfæretrykket. For å påføre celletrykket brukes en vanntank som er påført lufttrykk, og ved å regulere innslippsventilen kan celletrykket bestemmes.

Forberedelse og innbyggingsprosedyre for treaksialforsøket finnes detaljert beskrevet i CEN ISO/TS 17892-8 (2004) og prinsippskisse av apparatet er vist i Figur 19.



Figur 19: Prinsippskisse av apparat for treaksialforsøk (Vegdirektoratet, 2014)

### 4.3.2 Ødotreaksialforsøk

Et ødotreaksialforsøk (CAoeU(D)) utføres som en variant av anisotropisk konsolidert treaksial trykkforsøk (CAUc). I dette tilfellet er konsolideringen drenert og utføres slik at  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  og  $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_a$  for å opprettholde ødometerforholdene. Følgelig skal prøven ikke endre tverrsnittetsarealet,  $A_0$ , under konsolideringen. For at tverrsnittsarealet ikke skal endres justeres celletrykket  $\sigma_3$  slik at endringen i volumet av prøven er likt med utpresset porevann. Endringen av volumet defineres av den vertikale deformasjonen,  $\delta_v$ , multiplisert med tverrsnittsarealet, følgelig:  $\Delta V = \delta_v \cdot A_0$ . Spenningsstien vises for ødotreaksialforsøk prinsipielt på Figur 20. Konsolideringensstien for ødokonsolidering tilsvarer i-ro-forhold i ødometeret (fra "0" via "d" til "e" i figuren) og kan brukes til å bestemme K<sub>0</sub>' ved følgende formel med parametere fra Figur 20.

$$K_0' = \frac{\sigma_{3,0}' + a}{\sigma_{1,0}' + a} = \frac{1}{1 + 2S_0}$$

Etter at ødokonsolideringen er over gjennomføres et vanlig drenert eller udrenert skjærforsøk og spenningsstien fortsetter fra e via f og videre mot g. For denne oppgaven skal ikke skjærforsøket gjennomføres. I stedet skal prøven stå med konstant vertikal last under kryp med åpen drenering. Under krypdelen blir det antatt ingen endring i horisontal spenning da det ville påkrevd å sitte og kontrollere forsøket hele tiden. Endringene som forekommer av utpresset porevann og aksialdeformasjon viser om hviletrykkskoeffisienten øker eller minker.

Et problem med ødotreaksialforsøket er å kontrollere celletrykket slik at det holder den horisontale deformasjonen lik 0. Celletrykket endres manuelt og det fører til usikkerhet rundt resultatet og om ødometerbetingelsene er tilfredsstillende. Ved geoteknikklaboratoriet ved NTNU er det under utvikling å kunne kontrollere celletrykket automatisk. Både mekanisk innretting og dataprogram er laget, men det har enda ikke rukket å bli testet ut.

En prinsippskisse av testapparatet er vist i Figur 19.



Figur 20: Prinsippskisse for spenningsstien til et ødotreaksialforsøk (NTNU, 2014)

## 4.4 Ødometer

Ødometerforsøkene i denne oppgaven skal primært benyttes til verifisere prekonsolideringsspenningen funnet hos Gylland et. al. (2013) og for å kontrollere om det er noen prøveforstyrrelser i materialet. Alle de utførte forsøkene er gjort med CRS.

## 4.4.1 Utstyr og Prosedyre

Til forsøket benyttes ødometrene i presse ved NTNU og disse har enveis drenering. Til innbyggingen skal det være et toppfilter og et bunnfilter, som er mettet i destillert, luftfritt vann gjennom ultralydbad og eksikator. I tillegg må det være destillert, luftfritt vann i en separat skål.

Til innbygging av prøven brukes et eget stativ med en metallring (ødometerringen som gir ingen horisontale deformasjoner). Prøven plasseres i dette stativet og metallringen blir presset ned i prøven. Når prøven kommer ut noen millimeter på den andre siden låses stativet og prøven trimmes. Deretter legges det en plate over prøven slik at prøven ikke kan presses lengre ut. Stativet snus så opp ned og trimming av den andre enden blir gjort. Til slutt trimmes utsiden av ringen.

Ødometeret fylles så med det destillerte, luftfrie vannet og alle eventuelle luftlommer fjernes med en spiss gjenstand. Bunnfilteret sklis på plass med den glatte siden opp og hele bunnen av ødometeret fylles med en tynn vannfilm. Sensorene i ødometeret nullstilles nå og prøven monteres med toppfilteret for så å låses fast med en ytre ring. Deretter plasseres toppstykket og kontakt etableres med lastmåleren. Tøyningshastighet og maksimal belastning programmeres så med eventuelle andre lastforløp.

I Vedlegg I vises innbyggingsprosedyren av ødometer i bilder.

### 4.4.2 Vurdering av prøveforstyrrelse

For å kunne vurdere eventuelle prøveforstyrrelser brukes poretallsforholdet  $\Delta e_{e_0}$  etter Lunne et. al. (2006). Her er  $\Delta e$  endringen i poretallet og  $e_0$  det initielle poretallet. Poretallsforholdet brukes under konsolideringsfasen for både ødometer og triaksialforsøk. For ødometeret betyr dette endringen av aksialtøyning opp til in situ effektiv vertikalspenning.

Poretallsforholdet beregnes som i ligning 14.

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\varepsilon_a \cdot (1 + w \cdot \rho_s)}{e_0} \tag{14}$$

Det initielle poretallet kan beregnes på to måter. Den første er for en fullmettet prøve. Da blir det initielle poretallet:

$$e_0 = w \cdot \rho_s \tag{15}$$

Er ikke prøven mettet blir ligningen:

$$e_0 = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot S_r} \tag{16}$$

Tabell 2: Kriterier for evaluering av prøveforstyrrelser kvantifisert ved forholdet  $\frac{\Delta e}{e_0}$  og OCR. (Lunne et. al., 2006)

Prøvens kvalitetskate				
OCR	Veldig bra til	Bra til middels (2)	Dårlig (3)	Meget dårlig (4)
	utmerket (1)			
1-2	< 0,04	0,04 - 0,07	0,07 - 0,14	> 0,14
3-4	< 0,03	0,03 - 0,05	0,05 - 0,10	> 0,10

# 4.5 Rekonsolidering av omrørt prøve

Rekonsolidering av en omrørt leirprøve ble gjort for å se hvordan en nylig omrørt prøve uten at kryp er påført fra tidligere vil oppføre seg sammenlignet med en uforstyrret prøve. Dette kapittelet beskriver utstyret som er brukt og framgangsmåten for omrøring og rekonsolidering.

### 4.5.1 Utstyr

Til rekonsolideringen ble det benyttet en god del utstyr som tidligere var brukt til testing med små CPT'er. Et plastrør med diameter 74-74,5 mm (1) og et plastikkdeksel (2) la grunnlaget sammen med et stativ (Figur 21 -b-) og stempel fra CPT-forsøkene (3). Stempelet måtte slipes ned til riktig diameter, og ved bruk av staget (4) og det hule stempelet (5) kunne stempelet (3) styres vertikalt for å minke friksjonen og minske risikoen for at det satt seg fast. Det ble brukt et papirfilter (6) i bunn og et i toppen for å hindre leiren i å presses ut. I bunnen ble dette erstattet med et annet papirfilter som tettet bedre (Figur 21 -d-) og opprinnelige papirfiltre ble lagt dobbelt på toppen.

I tillegg trengs det vekter til å utføre konsolideringen og eventuelt en slangeklemme til å feste på staget over stativet for å feste flere vekter om det er behov for dette. Figur 22 -b- viser ferdig innbygd prøve med vekter.









-d-

Figur 21: -a- Utstyret: Plastrør høyde 13 cm og diameter 74-74,5 mm (1), Plastikkdeksel til tetting av bunn (2), Stempel (3), Styrestag (4), Toppstykket som holder staget vertikalt (5), Papirfiltre (6). -b- Stativet med montert sylinder. -c-Nærbilde av montert sylinder. -d- Nytt papirfilter i bunnen montert. Revnen i filteret hadde ingen betydning for tettingen.

Sylinderen ble plassert i en skål med vann både for å forhindre søl om vannet skulle komme ut fra sylinderen og for å hindre at vannet skulle fordampe så mye at prøven begynte å tørke. Stativet ble så pakket inn i plast når vektskivene var plassert.

## 4.5.2 Prosedyre

Til rekonsolideringen av omrørt prøve ble det brukt en stor mengde leire. For å kunne få en helt omrørt prøve er det essensielt å tilføre vann slik at leiren blir til slurry for å oppløse alle bindingene i prøven. Vannet som tilsettes skal ha samme saltinnhold som funnet i indekstestingen, men da denne verdien er svært lav (> 1 g/l) ble salt i vannet neglisjert og kun destillert vann ble benyttet.



Figur 22: -a- Ferdig innbygd prøve. -b- Ferdig innbygd prøve plassert i stativ. -c- Innpakket i plast med vekter på toppen.

I første omgang ble ca. 7 cm av sylinderen benyttet og prøven ble plassert i en skål (Se Figur 23 -a-). Der ble den tilsatt noe vann før den ble delt opp i biter. Disse bitene ble så lagt over i en dobbel plastpose (for å forhindre at hele prøven går til spille om den første posen revner) og ved å klemme på posen samtidig som destillert vann ble tilsatt litt etter litt ble strukturen brutt ned. Etter at leiren føltes glatt og fin gjennom posene ble den siktet gjennom et 500 μm sikt ved hjelp av mer destillert vann for å få bort de siste klumpene (Figur 23 -b-). Til slutt gjenstod det å røre i leiren og tilsette noe vann for å få blandingen jevnet ut til en slurry.

Etter å ha blandet godt rundt ble vanninnholdet i leiren målt to ganger til 98,2 % og 98,6 %. Dette er høye verdier og generelt ved NTNU brukes det et vanninnhold rundt 60 % for slurry. Slurryen ble så tømt over i den klargjorte sylinderen. Allerede av sin egen vekt ble det observert at slurryen presset seg fra bunnen og opp mellom bunnproppen og sylinderen og ved plassering av stempelet presset også slurryen seg forbi filteret i toppen og gjennom åpningene i stempelet. Det ble dermed tilsatt mer leire ved å ta avkapp fra leiren til det første splittet ring ødometerforsøket. Dette avkappet gikk gjennom samme prosedyre som nevnt over med en endring. Ved å erstatte det destillerte vannet med en del av slurryen kunne det totale vanninnholdet senkes. Etter at ny slurry var laget ble vanninnholdet målt til 55,8 % og 55,9 %. I tillegg ble filteret i bunnen byttet ut med et annet og tettere filter. Slurryen ble så helt i sylinderen på nytt og papirfiltrene ble lagt på toppen. Sylinderen ble så plassert i skålen med vann og satt inn i stativet. Der ble stempelet med stag montert. Etter å ha lagt på de første vektskivene ble hele stativet pakket inn i plast. Tilslutt ble de siste vektskivene lagt på staget over stativet og konsolideringen ble utført med en spenning på ca. 28 kPa.



Figur 23: -a- Prøven som skulle rekonsolideres. -b- Sikting av omrørt prøve. -c- Ferdig slurry. -d- Humusrester i siktet.

Etter at prøven hadde konsolidert i 4 døgn var det registrert over 20 mm deformasjon. Prøven skulle så presses ut ved å ta av plastikkdekselet, men dette ville ikke av. Det endte med at bunnen ble saget av nærmest mulig bunnen på leiren. Under utpressingen ved hjelp av stempelet ble sidene forstyrret noe, men ikke mer enn at dette gjaldt bare området som skulle skjæres bort før innbygging av prøve. Ferdig konsolidert prøve og utpresset prøve er vist i Figur 24.

Erfaringsmessig etter rekonsolideringen kunne prøven ha stått lengre for å bli fastere. Den var vanskelig å både flytte og arbeide med da den var svært myk og klebrig.

Vanninnholdet av prøven ble registrert etter splittet ring ødometerforsøket var gjennomført.







-d-

Figur 24: -a- Utpresset vann på toppen av prøven. -b- Toppen av prøven etter utpresset vann er tømt av. -c- Bunnen måtte kappes av for å få presset ut prøven. -d- Ferdig utpresset prøve med noen forstyrrelser langs sidene fra utpressingen.

## 4.6 Temperaturendinger

Fra en tidligere masteroppgave (Sletten, 2015) med splittet ring ødometer vises det hvor stor innvirkning temperatursvingninger har på K<sub>0</sub>'. Her svingte K<sub>0</sub>' med en verdi på 0,05 i løpet av et døgn i forhold til temperaturen i rommet utstyret stod i. Det er antatt at temperatursvingningene kommer av om ventilasjonen er slått på eller av med medfølgende temperaturøkning/-reduksjon.



Figur 25: K<sub>0</sub>' over tid med store variasjoner (Sletten, 2015)

For å løse dette er utstyret plassert i et temperaturkontrollert kjølerom hvor temperaturen er forsøkt å holde konstant på 7 °C, men rommet klarer ikke å holde lavere temperatur enn 8,7 °C. Det er imidlertid registrert temperaturendringer på rundt 2 grader ved at døren til rommet åpnes, tilstedeværelse i kjølerommet og generelt ved at viftene i rommet skaper sirkulasjon av luften og slår seg av og på innenfor gitte temperaturer. Ved bruk av en temperaturlogger av typen Easylog EL-USB-1 PRO fra Lascar electronics, med nøyaktighet på ±0,2 °C og registrering temperaturen ved gitte loggeintervaller, plassert liggende på det ene sidestykket ble det avdekket hvor stor innvirkning temperatursvingningene har på utstyret med hensyn på bestemmelse av K<sub>0</sub>'. For både testforsøkene og hovedforsøkene er loggeintervallet satt til én måling for hvert minutt.

For å ta hensyn til denne temperaturendringen ble det laget en kasse av isopor som plasseres over ødometeret. Det ble benyttet isoporplater med tykkelse på 5-6 cm som ble teipet sammen og selv om det var en viss åpning under kassen hvor alle kablene lå var resultatet svært bra ved at temperaturen holdt seg tilnærmet konstant inne i kassen. Resultatet av kassen er vist i Figur 26.

Se Figur 52 og Figur 53 for resultater fra prøveforsøkene med temperaturmåling i Vedlegg F. I Figur 53 ble det ikke kjørt noe eget forsøk på selve splittet ring ødometeret.



Figur 26: Isoporkassen som ble laget for å holde temperaturen mest mulig konstant. Nederst sees luken for å kunne kontrollere forsøket inne i kassen.

# **5** Resultater

I dette kapittelet vil resultatene fra laboratoriet presenteres og diskuteres.

# 5.1 Kalibrering

For kalibrering antas det at alle nevnte kalibreringer fra kapittel 3.4 stemmer bortsett fra de radielle trykksensorene. På grunn av at membranene som deformeres er byttet ut på alle de tre sensorene må disse kalibreres på nytt. Kalibreringen ble utført flere ganger. De første forsøkene på kalibrering ble gjort i romtemperatur og hadde stor spredning i kalibreringsverdi. Det samme skjedde for kalibreringene når rommet var kjølt ned. Det ble tilslutt besluttet å bruke verdiene fra det siste kalibreringsforsøket selv om starten av kalibreringen ikke gav noen utslag på sensorene (Se Vedlegg E). Det ble også observert endringer i spenningen over tid i alle de tre radielle trykksensorene uten noen fysiske påkjenninger på membranen.

Da denne oppgaven tar for seg å undersøke om jordtrykkskoeffisienten endrer seg under kryp uten fokus på tallverdier vil grafene vise eventuelle endringer selv om tallverdiene er feil.

# 5.2 Resultater fra indekstesting

### Beskrivelse:

Prøven ble presset ut forsiktig med spesialutstyr (se Figur 27) på verkstedet for geoteknikk. På grunn av at prøven blir presset ut vertikalt oppover måtte prøven deles i tre deler for å unngå at den ville kollapse/bli forstyrret under sin egen vekt. De tre delene er avbildet i Figur 28.

Prøven var meget fast uten synlige forstyrrete områder av sprekker, omrørt materiale eller forstyrrelser av dårlig forberedelse av sylinderen. Visuelt er dette leire eller leire med en del silt og det er ingen klare laginndelinger å se. Derimot er det funnet enkelte klare laginndelinger under tilskjæring av prøven. Det er også observert skjellrester og organisk materiale sporadisk gjennom hele prøven, se Figur 29. Det er ingen spesiell lukt fra prøven annet enn vanlig «fjærelukt» og det var ingen tegn til organisk materiale i prøven før den ble bearbeidet.

Inndelingen av prøven for forsøkene er vist i Vedlegg B og resultatene fra indekstesting er i tillegg vist på eget skjema i Vedlegg C.

## Vanninnhold:

Vanninnholdet har stor svært stor spredning fra 26,6 % i det første ødometerforsøket til 34,6 % fra den andre densitetsmålingen med liten ring. Variasjonene kan ikke sikkert forklares. Noe av forklaringen er naturlige forskjeller, men også tiden fra prøveåpning til måling av vanninnholdet spiller en viktig rolle. Her er w<sub>x</sub> og w<sub>ro\_liten\_x</sub> målt like etter prøveåpningen og stemmer derfor veldig bra. I tillegg gjelder også lagringstid av prøver til ødometer- og splittet ring ødometerforsøkene og om de er lagret på riktig måte.

<b>W</b> <sub>1</sub>	W2	<b>W</b> <sub>3</sub>	Wro_liten_1	Wro_liten_2	$W_{split_1}$	W <sub>split_2</sub>	W <sub>split_3</sub>
31,1 %	33,5 %	29,6 %	32,2 %	34,6 %	28,6 %	31,5 %	31,5 %
Wødo_1	Wødo_2	Wødo_3	Wødotreaks		Wtriaks		
26,6 %	28,9 %	33,0 %	Ikke aktuelt		Ikke aktuel	t	

#### Tabell 3: Vanninnhold fra indekstesting og forsøk

#### Atterbergs konsistensgrenser:

Flyteindeksen varierer mye med vanninnholdet og indikerer at materialet både har og ikke har kvikkleireoppførsel.

Plastisiteten for leiren er klassifisert som lav til så vidt medium (grensen går ved I<sub>P</sub> lik 10).

#### Tabell 4: Konsistensgrenser

	Flytegrense, w <sub>1</sub>	Plastisitetsgrense,	Flyteindeks, I∟	Plastisitetsindeks, I <sub>P</sub>
		Wp		
1	30,7 %	19,8 %	0,62 – 1,36	10,9 %
2	30,7 %	21,8 %	0,76 - 1,66	8,9 %





Figur 27: -a- Montering av sylinder før utpressing av prøve. -b- Utpressing av prøve





-C-

Figur 28: Utpressed prøve delt i tre med dybder -a- fra 2,03 m til 2,23 m, -b- fra 2,23 m til 2,53 m, -c- fra 2,53 m til 2,80 m



Figur 29: -a- Humus i leiren. -b- størrelse på noen av humus- og skjellrestene som er funnet.

#### Densiteter, porøsitet og poretall:

Det er ikke store forskjeller i densitet og korndensitet fra indekstestingen. For beregninger gjort senere er det brukt tyngdetetthetene  $\gamma = 19,0 \frac{kN}{m^3}$  og  $\gamma_s = 27,5 \frac{kN}{m^3}$ . For porøsitet, poretall og metningsgrad er det noe større spredning på resultatene da vanninnholdet varierer en del.

Sylinder, $\bar{ ho}$	Liten ring 1, $ ho_1$	Liten ring 2, $\rho_2$		Kornder	is. 1, $ ho_{s_1}$	Korndens. 2, $\rho_{s_2}$
1,95 g/cm <sup>3</sup>	1,95 g/cm <sup>3</sup>	1,91 g/cm <sup>3</sup>		2,81 g/c	m³	2,79 g/cm <sup>3</sup>
19,17 kN/m <sup>3</sup>	19,11 kN/m <sup>3</sup>	18,76 kN/m <sup>3</sup>		27,6 kN/	′m³	27,4 kN/m <sup>3</sup>
Porøsitet, n Pore		Poretall, e			Metnings	grad, S <sub>r</sub>
45,1 % - 48,4 % 0,82 -		0,82 – 0,94			0,89 – 1,0	0

Tabell 5: Densiteter, porøsitet og poretall

#### Kornfordeling:

Kornfordelingskurvene er vist i Vedlegg D. Disse viser relativ høy homogenitet gjennom prøven da kurvene nesten overlapper hverandre. I starten er det en rar oppførsel for Split Ring 1 og Split Ring 2 (rekonsolidert leire). Dette kommer av at det er brukt for mye tørrmasse i hydrometeranalysen etter en misforståelse med brukermanualen. For disse er det brukt henholdsvis 52,60 g og 52,79 g med tørrmasse. Den optimale mengden skal være rundt 35 g. Selv om kurvene ser merkelig ut i starten påvirker dette ikke de senere målingene og leirinnholdet er derfor korrekt vist. Kornfordelingen for Split Ring 3 er det brukt mindre tørrmasse (32,4 g) og kurven fra dette forsøket gir noe høyere innhold av leire og innhold av grov silt. Det er mulig at leirinnholdet på 38,5 % stemmer bedre for prøvesylinderen.

Leirinnholdet i sylinderen varierer fra 31,5 % til 38,5 %. Dette gjør at prøven klassifiserer som leire.

#### Skjærstyrke ved konus:

Det ble utført tre konusforsøk på leirprøvene. Konus 1 og 2 er utført på leire rett fra sylinderen, mens konus rekonsolidert er utført på restene av den rekonsoliderte leiren etter innbygging av splittet ring ødometerforsøket. Begge konusene fra sylinderen gir svært like verdier. Den rekonsoliderte konusen gir som forventet lavere skjærstyrke da leiren ikke har hatt tid til å lage bindinger mellom kornene.

#### Tabell 6: Resultat fra konusforsøk

	Uforstyrret, S <sub>u</sub>	Omrørt, S <sub>r</sub>	Sensitivitet, S <sub>t</sub>
Konus 1, $ abla_1$	39,7 kPa	4,9 kPa	8,1
Konus 2, 🔽	39,2 kPa	4,8 kPa	8,2
Konus rekonsolidert	2,8 - 4,5 kPa	2,4 - 2,8 kPa	1,0 - 1,9

#### Saltinnhold:

Saltinnholdet som er funnet i prøven er svært lavt. Dette betyr for rekonsolideringens del at vannet som tilsettes prøven kan være rent, destillert vann da saltinnholdet er neglisjerbart. Til sammenligning defineres kvikkleire ved et saltinnhold lavere enn 5 g/l porevann.

#### Tabell 7: Saltinnhold

Salt <sub>1</sub>	$Salt_2$
≈ 0,40 g/l	≈ 0,75 g/l

#### Humus:

For beregning av humusinnholdet ble det brukt overskuddsmateriale fra andre indekstester og ødometerforsøk slik at prøven som er brukt er representativ for hele sylinderen. I og med at det er brukt mye masse ble det plukket ut 7 prøver etter uttørking av knust materiale. Prøve nummer 7 veltet i ovnen da døren lukket slik at denne er utelukket fra resultatene.

Resultatene i Tabell 8 viser et lavt innhold av humus. Det lave innholdet kan også være leire som er brent bort i løpet av de 24 timene de stod i varmeovnen. Dette betyr at det er svært lite små partikler av humus i sylinderen selv om det visuelt er funnet store organiske tråder (se Figur 29).

#### Tabell 8: Humusinnhold

Humus 1	Humus 2	Humus 3	Humus 4	Humus 5	Humus 6
0,6 %	0,6 %	0,6 %	0,5 %	0,4 %	0,5 %



Figur 30: Brent leire for undersøkelse av humusinnhold.

#### Leirens aktivitet:

Leirens aktivitet varierer fra 0,23 til 0,35. Dette klassifiserer leiren som inaktiv eller lite aktiv. Den lave aktiviteten tilsier at leirens potensiale til å skape ioniske bindinger er begrenset og passer godt inn til hva som er normalt for norske leirer (Aarhaug, 1984).

#### **Oppsummering:**

Sammenlignet med de tidligere undersøkelsene i Gylland et. al. (2013) er det noen store variasjoner, men de fleste undersøkelsene er svært like.

Leirinnholdet i rapportens leirmaterial varierer mellom 31,5 % og 38,5 % og dette er noe lavere eller likt med tidligere funn og det tyder på at 38,5 % mulig er riktig verdi selv om variasjoner kan forekomme. Vanninnholdet er svært likt og her ligger rapportens funn noe over de høyeste verdiene for tidligere funn. Massetetthetene som er funnet er så å si like. Det samme gjelder også for den omrørte skjærstyrken og saltinnholdet. Den plastiske indeksen for rapportens leire er dobbelt så høy som tidligere funn. Flyteindeksen varier mye på grunn av variasjon i vanninnholdet i leiren, men ligger under verdien fra tidligere undersøkelse.

Ut ifra indekstestene som er utført er materialene fra de forskjellige prøvene svært like.

## 5.3 CRS Ødometer

Det ble utført tilsammen tre ødometerforsøk. Det tredje forsøket måtte utføres på grunn av dårlige resultater i de to første forsøkene. I Figur 31 vises spenning-tøyningskurven for alle de tre utførte forsøkene.

Det første forsøket ga dårlige resultater da filteret på ødometer 1 hang igjen på kanten. Ved  $\sigma'_v \approx 700$ kPa løsnet filteret fra kanten og spenningen gikk ned før videre påføring av tøyning fikk spenningen til å øke igjen. Selv om filteret hang fast ga spenning-tøyningskurven en godt lesbar prekonsolideringsspenning. Hvis filteret ikke hadde hengt seg fast ser det ut til at spenningtøyningskurven ville ha fulgt ødometer 3.

Ødometer 2 ga ingen prekonsolideringsspenning. Her kan mulig innbyggingsfeil ha forstyrret prøven slik at den mistet strukturen sin selv om det er ingenting som tyder på dette ut ifra at prøven fikk kvalitetskategori (2). Det tredje forsøket ga veldig gode verdier med en fin spenning-tøyningskurve hvor prekonsolideringsspenningen kunne leses av. I tillegg hadde denne prøven kvalitetskategori (1).

Det skal også nevnes at både forsøk 2 og 3 hadde en merkelig utvikling i poretrykket henholdsvis mellom 650 og 1050 kPa og mellom 100 og 230 kPa. Denne utviklingen er vanskelig å forklare.

Andre feilkilder for alle prøvene kan være at leiren ikke er homogen. Dette kan gi ulik respons fra forsøk til forsøk. I tillegg er det som nevnt tidligere funnet humus og skjellrester i leiren. Dette vil også kunne påvirke resultatene.

I Tabell 9 er prøvekvalitetskategori og et utvalg nøkkeltall fra ødometerforsøkene presentert og i Vedlegg J er det detaljerte presentasjoner av hvert ødometerforsøk.



Figur 31: Spenning-tøyningskurve for alle ødometerforsøk.

Tabell 9: Nøkkeltall og prøvekvalitetskategori fra ødometerforsøkene.

Ødometer	1	2	3
Dybde prøve	2,15 m	2,20 m	2,35 m
$\sigma'_{vo}$	24,35 kPa	24,80 kPa	26,15 kPa
Tøyning ved $\sigma_v'$	0,011624	0,017273	0,012229
w	26,6 %	28,9 %	33,0 %
$\Delta e/e_0$	0,0353	0,0360	0,0254
Kvalitetskategori	Bra til middels bra (2)	Bra til middels bra (2)	Veldig bra til utmerket (1)
p <sub>c</sub> '	≈ 140 kPa	-	≈ 125 kPa
OCR	5,80	-	4,80

# 5.4 Splittet Ring Ødometerforsøk

Totalt ble det utført 3 forsøk med splittet ring ødometer. Egentlig var det bare tid til to forsøk, men da det første forsøket var ubrukelig ble tiden på det andre forsøket redusert slik at et tredje forsøk kunne utføres med samme betingelser som det første. Alle forsøkene ble startet ved 1 kPa i både vertikal og horisontal spenning og kjørt med konstant deformasjonshastighet på ca. 3 µm/min.

I de påfølgende underkapitlene er grafene «K<sub>0</sub> - Tid», «Horisontal - Vertikalspenning» og «Vertikalspenning - Tøyning» presentert sammen med vurdering av hvert forsøk. Grafene for «Spenninger - Tid», «K<sub>0</sub>'/Temperatur - Tid», «Tøyning - Tid» og «Spenningssti» er vist for hvert av forsøkene i Vedlegg H.

I spenningsstigrafene i Figur 58, Figur 62 og Figur 66 er det også inkludert den kritiske tilstandslinjen M ( $\phi$ -linjen) og K<sub>0</sub>-linjen. Disse er definert på følgende måte:

$$M = 6 \frac{\sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \tag{17}$$

og

$$K_0 - linje = 3 \frac{1 - K_0^{NC}}{1 + 2 \cdot K_0^{NC}}$$
(18)

På grunn av mangel av resultater fra treaksialforsøk brukes verdiene  $\phi = 29^{\circ}$  og c' = 6 kPa, hentet fra Gylland et. al. (2013), for  $\phi$ -linjen. For K<sub>0</sub>-linjen brukes  $K_0^{NC}$ -verdien funnet fra forsøkene, men da tallverdiene mest sannsynligvis ikke stemmer vil denne linjen bare være omtrentlig.

Nøkkeltall og prøvekvalitetskategori for alle forsøkene er oppsummert i Tabell 10.

Split ring	1	2	3
Dybde prøve	2,45 m	- (2,50 m)	2,30 m
$\sigma'_v$	27,05 kPa	28,70 kPa	25,70 kPa
Tøyning ved $\sigma_v'$	0,009996	0,034768	0,014016
w	28,6 %	31,5 %	31,5 %
$\Delta e/e_0$	0,0209	0,0724	0,0292
Kvalitetskategori	Veldig bra til utmerket	Dårlig (3)	Veldig bra til utmerket (1)
	(1)		
K <sub>0</sub> <sup>NC</sup>	0,43	0,50	0,40

Tabell 10: Nøkkeltall o	; prøvekvalitetskategori	fra splittet ring	ødometerforsøkene.
-------------------------	--------------------------	-------------------	--------------------

#### 5.4.1 Split Ring 1 - Uforstyrret CRS - 250 kPa

Resultatene fra det første forsøket endte med å bli ubrukelig. Etter å ha diskutert med det geotekniske personalet på NTNU om hvorfor poretrykket fikk et så stort sug (se Figur 55) etter ca. 5 000 minutter (ca. 3,5 døgn) ble det avdekket at toppfilteret hadde tørket ut. Når toppfilteret tørker ut skaper dette et kapillært sug og begynner å trekke ut vannet i leiren. Dette foregikk nesten fram til ca. 17 000 minutter (ca. 8 døgn) ut i forsøket før poretrykket på nytt stabiliserte seg rundt 0 kPa. Det antas at ved ca. 12 000 minutter har leirprøven tørket ut så mye at luft blir sugd inn i prøven for å

fylle tomrommet etter vannet. Resultatene fram til dette poresuget starter kan benyttes da det ikke har påvirket forsøket. Resultatene etter ca. 5 000 minutter er ubrukelige.

For å motvirke uttørking av toppfilteret ved senere forsøk ble det besluttet å plassere kopper med vann inne i ødometerpressen for å skape høyere luftfuktighet. I tillegg skulle det plasseres nylontråder fra en av koppene som strekker seg til toppstykket. Dette ble gjort for å skape et kapillært sug fra vannet i koppen slik at vannet kunne dryppe ned gjennom toppstykket og på toppfilteret. Tilslutt skulle hele ødometerpressen pakkes inn plastfolie for å holde på den ekstra luftfuktigheten.



Flytepunktet for forsøket er funnet svært svakt og er på tilnærmet 90 kPa.





Figur 33: Horisontal - Vertikalspenning - Splittet ring ødometer 1.



Figur 34: Vertikalspenning - Tøyning - Splittet ring ødometer 1.

## 5.4.2 Split Ring 2 - Omrørt CRS - 100 kPa

Det andre forsøket ble gjort på leire som var helt omrørt for så å bli rekonsolidert til ca. 28,7 kPa. Som forventet ble denne prøven klassifisert som dårlig (3) da det ikke har vært nok tid til at kornstruktur og bindinger har kunnet dannet seg. Det er heller ikke funnet noe flytepunkt for dette forsøket.

Prøven var fortsatt svært myk og i Figur 35 vises det godt hvor fingrene var plassert ved uthenting av prøve etter ferdig forsøk og det var like før prøven skled ut av fingrene den korte tiden det tok å flytte den fra apparatet og over i porselensskålen før tørking.

Utviklingen av K<sub>0</sub>' i krypfasen viser i Figur 36 ingen endring før etter ca. 14 000 minutter. Etter dette begynner K<sub>0</sub>' å øke fra ca. 0,5 og opp til ca. 0,57. Av samme figur ser man at temperaturen fluktuerer svært mye og det er vanskelig å finne noen eksakt verdi. Det er ikke noe tydelig sammenheng mellom små endringer i temperaturen i Figur 60, som mest sannsynlig kommer av måleunøyaktigheten for instrumentet, og det er derfor å anta at fluktueringen kommer av feil i målingene i sidetrykksmålingene eller ved elektroniske forstyrrelser.

På tross av dette er det dette forsøket som gir best samsvar med det som er forventet. Etter at K<sub>0</sub>' i OC-området når sitt laveste punkt ved ca. 0,4 stiger den opp til NC- området og  $K_0^{NC}$  ligger ca. på 0,5 før krypfasen starter og  $K_0^{NC}$  øker.

Med tanke på uttørkingen som skjedde i det første forsøket var det i dette forsøket ingen tegn på uttørking av toppfilteret.



Figur 35: Bilde av prøven fra Split Ring 2 etter den er tatt ut fra apparatet. Merk inntrykkingen ved tre plasser hvor prøven ble hentet ut ved hjelp av fingrene.



Figur 36:  $K_0$ ' - Tid - Splittet ring ødometer 2.



Figur 37: Horisontal - Vertikal effektivspenning - Splittet ring ødometer 2.



Figur 38: Vertikal effektivspenning - Tøyning - Splittet ring ødometer 2.

### 5.4.3 Split Ring 3 - Uforstyrret CRS - 250 kPa

Det siste forsøket ble utført på samme måte som det første forsøket og viste som det andre forsøket ingen tegn på uttørking av toppfilteret. Under åpning av plastfolien rundt ødometerpressen ble det observert svært høy luftfuktighet da dugg/vanndråper hadde festet seg på alle overflatene.

For dette forsøket vises det tydelig i Figur 39 at K<sub>0</sub>' øker over tid gjennom hele forsøket, men økningens hastighet avtar jo lengre ut i forsøket endringene registreres. Hoppet i K<sub>0</sub>' ved ca. 12 500 minutter kommer av at luken på isoporkassen ble stående åpen et par timer. I tillegg fluktuerer K<sub>0</sub>' med en høyere frekvens i dette forsøket enn det gjorde under Split Ring 2. Det ser også ut til at det var dårlig kontakt mellom leiren og de radielle trykksensorene ved starten av forsøket. I Figur 40 begynner ikke den horisontale effektivspenningen å øke før den vertikale effektivspenningen når ca. 30 kPa. Dette er noe merkelig fordi ved sammenskruing av apparatet ble det registrert kontakt, men det er også observert at målerne gir noe utslag på sammenskruing. I tillegg har Ramberg (2009) bemerket at det er vanskelig å oppnå kontakt ved sammenskruing og for å motvirke dette ble det plassert elastisk tape på membranen. På grunn av dette vil K<sub>0</sub>'-verdiene være lavere enn hva som er registrert da vertikalspenningen ikke starter ved null når horisontalspenningen begynner å øke.












Figur 41: Vertikal effektivspenning - Tøyning - Splittet ring ødometer 3.

### 5.5 Ødotreaksial

Kjøringen av ødotreaksialforsøket strandet før selve forsøket kunne starte. Låsepinnen på treaksialapparatet var defekt og under konsolideringen som foregikk over natten hadde denne hoppet ut av sporet sitt og hele trykkcellen var blitt presset helt ned i laveste posisjon. Låsepinnen hadde vært delvis defekt tidligere, men ved dette forsøket var den blitt helt ødelagt.

Det ble forsøkt å rette opp i problemet, men uten hjelp fra fagkyndig kunne ikke utstyret fikses. Det store problemet var å få motoren til å feste seg til platen som skrur cellen oppover. Da de andre treaksialapparatene ved NTNU enten var opptatt med andre forsøk eller manglet programvare til å kjøre en krypfase ble denne forsøksmetoden valgt bort. Forsøket har heller ikke kunnet blitt kjørt på noe særlig tidligere tidspunkt da ingen apparater har vært ledige for en to-ukers periode.

Konsolideringen det er snakk om her er en lav isotropisk konsolidering ved 20 kPa for å ha et startpunkt for prøven. Selve ødotreaksforsøket skulle starte etter denne konsolideringen.

I Figur 42 og Figur 43 vises tilskjæring og ferdig innbygd prøve før forsøksstart. Her er det observert humus og to klare laginndelinger som visuelt er svært forskjellig fra resten av leiren.





-b-

Figur 42: -a- Tilskjæring av prøve. -b- Humus i prøven







Figur 43: -a- Ferdig tilskjært prøve i vugge med to tydelige laginndelinger i leiren. -b- Ferdig innbygd prøve i treaksialcelle.

### 5.6 Prøvekvalitet

Alle de tre «Spenning - Tøynings»-kurvene for splittet ring ødometeret har en fasong slik at prekonsolideringsspenningen er uklar eller ikkeeksisterende. Detter har også forekommet i tidligere arbeid med apparatet hos Ramberg (2009) og Sletten (2015). Her viser prøvene en myk respons i OCområdet og uklar prekonsolideringsspenning. Sammenlignes det med ødometrene som er utført har Ødometer 3 i Figur 31 har denne en meget klar prekonsolideringsspenning. Dette kan indikere at det er en feil i apparatet eller at innbygging eller kjøremåte påvirker resultatene.

### 5.7 Spenningsavhengighet for K<sub>0</sub>' (Stress Dependency of K<sub>0</sub>')

Figur 44 viser hvordan K<sub>0</sub>' endrer seg under pålasting vist ved å normalisere spenningen mot prekonsolideringsspenningen funnet i forsøkene. I grafen er Split Ring 2 ekskludert da det ikke ble funnet noen overkonsolideringsspenning. Både Split Ring 1 og Split Ring 3 har en unormal oppførsel i forhold til hva Cotecchia, Mitaritonna og Vitone (2011) og Olsson (2013) tidligere har beskrevet. Her angir de at K<sub>0</sub>' starter ved en høy verdi ved lav lasting for så å avta mot en minste verdi like rundt  $\sigma'_{\nu}/\sigma'_{c\nu} = 1$ . Etter dette skal K<sub>0</sub>' øke til en stabil  $K_0^{NC}$ -verdi ved ca.  $\sigma'_{\nu}/\sigma'_{c\nu} = 1,5-2$ . Split Ring 3 starter med en høy verdi, men faller svært raskt. For begge forsøkene øker K<sub>0</sub>' etter  $\sigma'_{\nu}/\sigma'_{c\nu} = 0,5$ , men de når ingen stabil  $K_0^{NC}$ -verdi før krypfasen begynner ved  $\sigma'_{\nu}/\sigma'_{c\nu} \approx 2,8$ . De store forskjellene mellom teorien og resultatene kommer i stor grad av at tallverdiene med stor sannsynlighet er feil. Også prøvekvaliteten kan spille inn på kurvene da minimumsverdien av K<sub>0</sub>' er sterkt påvirket av prøveforstyrrelser og strukturen i prøven. Minimumsverdien av K<sub>0</sub>' i K<sub>0</sub>'-Normalisert spennings-kurven viser hvor den høyeste vertikale spenningen jordskjellettet kan holde ved den laveste horisontale støtten jorden har før strukturen bryter sammen. Fra Sletten (2015) er dette vist ved at to forsøk er sammenlignet med henholdsvis 76 mm og 54 mm i prøvetakerdiameter. Det er forsøket fra 76 mm som gir et klart fall rundt  $\sigma'_{\nu}/\sigma'_{c\nu} = 1$  for så å stige etterpå. For forsøket fra 54 mm er dette fallet svært lite.



#### Figur 44: K<sub>0</sub>' plottet mot normalisert spenning

Resultatene fra Figur 44 kan sammenlignes med Jakys ligning for hviletrykkskoeffisienten, se ligning 4, for å se om resultatene er gode. Benyttes  $\phi = 29^\circ$ , fra kapittel 5.4, blir  $K'_0 = 0.52$  og dette gir nok et tegn på at tallverdiene fra forsøkene ikke er gode og erfaringsmessig burde  $K^{NC}_0$  være mellom 0,4 og 0,6. Forsøkene utført av Sletten (2015) viser god sammenheng mellom resultatene og ligning 4.

#### 5.8 Struktur

Gylland (2012) utførte en EPMA-skanning (Electron Probe Micro Analyser) for å lage et «backscatter» bilde (bilde tatt ved refleksjon av bølger eller partikler) på leire som er påført treaksialt skjær og hvor skjærbånd har utviklet seg. Bildet er vist i Figur 45 og viser hvordan leirmineralene har en tendens til å orientere seg langs skjærbåndet innenfor denne. Utenfor skjærbåndet ser det ut til at leirmineralene ikke har rotert noe på seg og representerer for det meste den opprinnelige leiren.

Endimensjonalt kryp for en leire hvor partiklene ligger horisontalt med flate mot flate (face-to-face) struktur er mer utsatt for ren kompresjon fremfor partikler som er reorientert. Som vist i Figur 45 er ikke mineralkornene i naturlig leire, slik som Tillerleire, homogen eller jevnt pakket. Mineralkornene i den testede prøven ligger for det meste med flate mot flate med forbehold om at innbyggingsmetoden for den skannede prøven har forstyrret det naturlige materialet. Tar man med dette i betrakning er det forventet at K<sub>0</sub>' ikke endrer seg i stor grad over tid i krypfasen.



Figur 45: Et backscatter bilde (bilde tatt ved refleksjon av bølger eller partikler) ved bruk av EPMA skanning av Tillerleire. Her vises tre forskjellige grader av forstørrelse med identifikasjon av utvalgte mineralerkorn (Gylland et. al., 2013)

### 5.9 Påvirkning av K<sub>0</sub>' ved valg av parametre

Resultatene fra «Spenningssti» for alle splittet ring ødometerforsøkene viser at spenningsstien starter i origo og øker med en helning større enn  $K_0^{NC}$ -linjen for Split Ring 2 og større enn  $\phi$ -linjen for Split Ring 1 og Split Ring 3. For Split Ring 1 og Split Ring 3 indikerer dette at de registrerte horisontale spenningene ikke er riktige. Mest sannsynlig er de for lave da høyere verdier ville ha ført spenningsstien inn mellom  $\phi$ -linjen og  $K_0^{NC}$ -linjen. For Split Ring 2 ligger spenningsstien mellom linjene, men dette kan være på grunn av at prøven som er brukt er rekonsolidert.

Ifølge Länsivaara (1999) i Figur 5 burde spenningsstien øke så vidt langs den gjennomsnittlige effektivspenningen, p' før den stiger oppover gjennom  $K_0^{NC}$ -linjen og når kritisk tilstand på  $\phi$ -linjen. Deretter burde spenningsstien gå mot  $K_0^{NC}$ -linjen og følge denne under videre lasting. I spenningsstiene i denne rapporten er ikke vertikalspenningen stor til at spenningsstien når ned til  $K_0^{NC}$ -linjen før krypfasen starter.

Under krypdelen av forsøkene viser både Split Ring 2 og Split Ring 3 en trend hvor K<sub>0</sub>' øker. Ved utvelgelse av OCR for en prøve som blir brukt i modelleringsprogrammer er det viktig å være klar over hva som har skapt overkonsolideringen i prøven. Ofte blir OCR oppfattet som ren avlasting noe som ikke alltid stemmer når kryp er tatt med i betraktningen. Ved å ikke skille mellom disse årsakene kan de initielle horisontale spenningene være feil. Hvis kryppåvirket OCR blir brukt som avlastning er det antatt at de horisontale spenningene blir høyere.

Det skal også nevnes at  $K_0^{NC}$ -linjen som er tegnet i sepnningsstiene ikke nødvendigvis er korrekte da tallverdiene for K<sub>0</sub>' er høyst usikre.



Figur 46: -a- Illustrering av volumendring for prøver med kant mot flate struktur og flate mot flate struktur. -b- Illustrasjon av forskjellen i spenningssti mellom virkelig og modellert OCR for avlastning. (Begge hentet fra Sletten, 2015)

## 6 Konklusjon og Videre arbeid

I dette kapittelet vil resultatene oppsummeres og konkluderes. I tillegg vil forslag til videre med problemstillingen bli presentert.

#### 6.1 Oppsummering og Konklusjon

Gjennom tidligere litteraturstudie samt et lite litteraturstudie har leiers generelle atferd blitt beskrevet med et større fokus på forhold som kan ha innflytelse på jordtrykkskoeffisienten. I tillegg har resultatene fra tidligere undersøkelser på utviklingen av K<sub>0</sub>' under kryp blitt presentert.

Videre har laboratoriearbeidet og tidligere relevante undersøkelser for Tillerleire blitt presentert slik resultatene kan sammenlignes for å kunne avdekke feil.

Når det gjelder utstyret har det vært mye trøbbel knyttet til splittet ring ødometeret og treaksialapparatet brukt til ødotreaksialforsøket. Ved det siste prøveforsøket for splittet ring ødometeret ble membranen i alle tre trykksensorene overbelastet og det tok lang tid å få reparert disse. Også Ødotreaksialforsøket som ble kjørt mot slutten av semesteret feilet på grunn av en defekt låsepinne og det var ikke tid til å fikse denne.

Det ble utført totalt tre forsøk med splittet ring ødometeret. Det første forsøket ga ubrukelige resultater for krypfasen da toppfilteret tørket ut. De to neste forsøkene, henholdsvis på omrørt, rekonsolidert leire og uforstyrret prøve ga greie nok resultater i forhold til å vurdere om hviletrykkskoeffisienten endrer seg under kryp. På grunn av vanskeligheter med kalibrering og tidvis krypatferd i membranene i splittet ring ødometeret er alle tallverdier som er funnet høyst usikre.

Split Ring 2, som er det omrørte og rekonsoliderte forsøket, hadde en utvikling under krypfasen der  $K_0'$  ikke endret seg på over 7 døgn. Mot slutten av forsøket startet  $K_0'$  å øke relativt hurtig.

Split Ring 3 øker hele veien gjennom krypfasen, men hastigheten på økningen avtar i større grad desto lengre ut i forsøket en undersøker.

Uten mulighet til å vurdere tallverdiene kan det konkluderes, med noe usikkerhet på grunn av krypoppførselen i membranene og lavt datagrunnlag, at  $K_0$ ' for Tillerleire fra dybden ca. 2,5 meter øker under kryp både ved pålasting på uforstyrret leire og ved pålasting på omrørt, rekonsolidert leire.

### 6.2 Anbefalinger til forbedringer og Videre arbeid

Anbefalingene til forbedringer og videre arbeid går i høyeste grad på utstyr og prosedyrer.

Det er allerede bestilt nye horisontale trykksensorer som skal monteres etter at denne rapporten er levert. Disse vil være temperaturuavhengige slik at forsøk kan kjøres romtempererte uten at det påvirker resultatene. Det anbefales at de gamle sensorene repareres på en ordentlig måte slik at det kan kjøres forsøk som sammenligner de gamle og nye sensorene. I tillegg bør chucken få en overhaling da denne begynte å bli meget treg å skru sammen for hvert forsøk. Dette kan komme av unøyaktigheter i montering av nye membraner og sliping av kantene på disse.

I tillegg til forbedringen med nye trykksensorer vil en sikkerhetsanordning være bra å ha i tilfelle datamaskinen på nytt feiler. Denne bør være slik at den stopper motoren når det ikke lengre kommer signaler fra datamaskinen. Dermed unngås det under krypfaser at motoren begynner å kjøre med konstant tøyningshastighet igjen.

Også loggetid for forsøkene med krypfase kan forbedres. For forsøkene i denne rapporten er det logget hvert 10. sekund. Dette kan økes til hvert minutt eller noe høyere for å unngå alt for store datafiler som er tunge å jobbe med.

Selv om ødotreaksialforsøket ikke ble utført kan denne metoden også forbedres i forhold til hvordan den skulle kjøres for denne rapporten. Det anbefales å teste ut det automatiske celletrykksjusteringen som er under utvikling. Fungerer dette som det skal kan ødotreaksialforsøkene kjøres med en lengre krypfase uten å må anta at det er ingen endringer som forekommer for så å se om dette stemmer.

### 7 Kilder

Aarhaug, O. R. (1984) Geoteknikk og fundamenteringslære 1. 1. utgave. Bekkestua: NKI-forlaget.

Aboshi, H., Yoshikumi, H. og Maruyama, S. (1970) 'Constant Loading Rate Consolidation Test', *Soils and Foundations*, 10 (1), 43-56.

Bjerrum, L., Casagrande, A., Peck, B. og Skempton, A. W. (1960) *From Theory to Practice in Soil Mechanics*. New York: Wiley

Bjerrum, L. (1967) 'Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings', *Géotechnique*, 17 (2), 81-118.

Bjerrum, L. (1973) 'Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils', *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow*, 8 (-), 111-159.

Bjerrum, L. og Holmberg, S. (1971) 'Preliminary report on long term consolidation test with measurements of horizontal stresses on the soft Bangkok clay', NGI internal report

Boudali, M. (1995) Comportement Tridmensionnel et visqueux des argiles naturelles. PhD avhandling. Université Laval, Québec.

Burland, J. B. (1990) 'On the compressibility and shear strength of natural clays', *Géotechnique*, 40 (3), 329-378.

Campanella, R. G. og Mitchell, J. K. (1968) 'Influence of temperature variations on soil behavior', *Journal of the soil mechanics and foundation division*, 94 (3), 709-734.

CEN ISO/TS 17892-8 (2004) 'Geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil – part 8: unconsolidated undrained triaxial test', *Technical report, ISO* 

Cotecchia, F., Mitaritonna, G. og Vitone, C. (2011) 'Investigating the influence of microstructure, loading history and fissuring on the clay response', *Proceedings of the Fifth International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*.

Crawford, C. B. (1964) 'Interpretation of the consolidation test', *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 90 (SM5), 87-102.

Crawford, C. B. (1965) 'The Resistance of Soil Structure to Consolidation', *Canadian Geotechnical Journal*, 2 (2), 90-115.

Gjengstø, B. A. (2016) *Et litterært studie på jordtrykkskoeffisienten under kryp*. Prosjektoppgave. NTNU, Trondheim

Gylland, A. S. (2012) Material and slope failure in sensitive clays. PhD avhandling. NTNU, Trondheim.

Gylland, A., Long, M., Emdal, A. og Sandven, R. (2013) 'Characterisation and engineering properties of Tiller clay', *Engineering geology*, 164 (1), 86-100.

Hamilton, J. J. og Crawford C. B. (1959) 'Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay', *Special Technical Publication No. 254 American Society for Testing and Materials*, - (-), 254-270.

Holtz, R. D., Jamiolkowski, M. B. og Lancellotta, R. (1986) 'Lessons from oedometer tests on high quality samples', *Journal of georechnical and geoenvironmental engineering*, 112 (8), 768-776.

Jaky, J. (1944) 'The coefficient of earth pressure at rest', J. Soc. Hung. Eng. Arch, - (-), 355-358.

Jaky, J. (1948) 'Pressure in silos', Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on soil mechanics and foundation engineering, 1 (-), 103-107.

Jamiolkowski, M. B., Ladd, C. C., Germaine, J. T., Lancellotta, R. (1985) 'New developments in field and laboratory testing of soils', *Proceedings of the 11<sup>th</sup> international conference on soil mechanics and foundation engineering*, 1 (-), 57-153.

Janbu, N. (1995) 'Deformation of soils with collapsible grain structure', The Ian Boyd Donald symposium on modern developments in geomechanics, Monash University, Australia, - (-) 127-137.

Janbu, N., Tokheim, O. og Senneset, K. (1981) 'Consolidation Tests with Continuous Loading', *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm*, 1 (-), 645-654.

Kavazanjian, E. og Mitchell, J. K. (1984) 'Time dependance of lateral earth pressure', *ASCE journal of the geotechnical engineering*, 110 (4), 530-533.

Khan, H., Morrissey, J. P., Ooi, J. Y., og Pittam, J. T. (2014) 'A discrete element analysis of the micromechanical interaction of non-spherical particles in cohesionless granular solids under K<sub>0</sub> condition', *Geomechanics from micro to macro - Proceedings of the TC105 ISSMGE International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro*, 1 (-), 183-188.

Länsivaara, T. T. (1999) A study of the mechanical behavior of soft clay. PhD avhandling. NTNU, Trondheim.

Leroueil, S. (2006) 'The isotache approach. Where are we 50 years after its development by professor Šuklje? (2006 prof. Šuklje's memorial lecture)', *Proceedings of XIII th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, - (-), -.

Leroueil, S. og Tavenas, F. (1986) 'Discussion on: effective stress paths and yielding in soft clays below embankments', *Canadian geotechnical journal*, 23 (3), 410-413.

Leroueil, S. og Tavenas, F. (1987) 'Laboratory and in situ stress-strain-time behavior of soft clays', *Proceedings of the international symposium on geotechnical engineering of soft soil, Mexico City*, - (-), -.

Leroueil, S. og Vaughan, P. R. (1990) 'The general and congruent effects of structure in natural and weak rocks', *Géotechnique*, 40 (3), 467-488.

Lowe, J., Jonas, E. og Obrician, V. (1969) 'Controlled gradient consolidation test', *Journal of Soil Mechanics and Division*, ASCE 95 (SM 1), 77-97.

Ludvigsen, K. N. (1978) Utvikling av kjøreprosedyrer for kontinuerlige ødometerforsøk og sammenligning med andre ødometermetoder. Hovedoppgave, NTH (Nå NTNU), Trondheim.

Lunne, T., Berre, T., Andersen, K. H., Strandvik, S. og Sjursen, M. (2006) 'Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays', *Canadian Geotechnical Journal*, 43 (7), 726-750.

Mayne, P. W. og Kulhawy, F. H. (1982) 'K<sub>0</sub>-OCR relationships in soil', *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 108 (6), 851-872.

Mesri, G. og Castro, A. (1987) ' $C_{\alpha}/C_{c}$  concpt and  $K_{0}$  during secondary compression', *Journal of geotechnical engineering*, 113 (3), 230-247.

Michalowski, R. L. (2005) 'Coefficient of earth pressure at rest', *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131 (11), 1429-1433.

Mitchell, J. K. (1993) 'Fundamentals of soil behavior', University of California, Berkley

NTNU (2014) *Lecture notes MSc course TBA4110 Geotechnics Field and Laboratory Investigations*. Trondheim: Geotechnical Division Norwegian University of Science and Technology.

Olsson, M. (2013) *On rate-dependency of Gothenburg clay*, PhD avhandling, Chalmers University of Technology.

Ramberg, S. (2009) Splittet ring ødometer - spenningsforhold i prekonsolidert områdelaboratorieforsøk og numerisk simulering. Masteravhandling. NTNU, Trondheim.

Sandven, R. (2005) Soil investigations : Geoteknikk, materialegenskaper : utstyr, prosedyrer og parameterbestemmelser, Bestemmelse av stivhetsparametere i laboratoriet, Ødometerforsøk. Norge: NTNU (Kompendium).

Schmidt, B. (1966) 'Earth pressure at rest related to stress history', Canadian geotechnical journal, - (3), 239-242.

Senneset, K. (1978) «Står som kilde i Janbu, Tokheim og Senneset (1981), men ikke i kildelisten»

Senneset, K. (1989) 'A new oedometer with splitted ring for measurement of lateral stress', 12<sup>th</sup> international conference on soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro, 1 (-), 115-118.

Senneset, K. og Ludvigsen, K. N. (1979) 'Setningsparametre bestemt ved kontinuerlige ødometerforsøk', *NGM-79*, 1 (-), 620-631.

Skempton, A. W. (1953) 'The Colloidal «Activity» of Clays'. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zürich*, 1 (-), 57-61.

Sletten, J. R. (2015) *On the Earth Pressure Coefficient at Rest During Creep*. Masteravhandling. NTNU, Trondheim.

Smith, R. E. og Wahls, H. E. (1969) 'Consolidation under constant rates of strain', *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 95 (SM 2), 519-539.

Store norske leksikon (2009) *Leirmineraler*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/leirmineraler (Hentet: 27/7-16).

Svaan, O., Sandven, R. og Moen, A. (1992) *Brukermanual splittet ring ødometer kontinuerlig og trinnvis versjon*, Rapport KS JL -1 V1.0. Trondheim: Norges Tekniske Høgskole.

Sällfors, G. (1975) *Preconsolidation pressure of soft, high plastic clays*, PhD avhandling, Chalmer University of Technology.

Terzaghi, K (1943) Theoretical soil mechanics. New York: Wiley

Terzaghi, K., Peck, R. og Mesri, G. (1996) *Soil mechanics in engineering practice*. 3<sup>rd</sup> edition. New York/Chichester/Brisbane/Toronto/Singapore: John Wiley and sons.

Tidfors, M. (1987) Temperaturens påverknad på leras deformationsegenskaper – en laboratoriestudie, PhD avhandling, Chalmer University of Technology.

Vegdirektoratet (2014) *Håndbok R210 – Laboratorieundersøkelser*. Tilgjengelig fra: http://www.vegvesen.no/\_attachment/185231/binary/1090658?fast\_title=H%C3%A5ndbok+R210+L aboratorieunders%C3%B8kelser+%2813+MB%29.pdf (Hentet: 27/7-16)

Wahls, H. E. og Degodoy, N. S. (1965) Discussion of 'Interpretation of the Consolidation Test', *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 91 (SM 3), 147-152.

Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. og Heiberg, S. (1971) 'Consolidation at constant rate of strain', *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE 97 (SM 10), 1393-1413.

### Vedlegg A - Utledning av Smith og Wahls (1969) Matematiske Modell

Basert på Darcys lov om kontinuiteten for strømming gjennom jord blir den grunnleggende ligningen for konsolidering som følger:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$
(19)

Her er k permeabilitetskoeffisienten, e er poretallet og u er endringen i poretrykket. Dette er en ikke lineær, partielldifferensialligning og kan ved å innføre de gjenværende antagelsene fra Terzaghi (1943) redusere ligningen til en klassisk endimensjonal ligning.

Når k er uavhengig av z blir ligning (19) som følger:

$$\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e}\frac{\partial e}{\partial t}$$
(20)

Der  $k = k(\overline{e}) = j(t)$ .

For CRS er prosedyren forklart ved at den vertikale tøyningshastigheten er konstant hele tiden. Ved å begrense horisontale bevegelser vil endringen av volum også være konstant og endringen blir uttrykt ved:

$$\frac{dV}{dt} = -RA \tag{21}$$

Der R er den konstante deformasjonshastigheten av den øvre flaten av prøven og A er arealet av tverrsnittet. Ved å se videre på ligning (21) så vil endringen av gjennomsnittlig poretall,  $\bar{e}$ , bli:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = \frac{1}{V_s}\frac{dV}{dt} = \frac{-RA}{V_s} = -r = konstant$$
(22)

Der  $V_s$  er volumet av fast, tørt stoff og  $\bar{e}$  kan også uttrykkes som:

$$\bar{e} = \frac{1}{H} \int_{0}^{H} e \, dz \tag{23}$$

Fra ligning (21) og (23) ser man at poretallet ved enhver posisjon og tid, e(z, t), er begrenset til en lineær funksjon av tid. På grunn av dette kan poretallet uttrykkes som funksjonen:

$$e(z,t) = g(z)t + e_0 \tag{24}$$

Der g(z) kun er en funksjon av dybden og  $e_0$  er det initielle poretallet.

Hvis g(z) hadde vært kjent i ligning (24) kunne ligning (20) blitt løst, men på grunn av at det ikke er praktisk å bestemme g(z) vil denne antas å være en lineær funksjon og (24) blir dermed:

$$e = e_0 - rt \left[ 1 - \frac{b}{r} \left( \frac{z - 0, 5H}{H} \right) \right]$$
(25)

Der b er en konstant som avhenger av variasjonen i poretallet med dybde og tid.

Det dimensjonsløse forholdet  $\frac{b}{r}$  forteller om variasjonen i poretallet med dybde og tid. Ved å se på bunnen av prøven, hvor z = H, vil ligning (25) reduseres til:

$$e_B = e_0 - rt \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{b}{r} \right) \right] \tag{26}$$

Hvis  $\frac{b}{r}$  settes lik 2 i ligning (26) vil poretallet være konstant i bunnen, noe som er urealistisk for de lave tøyningshastighetene som er blitt brukt. På den andre siden, hvis  $\frac{b}{r}$  settes lik 0 indikerer ligning (25) at poretallet er konstant med dybden. Det er derfor praktisk å bruke verdier mellom 0 og 2 for forholdet  $\frac{b}{r}$ .

Ved å bruke ligning (25) som definisjon av poretallet kan det ved å integrere ligning (20) to ganger med hensyn på z samt tilføre grensebetingelsene u(0,t) = 0 og  $\frac{\partial u}{\partial z}(H,t) = 0$  oppnå en løsning for poretrykket.

For situasjonen med  $\frac{b}{r} = 0$  vil løsningen for poretrykket bli:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[ Hz - \frac{z^2}{2} \right]$$
(27)

For situasjonen med  $\frac{b}{r} \neq 0$  vil løsningen bli som følger:

$$u = \frac{\gamma_{w}r}{k} \cdot \frac{\left\{zH\left[\frac{1+e_{0}-bt}{rt(bt)}\right] + \frac{z^{2}}{2rt} - \left[\frac{H(1+e_{0})}{rt(bt)}\right] \cdot \frac{H(1+e_{0})}{bt} + \frac{H(1+e$$

Der:

$$e_T = e_0 - rt \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{b}{r} \right) \right] \tag{29}$$

Ligning (28) blir veldig kompleks og det er derfor fordelaktig å benytte en forenklet, tilnærmet løsning. Antas det at nevneren (1 + e) fra den ene brøken i ligning (20) kan endres til  $(1 + \bar{e})$ , hvor  $\bar{e}$  ikke er en funksjon av z blir løsningen forenklet til:

$$u = \frac{\gamma_w r}{k(1+\bar{e})} \left[ \left( Hz - \frac{z^2}{2} \right) - \frac{b}{r} \left( \frac{z^2}{4} - \frac{z^3}{6H} \right) \right]$$
(30)

Settes  $\frac{b}{r} = 0$  på nytt vil ligning (30) reduseres til å bli lik ligning (27), mens at ligning (28) nærmer seg ligning (27) som en grense når  $\frac{b}{r} \rightarrow 0$ . I Tabell 11 er ligning (28) og ligning (30) sammenlignet med hensyn på endring i  $\frac{b}{r}$  forholdet og  $e_0 = 2$  og rt = 0,5. Sammenligningen gir resultater som forsvarer bruken av ligning (30). Ved å sette z = H kan poretrykket i bunnen ved CRS bestemmes fra ligning (30) som:

$$u_{z=H} = u_b = \frac{\gamma_w r H^2}{k(1+\bar{e})} \left[ \frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left( \frac{1}{12} \right) \right]$$
(31)

Tabell 11: Sammenligning av ligning (28) og ligning (30)

b/r	0,0	0,04	0,4	0,6	1,0	1,4	2,0
(10)	-	0,200	0,186	0,178	0,164	0,151	0,134
(12)	0,200	0,200	0,187	0,180	0,167	0,153	0,133

For å bestemme poretall - effektivspenningsforholdet fra forsøksresultatene for CRS må det eksistere et uttrykk for gjennomsnittlig effektivspenning som inneholder de målte variablene fra forsøket. Disse variablene er total vertikalspenning,  $\sigma_1$ , det målte poretrykket i bunnen,  $u_b$ , og deformasjonshastigheten. Den gjennomsnittlige vertikale effektivspenningen,  $\bar{\sigma}'_1$ , kan uttrykkes som:

$$\bar{\sigma}_1' = \sigma_1 - \alpha u_b \tag{32}$$

Der  $\alpha$  er en faktor som beskriver forholdet mellom det gjennomsnittlige poretrykket,  $\bar{u}$ , og det målte poretrykket i bunnen,  $u_b$ , som blir:

$$\alpha = \frac{\overline{u}}{u_b} \tag{33}$$

Ifølge Sandven (2005) baserer alle kontinuerlige prosedyrer seg på enveisdrenering hvor den frie drenering skjer i toppen (bunnen tettes). Faktoren  $\alpha$  er alltid mindre 1 (se også Tabell 12 for variasjoner). For CRS-forsøket holdes tøyningshastigheten konstant og poretrykket kan da beskrives som en parabel over prøven. Se Figur 47.



Figur 47: Poretrykket fordelt som en parabel over prøvehøyden i et CRS-forsøk. (Ramberg, 2009)

Ved å uttrykke  $\alpha$  som en funksjon av  $\frac{b}{r}$  kan uttrykket utlededes fra ligning (30) og ligning (31) til å bli:

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u_b} = \frac{\frac{1}{H} \int_0^H u \, dz}{u_b} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{24}\right)}{\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12}\right)}$$
(34)

Ved å se på variasjonen av  $\alpha \mod \frac{b}{r}$  i Tabell 12 ser en at endringer i  $\frac{b}{r}$  har liten effekt på den beregnete verdien av  $\alpha$  og dermed effektivspenningen.

Tabell 12: Variasjon av  $\alpha$  ved endring av b/r

b/r	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
α	0,667	0,682	0,700	0,722	0,750

Som en forenkling antas det at poretallet er konstant gjennom hele dybden. Dette kan gjøres så lenge poretrykksforholdet  $\frac{u_b}{\sigma} < 0.15$  (NTNU, 2014).

Dette medfører at  $\frac{b}{r}$  er lik 0 og ligning 34 blir:

$$\alpha = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{2}} = \frac{2}{3}$$

Noe som også gjenspeiles i Tabell 12. Dette fører til at ligning 32 kan skrives om til:

$$\bar{\sigma}_1' = \sigma_1 - \frac{2}{3}u_b \tag{35}$$

For å bestemme konsolideringskoeffisienten tas det utgangspunkt I Terzaghis (1943) definisjon av denne:

$$c_{v} = \frac{k(1+e)}{a_{v}\gamma_{w}}$$
(36)

Der  $a_v$  er kompressibilitetskoeffisienten. Fra tidligere har forholdet mellom poretall og vertikal effektivspenning blitt bestemt og dermed er det kun permeabilitetskoeffisienten k i ligning (36) som er ukjent. I ligning (31) er det målte poretrykket i bunnen en funksjon av tøyningshastigheten og permeabilitetskoeffisienten og ved at både  $u_b$  og r er kjent kan ligningen løses med hensyn på k så lenge antagelsen om at e kan bli erstattet med  $\bar{e}$  i ligning (36). Ved å endre dette i ligning (36) gis ny ligning for  $c_v$ :

$$c_{v} = \frac{rH^{2}}{a_{v}u_{b}} \left[ \frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left( \frac{1}{12} \right) \right]$$
(37)

Ved å bruke uttrykket i ligning (37) kan  $c_v$  bestemmes for et hvilket som helst poretall fra CRS.

## Vedlegg B – Inndeling av prøvesylinder



Figur 48: Inndeling av prøvesylinder

Vedlegg C – Skjema	for indekstesting
--------------------	-------------------

RUTINEUNDERSØKELSER         Prosjekt:           Barested: $7/LL \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ $			LA	LABORATORIUM FOR GEOTEKNIKK NTNU												
Borested: $T/LLLER$ Operator Risuppe: $L/D - 15$ Hull ar:: $F(-1F)$ Dato, provenking: $J/D - 15$ Dybde, z: $L/O - LS$ m       Kontroli: $J/L - 16$ Dybde, z: $L/O - LS$ m       Kontroli: $J/L - 16$ Dybde, z: $L/O - LS$ m       Kontroli: $J/L - 16$ Grunnvannstand:       m       Kontroli:       m       Kontroli:       g         Lengde av prove, $E: 2-E$ $20 S 3, C$ cm       Masse pyknometer + vann (1)       g         Masse av prove, $E: 2-E^2$ $20 S 3, C$ cm       Masse pyknometer + vann (2)       g         Masse av prove, $E: 2-E^2$ $16 4/3, 7$ g       Total masse aver.       g         Masse av prove $5/2 F_2 + T$ g       Masse aver.       g       g         Midlere derstiet, $\frac{1}{2}$ $1/2 S$ g/cm <sup>2</sup> g/g       g/cm <sup>2</sup> g/g       g/cm <sup>2</sup> 10       Coologisk betegnelse:       Ip = w_1 - w_p $g, g - 1/2 + g$ g/g       g/g - 1/2 + g       g/g       g/g - 1/2 + g       g/	RUTINEUNDERSØKELSER								Pr	osjekt:						
Hall nr.: $P_{1} + i + i$ Dato, prove taking: $i \perp D - i \leq$ Prove mr.: $g$ Dato, prove taking: $i \perp D - i \leq$ Prove mr.: $g$ Dato, prove taking: $g \mid L - i \leq$ Prove mr.: $g$ Dato, prove taking: $g \mid L - i \leq$ Optide, $z$ : $L \sim -L \otimes$ m       Kontensitet fra pyknometer + van (1)       g         Comparison $g \in S \in $	Borested:				TΙ	LLER			0	peratør/G	rupp	e:				
Prove rr.:       Q       Dado, revealed num:       Q/c - 10         Dybde, z: $L_1 \circ - L_1 S$ m       Kontroll:       0/c - 10         Dybde, z:       m       Kontroll:       m       Kontroll:       0/c - 10         Dybde, z:       m       m       Kontroll:       0/c - 10       0/c - 10         Dybde, z:       m       m       Kontroll:       0/c - 10       0/c - 10         Genunvanstand:       m       Kontroll:       m       Kontroll:       0/c - 10         Volum av prove, 1.       75       cm       Masse pyknprove-vann (2)       g         Masse av estimetem/prove fk/k/c*       16/43, 7       g       Masse tar:       g         Masse av prove       5767, 4'       g       Masse tar:       g       g         Masse av prove       5767, 4'       g       Masse tar:       g       g       g/m         Masse av prove       5767, 4'       g       Masse tar:       g       g       g/m         Masse av prove       5767, 4'       g       Masse tar:       g       g/m       g/m         Tyngdeterthet, y=p.g       1/75       g/m       Masse tar:       g/m       g/m       g/m         Oppdel	Hull nr.:				F1-	14			D	ato, prøve	evetaking:			-13		
Construction       m       Korndensitet fra pyknometer måling         Lengde av prøve, $\frac{10}{2924-}$ $\frac{2}{7}5$ cm       Masse pyknometer + vann (1)       g         Volum av prøve, $\frac{10}{2924-}$ $\frac{2}{9}5$ cm       Masse pyknometer + vann (2)       g         Masse av tom spinder $\frac{1}{7}h^2L \in 2$ $\frac{2}{9}5$ $\frac{1}{7}c^2L \in 7$ $\frac{2}{9}c^2L + 1$ g       Total masse terr.       g         Masse av tom spinder $\frac{1}{7}h^2L \in 2$ $164/3$ , $\frac{7}{7}$ g       Masse terr (3)       g       g         Midlere densitel, $\frac{5}{p}$ $1/95$ g/m       Masse terr (3)       g       g         Trigdeteithet, $\gamma = p \cdot g$ $1/95$ g/m $p = (3)/(1)+(3)-(2) p$ $\frac{1}{2}$ , $g$ g/m         Oppdeling av prøven       Geologisk betegnelse:       Platisitetiondeks: $p = w_1 \cdot w_p$ $\frac{1}{2}, 7 - 10/7$ , $\frac{9}{2}$ 10       Index       Index       Porskitet n $\frac{1}{5}, 1 - \frac{1}{6}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}$ 20       Cm       Geologisk betegnelse:       Porskitet n $\frac{1}{5}, 1 - \frac{1}{6}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}$ 30       Index       Fisher neg       Notal masse terr $0, g = -10, 94$ $0, g = -10, 94$ 30       Index       Index neg       Index       Index neg <t< td=""><td>Dubde 7:</td><td></td><td></td><td></td><td>Ļ</td><td>-48</td><td></td><td></td><td>K</td><td>ontroll:</td><td>8000</td><td></td><td>1 3/6</td><td colspan="3">0/6-10</td></t<>	Dubde 7:				Ļ	-48			K	ontroll:	8000		1 3/6	0/6-10		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Grunnvannstand:							m		Kori	Korndensitet fra pyknometermåling					
Volum av prøve, $\frac{92.94}{1000}$ , $\frac{10}{1000}$ , $\frac{10}{10000}$ , $\frac$	Lengde av prøve, l				75 cm				Masse pyknometer + vann (1)			g				
Masse av epidades myrinder $SH^2LE^2$ $PS U_l + 1$ $g$ Total masse terr: $g$ Masse av tom synder $SH^2LE^2$ $l643$ ; $\mathcal{F}$ $g$ $Masse av rots weight response to the standard $	Volum av prøve, 2	<del>3.2-L-</del>	40,7-6		3053,6 cm3				Masse pykn.+prøve+vann (2)			_		g		
Masse av tom sylinder $5hAcCe$ $1643$ , $7$ $8$ $881$ mc, $1$ $8$ $881$ mc, $1$ $8$ $883$ stat $8$ $9$ $10$ <t< td=""><td>Masse av selinder</td><td>m/prøve</td><td>SKALO</td><td>*</td><td>7</td><td>26111</td><td></td><td>g</td><td>Te</td><td>otal massi</td><td>e tør</td><td>r:</td><td></td><td></td><td>g</td></t<>	Masse av selinder	m/prøve	SKALO	*	7	26111		g	Te	otal massi	e tør	r:			g	
Masses av prøve $5767, 4'$ g       Masses tørr (3)       g       g         Midlere densitet, $\overline{\gamma}_{-}$ $l, 75$ g/cm <sup>2</sup> Korndensitet: $1/2, 2$ kNim $2/8$ g/cm <sup>2</sup> Oppdeling av prøven       Generell klassifisering       Rutineparametre       Ip = w <sub>1</sub> · w <sub>p</sub> $3/9, 9 - 10/9$ $3/9, 9 - 10/9$ $5/9,$	Masse av tom sylin	ider 5,	HALER		1643, 7 g Skål nr.: Masse skål					_			g			
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Masse av prøve				5	967,0	۲	g	М	asse tørr	(3)				g	
Oppdeling av prøven       Generell klassifisering       Rutineparametre         0       . cm       Geologisk betegnelse:       Ip = w <sub>1</sub> - w <sub>p</sub> $g_1 q_2 - 1/2_1 q_3 q_2$ 10       Jordart:       Ip = w <sub>1</sub> - w <sub>p</sub> $g_1 q_2 - 1/2_1 q_3 q_2$ 20       Beskrivelse:       Ip = w <sub>1</sub> - w <sub>p</sub> $g_1 q_2 - 1/2_1 q_3 q_2$ 30       Image: second	Midlere densitet, $\overline{\rho}$ Tyngdetetthet, $\overline{\gamma}$ =	p·g				1,95 19,2	g/c kN/	:m³ (m³	Κ ρ,	orndensit , = (3)/[(1	iet: )+(3	i)-(2)]p_	$\lambda_{ii}$	2,8 g/cm <sup>3</sup>		
0       cm       Geologisk betegnelse:       Plastisitetsindeks:         10       Ip = w <sub>1</sub> - w <sub>p</sub> $g_1 g_2 - I_0 I_0 g_1 g_2$ 10       Jordart:       Flyteindeks:         20       Beskrivelse:       I <sub>1</sub> = w-w <sub>p</sub> /W <sub>1</sub> -W <sub>p</sub> $G_1 G_2 L_1 I_0 G_2 M_1 G_2$ 30       Porssitet n $40, 61, -40, 94, 96, -40, -40, 94, 96, -40, -40, 94, 96, -40, -40, 94, 96, -40, -40, 94, 96, -40, -40, 94, 96, -40, -40, 94, 96, -40, -40, -40, 94, 96, -40, -40, -40, -40, -40, -40, -40, -40$	Oppdeling av prøven				Generell klassifisering						Rutineparametre					
$Ip = w_1 \cdot w_p$ $g_1 - f_{0/1} - g_{0}$ $Ip = w_1 \cdot w_p$ $g_1 - f_{0/1} - g_{0}$ $Ip = w_1 \cdot w_p$ $Ip = w_1$ $Ip = w_1 \cdot w_p$ $Ip = w_1$	0 , cm		Geolog	sk bete	egnel	sc:		_	Plastisitetsindek				eks:	3:		
10       Jordart:       Flyteindeks: I <sub>1</sub> = w·w <sub>2</sub> /w <sub>1</sub> ·w <sub>2</sub> $G_{0}L^{-1}/66$ &         20       Beskrivelse:       I <sub>1</sub> = w·w <sub>2</sub> /w <sub>1</sub> ·w <sub>2</sub> $G_{0}L^{-1}/66$ &         30       Porsisitet n $4G_{1}/166$ &         40       Merknader:       Porsisitet n         50       Porsisitet n $4G_{1}/166$ &         60       Prisve s, s, S, Prisve s, e, Metningsgrad S, $g - 100\%$ nr.       kPa kPa - nr. kPa %         1 $3g, 2$ $4, g$ $g, 1$ 30       Saltinnhold S $-94-925$ g/l         80       Recow $Lg^{0}/2, 4g$ $g, 2$ Humusinnhold $O/4-0, 6$ % $4'/5$ $L_{f}S$ $L_{f}S$ $L_{f}O^{-1}$ Humusinnhold $O/4-0, 6$ %         Vanninnhold w(%)       Prøve 1       Prøve 3 w <sub>1</sub> w <sub>2</sub> Ring         Skål nr.       Cotal masse våt g       Tot. masse våt g       Ring         Total masse tørr g       Nasse tørr røve g       Masse tørr røve g       Masse tørr røve g       Masse tørr røve g         Masse tørr prøve g       Nasse tørr										ip = w <sub>t</sub> - w <sub>p</sub>				8,9	1-1019 %	
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	10		Jordart:								_					
20 Beskrivelse: $I_1 = w \cdot w_y / w_1 \cdot w_y$ $G_1 \in L^{-1} I_0 \in \mathbb{R}$ 30 40 40 40 40 40 40 50 50 50 50 50 50 50 50 50 5			L							Flyteindeks:						
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	20					_		_	$I_i = w \cdot w_p / w_i \cdot v$	$= w \cdot w_p / w_1 \cdot w_p$ 0,62 - 1,66						
30       Image: construct in									_	Ponticitet n 45.1 - 482						
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	30							P Or position in						10	1 - 10/7%	
Normalian       Merknader:       Poretall e $O_1 g_1 - O_1 g_1$ 50       Konusforsøk       Enaks.trykk          60       Prøve s, s, S, Prøve s, e, Meuningsgrad S, $g_1 - 100\%$ $nr. kPa kPa - nr. kPa \%$ 70 $J g_2 + f_1 g_1$ Saltinnbold S $-0f_1 - o_2 g_2 g_1$ 80 $Racew Lg - L_1 + f_2 G_1$ Saltinnbold S $-0f_1 - o_2 g_2 g_1$ 80 $Racew Lg - L_1 + f_2 G_2$ Humusinnbold Off - $o_1 G_1 g_2$ $g_1 - f_2 g_2 g_1$ 80       Racew Lg - L_1 + f_2 G_2       Ring Skål       Skål nr. $Ring Skål$ 80       Prøve 1       Prøve 3 $w_1$ $w_p$ Densitet liten prøve         Skål nr. $Ring/skål nr.$ $Ring Skål$ $Ring Skål$ $g_1$ Total masse tørr $g_1$ $Tot_1 masse tørr       g_1 Ring f_2 k d_1 g_1 g_1         Masse tørr prøve       g_1 Ring f_2 k d_1 g_1 G_1 g_2 f_2 f_3 g_1 g_1 G_1 g_2 f_2 g_2 g_1         Masse tørr prøve       G_1 g_2 f_2 f_3 g_1 f_1 G_1 g_2 f_2 f_3 g_2 f_2 f_3 g_2 f_2 g_2 g_1 G_1 g_2 f_2 g_3 g_1 g_2 g_3 g_1 g_2 g_3 g_1 g_2 g_1 g_2 g_3 g_1 g_1 $	40															
So       Normalian         Konusforsøk       Enaks.trykk         Prøve       s.       s.       S.       Prøve       s.       e.       Metningsgrad S. $g 9 - 100\%$ 70 $N$ $kPa$ $nr.$ $kPa$ $mr.$ $kPa$ $g$ <	40 Merknader										_	Poretall e			22-0,94	
	50											<u> </u>				
60       Prøve       s.		Konu					I	Snal	ks.	trykk						
nr.kPakPamr.kPa%1 $37,2$ $4,7$ $8,1$ Saltinnhold S $\sim 0/4 \cdot o_2 5$ $g/1$ 30 $37,2$ $4,9$ $8,1$ Saltinnhold S $\sim 0/4 \cdot o_2 5$ $g/1$ 80 $37,2$ $4,9$ $8,1$ Humusinnhold O/4 · $o_16$ %80 $4,5$ $2,4$ $1,0$ Humusinnhold O/4 · $o_16$ %Vanninnhold w(%)Prøve 1Prøve 2Prøve 3 $w_1$ $w_p$ Densitet liten prøveSkål nr.Total masse våtgTot. masse våtggMasse tørrgTot. masse våtggMasse tørrgMasse tørrggMasse tørr prøvegMasse tørr prøveggVanninnhold,w $\%$ $31,1$ $32,5$ $27,6$ $3^{\circ},7$ $19,8-1,8$ Volum $cm^3$	60 Prøve s.		s,	s,	S,	Prøve	5,		٤,		Metningsgrad	S,	8	9-100%		
1 $3q_2$ $4,9$ $8,1$ Saltinnhold S $-0/4-0/25$ $g/1$ 80 $3q_2$ $4,8$ $8,2$			nr.	kPa	kPa	- 1	nr.	kP	2a	%						
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	70		1	397	4,9	8,1						Saltinnhold S		20	14-075 BI	
80       Rescon $\mathcal{L}_{g}^{g} - \mathcal{L}_{f}^{g} + \mathcal{L}_{0}^{g} - \mathcal{L}_{g}^{g}$ Humusinnhold $O_{f4} - O_{f6}^{g} - \mathcal{K}_{g}^{g}$ Vanninnhold w(%)       Prøve 1       Prøve 2       Prøve 3       w <sub>1</sub> w <sub>p</sub> Densitet liten prøve         Skål nr.       Ring       Skål       Ring       Skål       Ring       Skål         Total masse våt       g       Tot. masse våt       g       g       Ring/skål nr.       g         Masse tørr       g       Tot. masse våt       g       g       g       g       g         Masse tørr       g       Nasse tørr       g			2	39,2	4,8	8,2										
Vanninnhold w(%)         Prøve 1         Prøve 2         Prøve 3         w <sub>1</sub> w <sub>p</sub> Densitet liten prøve           Skål nr.         Ring         Skål         Ring         Skål           Total masse våt         g         Ring/skål nr.         Ring         Skål           Total masse våt         g         Ring/skål nr.         Ring/skål nr.         Ring           Total masse tørr         g         Ring         Ring         Ring           Masse tørr prøve         g         Masse tørr prøve         R         R           Vanninnhold,w         %         3 l, l '         3 l, 5         2 % 7         1 % 8-2 % 8         Volum         cm <sup>3</sup>	80		REKOW	28-	2,4	- 1,0-						Humusinnhol	d	01	1-0,6 %	
Vanninnhold w(%)     Prøve 1     Prøve 2     Prøve 3     with with with with with with with with				4,5	28	1,9	<u> </u>		_	1				L		
Skål nr.     Ring/skål nr.       Total masse våt     g       Total masse tørr     g       Total masse tørr     g       Total masse tørr     g       Masse tørr     g       Masse skål     g       Masse tørr prøve     g	Vanninnhold w(%) Prøve 1 Prøv		Prøve	:2	Prøve 3	W1	_	┝	W <sub>P</sub>	_	Densi	itet liten p	røve	CL.41		
Total masse tørr     g     Tot. masse våt     g       Masse vann     g     Tot.masse tørr     g       Masse skål     g     Masse ing/skål     g       Masse tørr prøve     g     Masse ing/skål     g       Vanninnhold,w     % 31,1     33,5     27,6	Total masse våt		-+				t		Rin	g/skål pr.	King		SKBI			
Masse vann         g         Tot.masse tørr         g         g           Masse skål         g         Masse iørr prøve         g	Total masse tørr g						T		Tot	. masse våt	1					
Masse skål         g         Masse ring/skål         g         g           Masse sørt prøve         g         Masse sørt prøve         g         g           Masse sørt prøve         g         Masse sørt prøve         g         g           Vanninnhold,w         % 31,1'         33,5         27,6         3°,7         19,8-24,8         Volum         cm²	Masse vann g			-		-		1		Tot	masse tørr		*			
Masse get prove         R         R           Vanninnhold,w         % 31,1         33,5         27,6         3°,7         19,8-21,8         Volum         cm <sup>3</sup>	Masse skål g			+				┝		Ma	sse ring/skål		5	8		
Vanninnhold,w % 31,1' 33,5 27,6 30,7 19,8-218 Volum cm3 cm3	NUBSIC BOIT DRAWC E								t		Ma	sse tørr prøve		5		
	Vanninnhold,w % 341' 33		33, 5	۶	19,6	3013	7	ľ	9,8-21,8	Vol	lum	1.86100	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>		

Figur 49: Resultater for indekstesting

# Vedlegg D – Kornfordelingskurver



Figur 50: Kornfordelingkurver



# Vedlegg E – Kalibrering av Split Ring radielle trykksensorer

Figur 51: Kalibrering av Splittet Ring Ødometer

#### Kalibreringsverdier:

Radial 1 = 1667 kPa/V

Radial 2 = 833 kPa/V

Radial 3 = 2000 kPa/V



## Vedlegg F - Temperaturstabilitet med og uten isoporkasse

Figur 52: K<sub>0</sub>'/Temperatur – Tid målt uten isoporkasse på kjølerom. Merk hvordan K<sub>0</sub>' følger temperaturendringene i distinkte områder.





# Vedlegg G – Bilder av innbyggingsprosedyre Splittet Ring Ødometer



Figur 54: -a- Tilskjæring av prøve. -b- Ferdig tilskjærte sider. -c- Ferdig avrettet bunn. -d- Bunnfilter på plass med silikontettingsmasse og vannfilm i bunn. -e- Prøve plassert. -f- Chuck strammet og topp på prøve ferdig trimmet. -g-Toppfilter på plass, mangler toppstykke og plassering i pressen. -h- Kopp med vann for å øke luftfuktigheten. Nylontråder skaper kapillært sug av vann slik at toppfilter ikke tørker ut. -i- Ferdig innpakket ødometer i plast. Se Figur 26 for bilde av isoporkassen.

# Vedlegg H – Resultater fra Split Ring Ødometerforsøk



Split Ring 1:

Figur 55: Spenninger - Tid - Splittet ring ødometer 1.







#### Figur 57: Tøyning - Tid - Splittet ring ødometer 1.



Figur 58: Spenningssti - Splittet ring ødometer 1.





Figur 59: Spenninger - Tid - Splittet ring ødometer 2.











Figur 62: Spenningssti - Splittet ring ødometer 2.





Figur 63: Spenninger - Tid - Splittet ring ødometer 3.











Figur 66: Spenningssti - Splittet ring ødometer 3.

# Vedlegg I – Bilder av innbyggingsprosedyre for Ødometer



Figur 67: -a- Prøve klar til å presses inn i ringen. -b- Prøve presset inn og første trimming fra midten og ut unnagjort. c- Trimming av bunn ferdig. -d- Plassering av plate. -e- Stativet snudd opp ned. -f- Trimming av topp ferdig. -g- Prøven montert i ødometeret. -h- Prøven låses fast og toppstykket plasseres. -i- Prøven kjøres til kontakt med lastmåleren før forsøket kan settes i gang.
# Vedlegg J – Resultater fra Ødometerforsøk

På de neste tre sidene vises resultatene fra de tre ødometerforsøkene som er utført.

## Ødometer 1:



Figur 68: Spenning - Tøyning Ødometer 1











Figur 71: Spenning - Cv - Ødometer 1

## Ødometer 2:







#### Figur 73: Spenning - Modul - Ødometer 2







Figur 75: Spenning - Cv - Ødometer 2

## Ødometer 3:







### Figur 77: Spenning - Modul - Ødometer 3







Figur 79: Spenning - Cv - Ødometer 3