

Petter Boge Kjønås

**NTNU**  
Norges teknisk-naturvitenskapelige  
universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Petter Boge Kjønås

## Forhold knyttet til graden av metning under udrenerte treaksialforsøk på leire

Juli 2020





Kunnskap for en bedre verden

# Forhold knyttet til graden av metning under udrenerte treaksialforsøk på leire

**Petter Boge Kjønnås**

Geoteknikk

Innlevert: Juli 2020

Hovedveileder: Steinar Nordal

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg - og miljøteknikk



# Sammendrag

Ansamlinger av luft i ulike deler av poretrykksystemet under et udrenert treaksialforsøk er en kjent problemstilling i den geotekniske bransjen. Luft vil dempe det målte poretrykket. Som et resultat vil de kalkulerede effektivspenningene bli feil og spenningsstien til forsøket vil bli misledende. I verste fall kan dette medføre en bruddmekanisme i grunnen hvor menneskeliv og store økonomiske verdier kan gå tapt. Det er derfor særdeles viktig å finne metoder for å minimere eller eliminere fanget luft i poretrykksystemet.

Effekter av ulike prosedyrer for å eliminere luften i poretrykksystemet ble studert både ved praktiske forsøk og teoretiske beregninger i denne oppgaven. Ved de praktiske forsøkene ble effekten av ulike trykk og endringer i rekkefølgen på de utførte prosedyrene i et treaksialforsøk studert. Forsøkene ble opprinnelig utført med prosedyrene i rekkefølgen konsolideringsfase, metningsfase, B-test og skjærforsøk. Ved endring av prosedyrene ble rekkefølgen på metningsfasen og konsolideringsfasen byttet om. Under de teoretiske beregningene ble effektene av ulike trykk samt ulike temperaturer på et gitt referansesystem bestående av luft og vann utforsket.

Resultatene fra treaksialforsøkene viste en tendens til en tilfredsstillende grad av vannmetning i poretrykksystemet ved et baktrykk på 500 til 600 kilopascal. Endringer i prosedyrerekkefølgen viste en mulig tendens til en raskere oppbygning av poretrykk ved en momentan belastning, men resultatene var tvetydige. Det ble også observert en tendens til raskere utpressing av porevann og et større volum utpresset porevann under konsolideringsfasen ved en endret prosedyrerekkefølge. Grunnlaget for å trekke en fast konklusjon ble for tynt og det må utføres flere forsøk for å studere effektene rundt endringer av prosedyrerekkefølgene i treaksialforsøk.

De teoretiske beregningene viste at ved en dobling av det initielle volumet luft, må trykket mer enn doubles for å få løst opp all luften i systemet. Ved variasjoner i temperaturen ble det tydelig at en lavere temperatur resulterte i en økt grad av vannmetning for systemet. Forskjellen i grad av vannmetning mellom et kaldt og et varmt system viste seg å øke med økende trykk. Forskjellen økte også med økende volum av initiell luft i systemet.



# Abstract

Accumulation of air in different parts of the pore pressure system during an undrained triaxial test is a well known issue within the geotechnical environment. A volume of air will decrease the measured pore pressure response during a triaxial test and the resulting effective stresses and stress paths will become incorrect. At worst, this might lead to a developing failure mechanism in the soil resulting in large losses both in human lives and economic values. Hence it is of great importance to find methods to minimise or eliminate the accumulated air in the pore pressure system.

Effects of different procedures to eliminate the air inside the pore pressure system were studied both in terms of practical tests, but also by theoretical calculations in this thesis. In the practical tests, the effect of different pressures as well as alterations in the order of the procedures for the triaxial tests were studied. The tests were originally performed with the procedures in the order consolidation, saturation, B-check and shear test. The altered procedures saw the consolidation and saturation phases switch order. During the theoretical calculations the effects of different pressures and temperatures on a specific system consisting of air and water were explored.

The results from the triaxial tests showed a tendency to reach a satisfactory saturation of the system around a back pressure of 500 to 600 kilopascals. The performed change in order of procedures showed a tendency to experience a faster pore pressure buildup when the altered procedures were used, but the results were ambiguous. There were also an observed tendency of a faster extortion of the pore water and also a larger amount of extorted pore water during the consolidation phase when the altered procedures were used. The basis of drawing a conclusion based on the effects of the altered procedures were not good enough and several more tests must be performed in order to study the effects closer.

The theoretical calculations showed that a doubling the initial volume of air in the system required the pressure to be more than doubled in order to dissolve all the air. The calculations performed at varying temperatures showed clearly that the lower temperature resulted in a higher degree of saturation in the system. The difference in degree of saturation between a cold and a hot system increased with increasing pressure. The difference also increased with an increasing volume of air initially in the system.





# Forord

Denne oppgaven ble utført som avsluttende ledd i den 2 årige sivilingeniørutdanningen ved NTNU. Oppgaven ble skrevet for den Geotekniske avdelingen ved Institutt for bygg- og miljøteknikk våren 2020.

Våren 2020 brøt det ut en global pandemi kjent som Covid-19. For å minimere smittespredning blant studenter og ansatte besluttet NTNU å stenge ned Campus. Nedstengingen av campus førte til at laboratoriene ble utilgjengelige i en periode på omtrent 1,5 måneder. De nødvendige forsøkene for denne oppgaven fikk dermed en sen oppstart den 5. mai. Situasjonen førte til et lengre avbrekk på nesten 2 måneder fra det siste av totalt 5 testforsøk ble utført med mål om å få kjennskap til utstyret, til oppstart av forsøkene beskrevet i denne oppgaven. Det ble heller ikke mulighet for å hente opp ekstra miniblokk prøver for å supplementere de utførte forsøkene. Forsøksresultatene inneholder derfor enkelte feil på grunn av utføring, og entydige konklusjoner kunne ikke oppdrives med de få utførte forsøkene.

Under nedstengningen var det usikkert om forsøkene kunne gjennomføres. En teoretisk studie av oppløsningen av luft i vann ble derfor igangsatt. Denne oppgaven består derfor av to deler. Forsøkene som ble utført i laboratorie fra 5. mai og utover sammen med en teoretisk studie tilknyttet effektene av endringer i trykk og temperatur på volumet av oppløst luft i et gitt system.

Jeg vil gjerne takke følgende personer for deres bidrag til denne oppgaven:

Min veileder, Professor Steinar Nordal for verdifulle diskusjoner og gode tanker tilknyttet mitt arbeid med problemstillingen.

Amanuensis Arnfinn Emdal for å gledelig dele sin kunnskap om treksialforsøk.

Overingeniør Karl Ivar Volden Kvisvik og avdelingsingeniør Espen Andersen for uvurderlig hjelp når det kommer til å få utført laboratorieforsøkene.

Sist, men ikke minst vil jeg takke min samboer Ingvild for en fantastisk støtte gjennom et halvår som har bydd på flere utfordringer.

Petter Boge Kjønås



# Innhold

<b>Figurer</b>	<b>xxi</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xxiv</b>
<b>Forkortelser og symboler</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn for valg av tema og problemstilling . . . . .	1
1.2 Prøvetakingsområde . . . . .	1
1.2.1 NGTS . . . . .	2
1.2.2 Tiller-Flotten området . . . . .	2
1.3 Struktur . . . . .	8
<b>2 Teori og metode</b>	<b>9</b>
2.1 Styrkeparametre for leire . . . . .	9
2.2 Prøvetakingsmetode . . . . .	10
2.3 Treaksialforsøk . . . . .	12
2.3.1 Målte parametre . . . . .	13
2.3.2 Utstyr . . . . .	14
2.3.3 Rekkefølge . . . . .	16
2.3.4 Prøveforstyrrelse . . . . .	23
2.4 Ødometerforsøk . . . . .	25

2.4.1	Konstant lastøkning . . . . .	26
2.4.2	Trinnvis lastøkning . . . . .	27
2.4.3	Prosedyrer . . . . .	27
2.4.4	Prøveforstyrrelse . . . . .	27
2.5	Løselighet av gass i vann . . . . .	29
2.6	Kompressibilitet av gass . . . . .	32
2.7	Teoretisk volumreduksjon av luft ved en udrenert, isotrop belastning . . . . .	33
2.7.1	Valg av gassenes tetthet . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Forsøksresultater</b>	<b>37</b>
3.1	Treaksialforsøk . . . . .	37
3.1.1	Udrenerte styrkeparametre . . . . .	38
3.1.2	Drenerte styrkeparametre . . . . .	38
3.1.3	Metningsgrad . . . . .	39
3.1.4	Sammenligning av forsøk . . . . .	40
3.1.5	Vanninnhold . . . . .	49
3.1.6	Prøveforstyrrelse . . . . .	49
3.2	Ødometerforsøk . . . . .	50
3.2.1	Parametre . . . . .	50
3.2.2	Ødometerforsøk 1 - 5,83 meters dybde . . . . .	51
3.2.3	Ødometerforsøk 2 - 6,05 meters dybde . . . . .	52
3.2.4	Ødometerforsøk 3 - 6,08 meters dybde . . . . .	53
3.2.5	Vanninnhold . . . . .	54
3.2.6	Prøveforstyrrelse . . . . .	54
3.3	Beregnet volumreduksjon av luft ved en udrenert, isotrop belastning . . . . .	55

<b>4 Diskusjon</b>	<b>57</b>
4.1 Feilkilder . . . . .	57
4.1.1 Utførelse av forsøk . . . . .	57
4.1.2 Laboratorieutstyr . . . . .	58
4.1.3 Valg av gassenes tetthet . . . . .	59
4.2 Sammenligning av resultater . . . . .	59
4.2.1 Endringer i påført baktrykk . . . . .	60
4.2.2 Endringer i prosedyrerekkefølgen . . . . .	60
4.2.3 Øvrige resultater . . . . .	63
4.2.4 Teoretiske endringer av luftvolum i et system utsatt for endringer i temperatur og trykk . . .	64
4.3 Forsøkernes relevans . . . . .	65
4.3.1 Vanninnhold . . . . .	65
4.3.2 Spenningshistorikk . . . . .	66
4.3.3 Styrkeparametre . . . . .	67
4.3.4 Setningsparametre . . . . .	69
4.4 Fremtidig arbeid på området . . . . .	70
<b>5 Konklusjon</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografi</b>	<b>75</b>
<b>Vedlegg</b>	<b>79</b>
<b>A Treksialforsøk</b>	<b>A-1</b>
<b>B Ødometerforsøk</b>	<b>B-1</b>
<b>C Viktige forbehold rundt forsøkene</b>	<b>C-1</b>
<b>D Teoretiske beregninger av gjenværende volum luft</b>	<b>D-1</b>



# Figurer

1.1	Oversikt over NGTS sine 5 prøvetakingsområder i Norge. Prøvetakingsområdene består av et for sand, silt, bløt leire, kvikkleire og permafrost. Den gule markøren viser beliggenheten for Tiller-Flotten området. Figuren er hentet fra NGI [1]. . . . .	2
1.2	Oversiktskart for Tiller-Flotten området. De røde sirkelene viser beliggenheten av prøvetakingsområdet. Kartgrunnlaget er hentet fra Norgeskart [3]. . . . .	3
1.3	Løsmassekart over prøvetakingsområdet på Tiller-Flotten. Den røde sirkelen viser beliggenheten av prøvetakingsområdet. Kartet viser at området består av en tykk havavsetning, noe som indikerer leire. Den blå linjen med doble, normale linjer som kan ses gå gjennom prøvetakingsområdet indikerer en tidligere skredkant. Kråkeføttene som kan ses fra sør til øst viser beliggenheten av raviner i området. Kartet er hentet fra NGU [4]. . . . .	3
1.4	Vanninnhold, enhetsvekt, leirinnhold, partikkeldensitet, magnetisk mottagelighet og saltinnhold i porevannet for leira på Tiller-Flotten. I denne oppgaven vil verdiene for vanninnhold, enhetsvekt og partikkeldensitet benyttes for å sammenligne og vurdere relevansen til forsøkene utført i denne studien. Figuren er hentet fra s.13 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	4
1.5	Poretrykk og prekonsolideringsspenninger for prøvetakingsområdet. Poretrykket viser en markant knekk ved omtrent 5 meters dybde, og er underhydrostatisk fra 5 meter og ned. Prekonsolideringsspenningene ligger på omtrent 300 kPa i 6-7 meters dybde og stiger til ca 400 kPa i 14-15 meters dybde. Overkonsolideringsgraden er funnet til litt over 2 fra 7-10 meters dybde. Fra 10 meter og nedover ligger den mellom 1,5 og 2. Figuren er hentet fra s.10 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	5
1.6	Sammenstilling av OCR og $K_0$ funnet ved ulike testmetoder for Tiller-Flotten området. I det midtels til lite sensitive leirlaget synker OCR fra omtrent 7 ved 2 meters dybde, ned til en verdi på 3 ved 7,5 meters dybde. $K_0$ synker i dette området fra omtrent 1,4 i 2 meters dybde ned til 0,9-1 i 7,5 meters dybde. Både OCR og $K_0$ opplever en liten knekk rundt 5 meters dybde, noe som sammenfaller med starten på det underhydrostatiske poretrykket i bakken. OCR synker fra 3 i 7,5 meters dybde og ned til omtrent 2 ved profilets slutt. $K_0$ synker fra ca 0,9 ved 7,5 meter, ned til 0,7 ved profilets slutt. Figuren er hentet fra s.25 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	5

1.7	Skjærstyrke profil for Tiller-Flotten prøvetakingsområdet. Profilet er satt sammen av avanserte og enkle laboratorieforsøk, men også ulike feltforsøk. På tvers av laboratorie og feltforsøk vises en god korrelasjon mellom CAUC forsøk, CPTU sonderinger og DMT sonderinger, med et avvik i 14-15 meters dybde for DMT. De andre forsøksmetodene resulterer jevnt over i en lavere skjærstyrke hvor konusforsøk på 54mm sylindrerprøver viser de laveste verdiene av $s_u$ . Figuren er hentet fra s.37 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	7
1.8	Setningsparametre for Tiller-Flotten området. Figur 1.8a viser tangentmodulen ved in-situ effektivspenning $M_0$ , ved prekonsolideringsspenning $M_L$ og modultallet $m$ . Figur 1.8b viser permeabiliteten $k$ , og konsolideringskoeffisienten $C_v$ for leira på Tiller-Flotten. $M_0$ , $M_L$ og $C_v$ viser alle den samme oppførselen med dybde. Fra 3 meters dybde synker verdiene ned mot 4-5 meters dybde, før de så stiger jevnt ned til profilets slutt. $m$ og $k$ viser begge jevne verdier i spektret 7,5 - 20 meters dybde hvor de er målt. Figuren er hentet fra s.31-32 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	8
2.1	Forstyrrelse av prøver tatt med stempelprøvetaker. De horisontale strekene representerer ulike nivåer eller lag i jorden og avbøyningen av disse linjene illustrer hvordan jorden forstyrres under prøvetaking. Figuren er hentet fra NGF melding 11 s.26. [8] . . . . .	10
2.2	Sammenligning av resultater fra treaksialforsøk på leire tatt opp med 54mm sylindrer, 75mm sylindrer og blokkprøver presentert ved aksial tøyning plottet mot skjærstyrke. Både blokkprøve og 75mm sylindrerprøve viser betydelig høyere skjærstyrke enn 54mm sylindrerprøve. Blokkprøven når brudd ved en lavere tøyning enn 75mm og spesielt 54mm sylindrerprøve og utviser en betydelig mer utpreget kontraktant oppførsel etter brudd. Figuren er hentet fra Lunne et.al. 1997 [11] . . . . .	11
2.3	Sammenstilling av resultater fra 250mm blokk, 160mm miniblokk og 72mm sylindrerprøver presentert i $\epsilon - q$ plott for treaksialforsøk utført på Tiller-Flotten leire. Figuren viser en tilnærmet lik oppførsel for blokk og miniblokk prøver, med en litt mer utpreget kontraktant oppførsel etter brudd for blokkprøver. 72mm sylindrerprøver bryter ved en betydelig lavere skjærspenning enn prøvene fra både blokk og miniblokk. Figuren er hentet fra s.35 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].	12
2.4	Et av treaksialapparatene som ble benyttet under forsøkene. Apparatet er produsert av GDS i likhet med alle apparatene benyttet i denne oppgaven. På bildet til venstre kan selve lastmotoren med pidestall, filtre og O-ringer, treaksialcellen, deformasjonsmåleren og mye av slangene tilknyttet poretrykksystemet ses. På bildet til høyre kan høydebassenget, celletrykk- og poretrykkpumper ses. Dette apparatet hadde et problem i poretrykksystemet og ble tatt ut av bruk i denne oppgaven. . . . .	14
2.5	Prinsippskisse som viser de ulike komponentene i et treaksialapparat for en ferdig innbygd prøve. Figuren er hentet fra Statens Vegvesen R210 s.223. [12] . . . . .	15



2.6	Effekten av tøyningshastighet per time på oppnådd skjærstyrke i leire. Presentasjonen er gjort ved logaritmen til hastigheten av skjærtøyningene plottet mot den oppnådde skjærstyrken normalisert med skjærstyrken ved en tøyningshastighet på 4,5% per time. Figuren er hentet fra Andersen et.al 2008 [19]. . . . .	20
2.7	Eksempel på tolkning av drenerte styrkeparametre i $p'$ - $q$ plott for forsøk 9. Attraksjonen finnes som tolkningslinjens negative avvik fra $y$ -aksen. Helningen på tolkningslinjen i $p'$ - $q$ plott er definert som $M$ og kan benyttes til å finne friksjonsvinkelen gjennom likning 2.14. . . . .	21
2.8	Korreksjon av falsk deformasjon for ødometerforsøk 1 etter forslag fra Berre og Lunne gitt til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Tangenten til kurven i punktet for $\sigma'_{v0}$ trekkes tilbake til $y$ -aksen. Deformasjonen, $\delta$ , leses av som differansen mellom deformasjonen målt ved $\sigma'_{v0}$ og deformasjonen der tangenten krysser $y$ -aksen. . . . .	28
2.9	Eksempel på bruk av tangentmodulen funnet ved ødometerforsøk til vurdering av prøve kvalitet. Prøve kvaliteten finnes her ved forholdet mellom tangentmodul ved $\sigma'_{v0}$ og tangentmodul ved $p'_c$ . Som figuren viser er en 54mm sylindertestbetydelig mer forstyrret enn en blokkprøve. Figuren er hentet fra s. 1275 i Karlsrud og Hernandez-Martinez 2013 [28]. . . . .	29
2.10	Plot av resultatene fra <i>Table 1</i> i Dalmolin et.al 2006 [30]. Figuren viser en økende grad av oppløst $CO_2$ ved synkende temperatur og økende trykk. Dette underbygger Henry sin teori fra 1803. 1-1 og 1-0,5 proporsjonalitets linjene er lagt inn for illustrasjonsformål. . . . .	30
3.1	Sammenstilling av forsøksresultatene funnet ved CAUC forsøk presentert i $p'$ - $q$ plott. Tolkningslinjen representerer en representativ attraksjon og helning for de utførte forsøkene. Forsøk 2 er ikke vist i figuren da forsøket ble vurdert til sterkt forstyrret og fordi apparatet benyttet til forsøket gav en feilaktig poretrykkmåling. Dette er diskutert nærmere i kapittel 4. . . . .	38
3.2	Sammenstilling av forsøksresultatene funnet ved CAUC forsøk presentert i NTNU plott. Tolkningslinjen viser en representativ helning og attraksjon for de utførte forsøkene. Forsøk 2 er ikke vist da forsøket er blitt vurdert til sterkt forstyrret og apparatet gav et feilaktig poretrykk. Dette er nærmere diskutert i kapittel 4. . . . .	39
3.3	B-verdiene oppnådd under B-test for de utførte forsøkene. Forsøkene ble kjørt til en stabil B-verdi var oppnådd. . . . .	40
3.4	Oppnådd B-verdi under B-test etter 1 minutt plottet mot det benyttede baktrykket for de utførte forsøkene. Avviket for forsøk 1 og forsøk 2 som diskuteres i vedlegg C kan tydelig ses. . . . .	40
3.5	Forsøk 5 og 6 presentert i $p' - q$ graf. . . . .	41
3.6	Forsøk 5 og 6 presentert i $\varepsilon - q$ graf. . . . .	41
3.7	Volum utpisset porevann under konsolideringen av forsøk 5 og 6. . . . .	41

3.8	B-verdiene under B-test for forsøk 5 og 6. . . . .	42
3.9	Forsøk 7 og 8 presentert i $p' - q$ graf. . . . .	43
3.10	Forsøk 7 og 8 presentert i $\varepsilon - q$ graf. . . . .	43
3.11	Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 7 og 8. . . . .	43
3.12	B-verdiene under B-test for forsøk 7 og 8. . . . .	44
3.13	Forsøk 7 og 8 presentert i $p' - q$ graf. . . . .	45
3.14	Forsøk 4, 9 og 10 presentert i $\varepsilon - q$ graf. . . . .	45
3.15	Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 4, 9 og 10. . . . .	45
3.16	B-verdiene under B-test for forsøk 4, 9 og 10. . . . .	46
3.17	Forsøk 8 og 11 presentert i $p' - q$ graf. . . . .	47
3.18	Forsøk 8 og 11 presentert i $\varepsilon - q$ graf. . . . .	47
3.19	Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 8 og 11. . . . .	47
3.20	B-verdiene under B-test for forsøk 8 og 11. . . . .	48
3.21	Resultater fra det første ødometerforsøket utført på leire hentet opp fra 5,83 meters dybde. Øverst er effektiv vertikalspenning, $\sigma'_v$ plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er $\sigma'_v$ plottet mot tangentmodulen, $M$ . Nederst er $\sigma'_v$ plottet mot konsolideringskoeffisienten, $C_v$ . $\sigma'_{v0}$ ble antatt å være 61,3 kPa. Vanninnholdet ble funnet til 47,77%, enhetsvekt til 17,58 kN/m <sup>3</sup> , partikkeldensitet til 2,88 g/cm <sup>3</sup> . Prøvekvaliteten til forsøket ble ved Lunne et.al 1997 [11] sin metode funnet til dårlig. Ved korreksjonen som foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] ble prøve kvaliteten funnet som veldig god til utmerket. . . . .	51
3.22	Resultater fra det andre ødometerforsøket utført på leire hentet opp fra 6,05 meters dybde. Øverst er effektiv vertikalspenning, $\sigma'_v$ plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er $\sigma'_v$ plottet mot tangentmodulen, $M$ . Nederst er $\sigma'_v$ plottet mot konsolideringskoeffisienten, $C_v$ . $\sigma'_{v0}$ ble antatt å være 62,85 kPa. Vanninnholdet ble funnet til 51,88%, enhetsvekt til 17,43 kN/m <sup>3</sup> , partikkeldensiteten til 2,97 g/cm <sup>3</sup> . Prøvekvaliteten til forsøket ble ved Lunne et.al 1997 [11] sin metode funnet til Veldig dårlig. Ved korreksjonen som foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] ble prøve kvaliteten funnet som god til brukbar. . . . .	52

3.23	Resultater fra det tredje ødometerforsøket utført på leire hentet opp fra 6,08 meters dybde. Vist er vertikalspenning, $\sigma'_v$ , plottet mot vertikaldeformasjonen. $\sigma'_{v0}$ ble antatt å være 63,06 kPa. Vanninnholdet ble funnet til 45,24%, enhetsvekt til 17,78 kN/m <sup>3</sup> , partikkeldensiteten til 2,87 g/cm <sup>3</sup> . Prøvekvaliteten til forsøket ble ved Lunne et.al 1997 [11] sin metode funnet til Veldig god til utmerket. Ved korreksjonen som foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] ble prøve kvaliteten funnet som god til brukbar. Poretrykkmåleren viste seg å være defekt for apparatet brukt til dette forsøket. Plottene av effektiv vertikalspenning mot M og $C_v$ er ikke vist da resultatene kun viste rette linjer og ikke gjenspeilet forholdene i bakken. Plott av effektiv vertikalspenning mot M og $C_v$ kan ses i vedlegg B. . . . .	53
3.24	Korreksjon for falske deformasjoner i ødometerforsøk 3 utført etter korreksjonen foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Tangenten til kurven i punktet for $\sigma'_{v0}$ krysser y-aksen ved en negativ verdi for de vertikale deformasjonene. Forsøket hadde prøve kvaliteten veldig god til utmerket før korreksjonen. Etter korreksjonen fikk forsøket kvaliteten god til brukbar. . . . .	54
3.25	Kurvene viser effekten av en trykkøkning på det gjenværende volumet av luft i systemet. Systemet har et referansetrykk på 100 kPa og et fast volum på 1 liter. Ved hver beregning ble trykket økt jevn opp til 1000 kPa over referansetrykket. Systemets volum besto av et gitt initielt volum luft, mens resten var vannfylt. Det opprinnelige volumet av luft ble variert på tvers av beregningene, mens temperaturen i systemet ble holdt konstant ved 26,9 °C for alle beregningene. . . . .	55
3.26	Kurvene viser effekten av en endring i trykk ved ulike temperaturer på det gjenværende volumet av luft i systemet. Systemet har et referansetrykk på 100 kPa og et fast volum på 1 liter. Ved hver beregning økes trykket jevn opp til 1000 kPa over referansetrykket. Systemets volum består av et gitt initielt volum luft, mens resten er vannfylt. Først ble et system med 5% og 15% initielt volum luft beregnet ved 26,9 °C. Deretter ble systemet beregnet for de samme volumene av luft, men ved en temperatur på 6,9 °C. . . . .	56
4.1	Forsøk 1, 5, 6, 9 og 10 i samme plott for å undersøke om den økte kontraktansen i forsøk 4 viser seg i forsøk 5 og 6 som er hentet fra samme dybde. Forsøk 4, 5 og 6 er utført på leire med en midlet dybde på 5,89 meter. . . . .	62
4.2	Antatte siltlag i prøven benyttet under treaksialforsøk 11. Leiren har en midlet dybde på 6,26 meter. Den tørre vekten til forsøket ble funnet til 322,23 gram og den midlede tørre vekten av forsøkene utført på denne dybden ble på 322,3 gram. Dette er 35,4 gram mer enn den midlede tørre vekten for forsøk 1-8. Vanninnholdet i prøven ble funnet til 38,71% og det midlede vanninnholdet ved 6,26 meters dybde er 38,9%. Dette er 8,8% lavere enn det midlede vanninnholdet for forsøk 1-8. . . . .	64

4.3	Sammenligning av nødvendig trykk for fullstendig vannmetning av et system med henholdsvis 5%, 10% og 15% initielt volum luft. Nødvendig trykk for å oppnå 100% vannmetning er henholdsvis 240 kPa, 620 kPa og 1040 kPa for de viste prosentandelene initiell luft. Forskjellen i trykk for å oppnå 100% vannmetning av systemet er 380 kPa mellom 5% og 10% initiell luft i systemet. Mellom 10% og 15% initiell luft i systemet er den tilsvarende trykkøkningen 420 kPa. . . . .	65
4.4	Sammenligning av vanninnholdet for prøvene benyttet til treaksial- og ødometerforsøkene i denne oppgaven med vanninnholdet funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra [2] er markert som blå sirkler, og figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.13 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	66
4.5	Sammenligning mellom OCR og $K_0$ funnet ved CRS forsøk i denne oppgaven med verdiene for OCR og $K_0$ i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Kun OCR funnet i ødometerforsøk 1 og 3 er fremstilt i denne figuren da det var disse verdiene som ble benyttet under forsøkene. Verdiene for OCR og $K_0$ er her vist for dybden til ødometerforsøk 1 og 3. Verdiene for OCR og $K_0$ i treaksialforsøkene vil være tilnærmet like som for ødometerforsøkene. Å plote verdiene for alle treaksialforsøkene ville skapt et lite rot av data og ble derfor ikke gjort. Figuren med resultatene fra NGTS er hentet fra s.25 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	67
4.6	Skjærstyrken funnet under de utførte forsøkene sammenlignet med skjærstyrkeprofilene presentert i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Forsøk 2 avviker fra de øvrige resultatene i denne oppgaven og har en skjærstyrke på rundt 85 kPa. Figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.37 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	68
4.7	Sammenligning av setningsparametrene $M_0$ , $M_L$ og $m$ funnet ved CRS forsøk i denne oppgaven med verdiene funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Kun resultatene fra forsøk 1 og 2 er presentert da disse setningsparametrene ikke var mulige å tyde i forsøk 3. $M_L$ er kun vist for forsøk 1 da denne verdien var svært usikker ved forsøk 2. Forsøk 2 var godt forstyrret ved innbygging, som beskrevet i presentasjonen av ødometer resultatene. Parametrene fra Forsøk 2 må derfor benyttes med forsiktighet og vil ikke beskrive forholdene i leira korrekt. Resultatene fra forsøk 2 kan ses som den laveste verdien for $M_0$ og det laveste modultallet funnet i denne oppgaven. Figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.31 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	69

4.8 Sammenligning av konsolideringskoeffisienten funnet ved forsøk i denne oppgaven mot verdiene funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Det ble ikke utført permeabilitetsforsøk på leira i denne oppgaven, og det er derfor ikke noe grunnlag for sammenligning av denne parameteren. Kun resultatene fra forsøk 1 og 2 er presentert da resultatene fra forsøk 3 var umulige å tyde, se vedlegg B. Forsøk 2 ble sterkt forstyrret under innbyggingen, som beskrevet i kapittel 3.2, og kan derfor ikke forventes å gjenspeile de faktiske forhold i bakken. Forsøk 2 kan ses som den høyeste oppnådde konsolideringskoeffisienten i denne oppgaven. Figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.32 i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	70
--	----



# Tabeller

2.1	Forskjellige metoder for å øke skjærspenningene under skjærfasen i et treaksialforsøk. Metodene er hentet fra s.223 i Statens Vegvesen R210 [12]. . . . .	12
2.2	Normale verdier for styrkeparametrene attraksjon og friksjon basert på leirens stivhet for norske leirer. Stivheten er definert av den udrenerte skjærstyrken til materialet. Tallene er hentet fra s.267 i kompendiet for faget Geotechnics Field and Laboratory Investigations ved NTNU [6] og side 2-10 i Statens Vegvesen V220 [20]. . . . .	21
2.3	Kriterier for vurdering av prøve kvalitet basert på volum utpresset porevann. Verdiene er hentet fra s.2-18 i Statens Vegvesen V220 [20]. . . . .	24
2.4	Kriterier for vurdering av prøve kvalitet basert på endring i poretall med utgangspunkt i OCR for leira. Verdiene er hentet fra NGF melding 11 s.29 [8]. . . . .	25
2.5	Henrys konstant og konstantens temperaturavhengighet for hovedbestanddelene i luft. Verdiene er hentet fra s.11, 12 og 20 i R. Sander 2015 [32]. . . . .	31
2.6	Kritisk temperatur og trykk for hovedbestanddelene av luft. Verdiene er hentet fra s. 13 og 16 i Praxair - Gassfarer og gassikkerhet 2017 [38]. . . . .	33
2.7	Densitetene til hovedbestanddelene av luft ved 6,9 °C og 26,9 °C ved ulike trykk. Verdiene ble benyttet til å etablere en endring i gassenes tetthet ved varierende trykk for de to temperaturene vist. Verdiene er hentet fra <i>Engineering ToolBox</i> [39], [40] og [41]. . . . .	35
3.1	Oversikt over treaksialforsøkene utført i denne oppgaven. . . . .	37
3.2	Udrenert skjærstyrke funnet ved CAUC forsøk i denne oppgaven. . . . .	38
3.3	Drenerte styrkeparametre funnet ved bruk av representative tolkningslinjer for de utførte forsøkene. Tolkningene basert på p'-q og NTNU plott resulterte i like parametre. . . . .	39
3.4	Oppnådd B-verdi etter ett minutt for de utførte forsøkene. Prøvens dybde, benyttet baktrykk og prosedyre er også vist for de ulike forsøkene. . . . .	39

3.5	Vanninnhold i leireprøvene benyttet til treaksialforsøk. . . . .	49
3.6	Prøveforstyrrelse for treaksialforsøkene basert på volum av utpresset porevann og endringen i poretall. . . . .	49
3.7	Oversikt over ødometerforsøkene utført i denne oppgaven. . . . .	50
3.8	Oversikt over parametrene funnet under ødometerforsøkene. . . . .	50
3.9	Vanninnhold i de ulike ødometerforsøkene utført i denne oppgaven med tilhørende enhetsvekt og partikkel densitet. . . . .	54
3.10	Prøveforstyrrelse for ødometerforsøkene basert på metoden til Lunne et.al [11] og forslaget til korreksjon av falske deformasjoner gitt fra Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2]. . . . .	54
4.1	Tetthet for oksygen, nitrogen og argon ved standard temperatur og trykk. Verdiene er hentet fra s.13 og 16 i Praxair Gassfarer og gassikkerhet [38]. . . . .	59



# Forkortelser og symboler

## Forkortelser

°C Grader celsius

K Kelvin

atm Atmosfære

CAUC Konsolidert anisotropt udrenert kompresjonsforsøk

CAUE Konsolidert anisotropt udrenert ekstensjonsforsøk

CG Konstant gradient

cm<sup>3</sup> Kubikkcentimeter

CPR Konstant poretrykks ratio

CPTU Trykksondering med poretrykksmåling

CRS Konstant tøyingsgrad

DMT Dilatometersonderinger

DSS Direkte skjærforsøk

g Gram

GDS Global Digital Systems Ltd

IL Trinnvis pålastning

In-situ Forholdene prøvestykkene opplevde før de ble tatt opp av jorda

kN Kilonewton

kPa Kilopascal

m<sup>2</sup> Kvadratmeter

$m^3$	Kubikkmeter
m/s	Meter per sekund
min	minutt
MIT	Massachusetts Institute of Technology
mm	Millimeter
$mm^2$	Kvadratmillimeter
$mm^3$	Kubikkmillimeter
MPa	Megapascal
NGF	Norsk Geoteknisk Forening
NGI	Norges Geotekniske Institutt
NGTS	Norwegian GeoTest Sites
NTNU	Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet
OCR	Overkonsoliderings grad
SINTEF	Selskapet for industriell og teknisk forskning ved Norges tekniske høyskole
STP	Standard temperatur og trykk
UNIS	Universitetssenteret på Svalbard
$\mu m$	Mikrometer

### **Kjemiske symboler**

<i>Ar</i>	Argon
<i>CO<sub>2</sub></i>	Karbondioksid
<i>H<sub>2</sub>S</i>	Hydrogensulfid
<i>N<sub>2</sub></i>	Dinitrogen
<i>N<sub>2</sub>O</i>	Dinitrogenoksid
<i>O<sub>2</sub></i>	Dioksygen

### **Symboler**

$\Delta e$	Poretallsendring
------------	------------------

$\Delta e/e_0$	Poretallsforhold	
$\Delta p'$	Middelspenningsendring	kPa
$\Delta q$	Endring i deviatorspenningen	kPa
$\Delta u$	Poretrykkendring	kPa
$\Delta V$	Utpresset porevann	mm <sup>3</sup>
$\delta$	Aksial deformasjon	mm
$\Delta \sigma$	Totalspenningsendring	kPa
$\Delta \sigma'_v$	Endring i effektiv vertikalspenning	kPa
$\Delta \varepsilon$	Endring i vertikaltøyning	
$\frac{d \ln H}{d(1/T)}$	Temperaturavhengighet for Henrys konstant	K
$\gamma$	Enhetsvekt	kN/m <sup>3</sup>
$\phi$	Friksjonsvinkel	°
$\rho_g$	Gassens densitet	g/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Partikkeldensitet	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_w$	Vannets densitet	g/cm <sup>3</sup>
$\sigma'_v$	Effektiv vertikalspenning	kPa
$\sigma'_{v0}$	in-situ effektiv vertikalspenning	kPa
$\sigma_1$	Største totalspenning	kPa
$\sigma'_1$	Største effektivspenning	kPa
$\sigma_3$	Minste totalspenning	kPa
$\sigma'_3$	Minste effektivspenning	kPa
$\sigma_a$	Aksiell spenning	kPa
$\sigma_r$	Radiell spenning	kPa
$\sigma_v$	Vertikalspenning	kPa
$\tau$	Opptredende skjærspenning	kPa
$\varepsilon$	Vertikaltøyning	

$\varepsilon_a$	Aksiell tøyning	
$\varepsilon_{vol}$	Volumtøyning	
$a$	Attraksjon	kPa
$A_0$	Tverrsnittsareal før konsolidering	mm <sup>2</sup>
$A_a$	Tverrsnittsareal etter konsolidering	mm <sup>2</sup>
$A_s$	Tverrsnittsareal under skjærfasen	mm <sup>2</sup>
$B$	Skemptions poretrykkparameter	
$c_a$	Konsentrasjon av gass i væskeform	mol/m <sup>3</sup>
$C_v$	Konsolideringskoeffisient	m <sup>2</sup> /år
$D$	Janbus poretrykkparameter	
$e_0$	Initielt poretall	
$H$	Dilatansmodul	
$H^{cp}$	Henrys konstant	mol/m <sup>3</sup> Pa
$h_i$	Prøvens initielle høyde	mm
$K$	Bulkmodul	Pa
$k$	Konstant	
$k$	Permeabilitet	m/s
$K_0$	Hviletrykkkoeffisient	
$M$	Helningen av bruddlinjen i p'-q plott	
$M$	Tangentmodul	MPa
$m$	Modultall	
$M_0$	Tangentmodul ved in-situ effektivspenning	MPa
$M_g$	Gassens molare masse	g/mol
$M_L$	Tangentmodul ved prekonsolideringsspenning	MPa
$n$	Mengde gass	mol
$P$	Påsatt aksiell kraft	kN

$p$	Total middelspenning	kPa
$p'$	Effektiv middelspenning	kPa
$p'_c$	Prekonsoliderinsspenning	kPa
$P_g$	Gassens absolutte trykk	Pa
$p_g$	Gassens partielle trykk	Pa
$P_{g0}$	Initielt absolutt trykk	kPa
$P_{g1}$	Absolutt trykk	kPa
$q$	Deviatorspenning	kPa
$R$	Gass konstant	$m^3 * Pa * K^{-1} * mol^{-1}$
$S$	Helningen av bruddlinjen i NTNU plott	
$s$	Gassens løselighet	$g/m^3$
$S_r$	Vannmetning	
$s_u$	Udrenert skjærstyrke	kPa
$s_{ua}$	Udrenert aktiv skjærstyrke	kPa
$T$	Temperatur	K
$T_0$	Referansetemperatur	K
$T_1$	Oppnådd temperatur	K
$u$	Poretrykk	kPa
$u_b$	Poretrykk målt i bunnen av apparatet	kPa
$V_0$	Volum av prøven før konsolidering	$mm^3$
$V_g$	Volum av gass	$m^3$
$V_w$	Volum av vann	$m^3$
$V_{dg}$	Volum oppløst gass	$m^3$
$V_{fg}$	Volum fri gass	$m^3$
$V_{g0}$	Initielt volum gass	$m^3$
$V_{g1}$	Volum gass	$m^3$

$V_{ig0}$	Initielt ekvivalent volum gass	$m^3$
$V_{ig1}$	Ekvivalent volum gass	$m^3$
$V_{ig}$	Totalt ekvivalent volum gass	$m^3$
$w$	Vanninnhold	

# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn for valg av tema og problemstilling

Poretrykkmåling for udrenerte treaksialforsøk er en komplisert oppgave som er mye diskutert i dagens geotekniske miljø. Problemene knyttet til dette ligger i hvorvidt man får tømt poretrykksystemet for luft før selve forsøket starter. Luft i poretrykksystemet vil dempe det målte poretrykket i forhold til det opptredende poretrykket i prøven. Et lavere poretrykk vil bety at grunnens styrkeparametre gjenspeiles ukorrekt gjennom forsøk, noe som i verste fall kan resultere i en bruddmekanisme i bakken og tap av menneskeliv og store økonomiske verdier.

I denne oppgaven skal det ses nærmere på prosedyrene rundt aktive treaksialforsøk på leirprøver. Ulike prosedyrer for metning av poretrykksystemet vil prøves ut. Resultatene fra de ulike forsøkene skal så sammenlignes for å se om de forskjellige prosedyrene resulterer i ulike resultater.

Det vil kjøres enkle og parallelle forsøk på prøver tatt ut fra samme miniblokkprøve av leire. De parallelle forsøkene vil skjæres ut i samme snitt, det vil si at begge prøvene har de samme initialspenningene, og forskjellene som kan forventes å stamme fra ulikheter i kornstruktur og mineraloppbygging minimeres.

I tillegg til å undersøke effektene av ulike prosedyrer ved treaksialforsøk vil det utføres teoretiske beregninger hvor effektene av en jevn, isotrop trykkøkning ved ulike temperaturer studeres for et bestemt system.

### 1.2 Prøvetakingsområde

Jordprøvene det i denne oppgaven skal kjøres forsøk på er hentet opp ved NGTS sitt prøvetakingsområde på Tiller-Flotten, litt sør for Trondheim. Prøvetakingsområdet er vist med gul farge på figur 1.1.

### 1.2.1 NGTS

NGTS er et forskningssamarbeid mellom NTNU, SINTEF, UNIS og Statens Vegvesen som ledes av NGI. Formålet med samarbeidet er å forske på de ulike løsmassetypene i Norge og benytte dette til utdanning av personell samt utvikling av programvare og lignende. Som figur 1.1 viser, er det utarbeidet 5 ulike testforsøk i Norge. Ett for sand, silt, bløt leire, kvikkleire og permafrost.



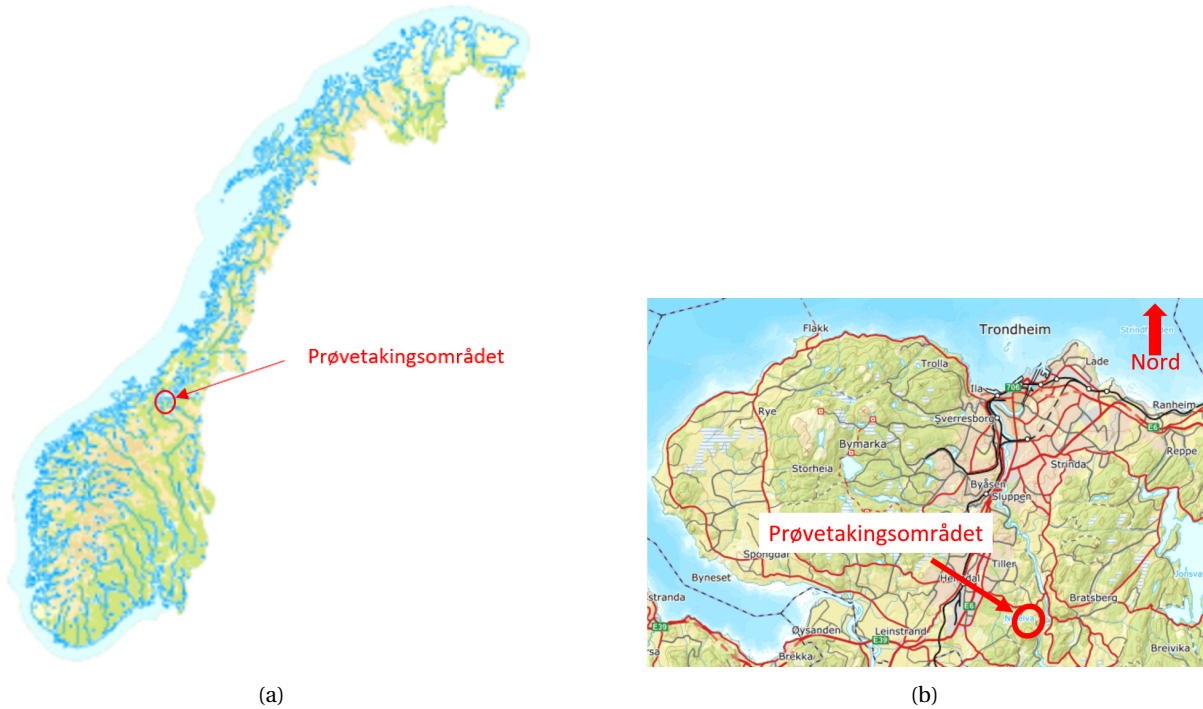
Figur 1.1: Oversikt over NGTS sine 5 prøvetakingsområder i Norge. Prøvetakingsområdene består av et for sand, silt, bløt leire, kvikkleire og permafrost. Den gule markøren viser beliggenheten for Tiller-Flotten området. Figuren er hentet fra NGI [1].

### 1.2.2 Tiller-Flotten området

Området ligger omtrent 10 kilometer sør for Trondheim. Prøvetakingsområdet ligger i et relativt flatt terreng på omtrent 125 m.o.h og skrår nedover mot Nidelva i øst. De omkringliggende jordarealene brukes i stor grad til jordbruk og matproduksjon.

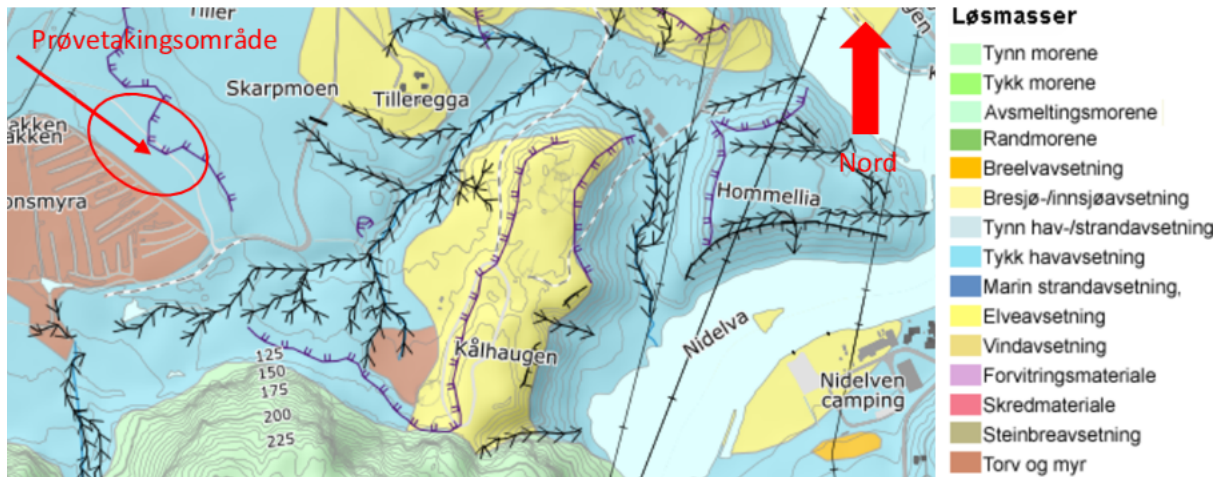
Tidligere grunnboringer utført og presentert i NGTS rapport 20160154-20-R [2] har avdekket at mektigheten av leire i området overskrider 50 meter. Utførelse av både in-situ grunnundersøkelser og laboratorie undersøkelser utført i den samme rapporten viser et lag med tørrskorpe ned til omkring 2 meters dybde etterfulgt av et lag med lav til medium sensitiv leire ned til 7,5 meters dybde. Fra 7,5 meters dybde og nedover er det avdekket en høysensitiv kvikkleire. Det har gått flere skred i området, hvor det største er Tiller-raset som gikk nordøst for prøvetakingsområdet, ned mot Nidelva, i 1816. Dette raset drepte 15 mennesker og flere gårdsdyr.





Figur 1.2: Oversiktskart for Tiller-Flotten området. De røde sirkelene viser beliggenheten av prøvetakingsområdet. Kartgrunnlaget er hentet fra Norgeskart [3].

### Løsmasseavsetning

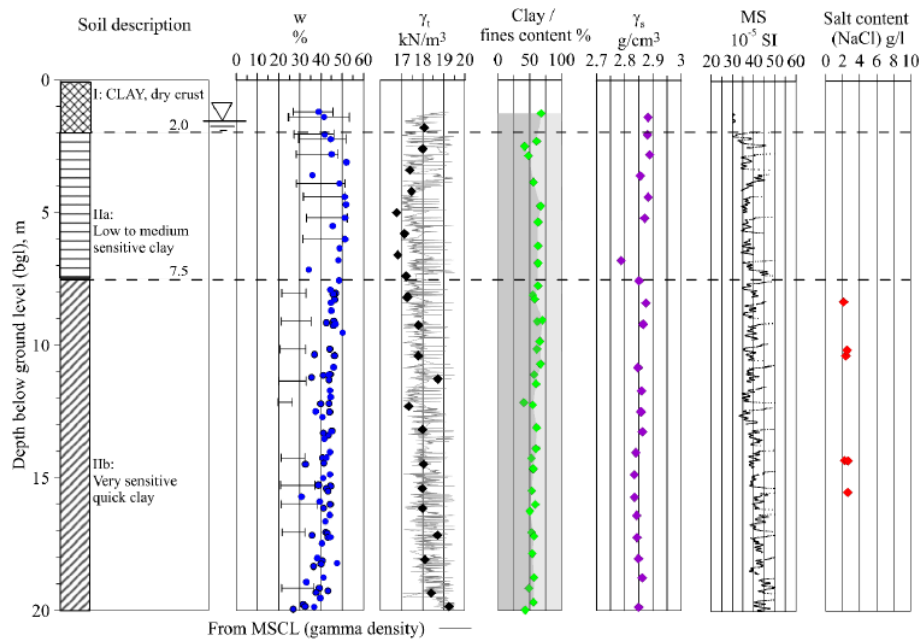


Figur 1.3: Løsmassekart over prøvetakingsområdet på Tiller-Flotten. Den røde sirkelen viser beliggenheten av prøvetakingsområdet. Kartet viser at området består av en tykk havavsetning, noe som indikerer leire. Den blå linjen med doble, normale linjer som kan ses gå gjennom prøvetakingsområdet indikerer en tidligere skredkant. Kråkeføttene som kan ses fra sør til øst viser beliggenheten av raviner i området. Kartet er hentet fra NGU [4].

Isbreene som dekket området under den siste istiden, eroderte de omkringliggende fjellmassene. De eroderte massene ble så avsatt under nedsmeltningen av isbreene. Ettersom vekten av isbreene var stor, ble landskapet presset ned og kystlinjen var derfor 175 meter høyere i området enn hva den er i dag. Massene ble avsatt i saltvann og som beskrevet av Gylland et.al i 2013 [5] dannet massene en korthus liknende struktur under sedimenteringen som ble bundet sammen av sterke van der Waals krefter induisert av det salte vannet. Senere,

under landhevingen som har pågått siden isen trakk seg tilbake, har landmassene steget opp over havnivået. Dette har medført en drenering av saltvannet da ferskvann har begynt å strømme gjennom jorden. Ferskvannet løser opp van der Waals bindingene slik at korthus strukturen står igjen, men uten de nødvendige bindekraftene til å holde det stabilt. Med redusert kraft i bindingene skal det kun en mindre lastendring til før strukturen i leira kollapser og leira omrøres.

## Densiteter og vanninnhold

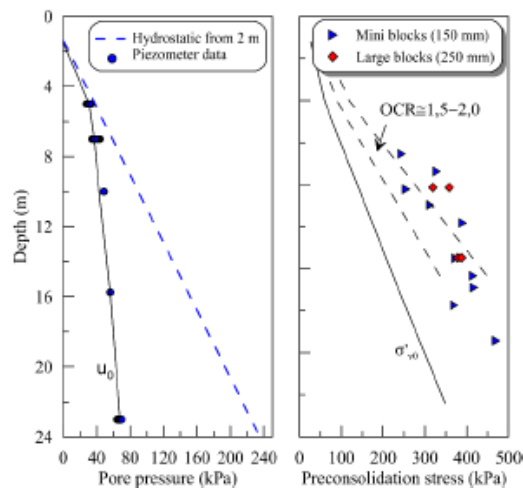


Figur 1.4: Vanninnhold, enhetsvekt, leirinnhold, partikkeldensitet, magnetisk mottagelighet og saltinnhold i porevannet for leira på Tiller-Flotten. I denne oppgaven vil verdiene for vanninnhold, enhetsvekt og partikkeldensitet benyttes for å sammenligne og vurdere relevansen til forsøkene utført i denne studien. Figuren er hentet fra s.13 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

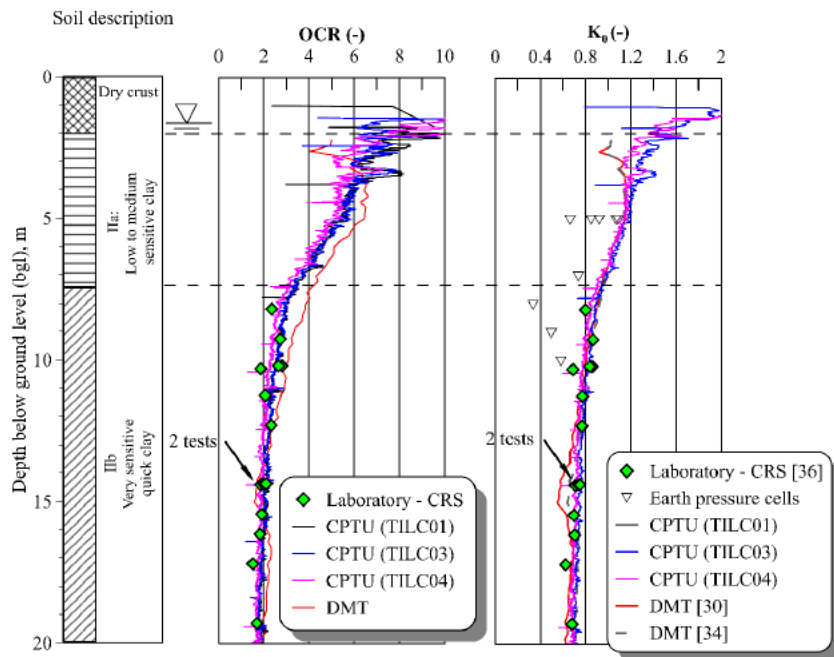
I denne oppgaven vil kun vanninnholdet, enhetsvekten og partikkeldensiteten fra figur 1.4 benyttes.

Figur 1.4 viser et vanninnhold i leira som stiger fra 40% i 1 meters dybde opp til 50% i 3 meters dybde. Deretter holder vanninnholdet seg generelt sett konstant ned til 7,5 meters dybde med noen avvik. Fra 7,5 meters dybde synker vanninnholdet i leira jevnt til 30-40% ved 20 meters dybde. Enhetsvekten til leira er på 18 kN/m<sup>3</sup> ned til omtrent 3 meters dybde. fra 3 til 4 meters dybde er enhetsvekten funnet til 17,5 kN/m<sup>3</sup>. Fra 4 meters dybde ned til 7,5 meters dybde er enhetsvekten på 17kN/m<sup>3</sup>. Fra 7,5 meters dybde ned til 20 meters dybde stiger enhetsvekten fra 17 kN/m<sup>3</sup> til rundt 19 kN/m<sup>3</sup>. Partikkeldensiteten holder seg tilnærmet konstant rundt 2,85 g/cm<sup>3</sup> fra 1 meter til 7,5 meters dybde. Et avvik kan ses rundt 6,8-6,9 meters dybde hvor densiteten er under 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Fra 7,5 meters dybde holder partikkeldensiteten seg tilnærmet konstant rundt 2,8 g/cm<sup>3</sup>.

## Spenningshistorikk



Figur 1.5: Poretrykk og prekonsolideringsspenninger for prøvetakingsområdet. Poretrykket viser en markant knekk ved omtrent 5 meters dybde, og er underhydrostatisk fra 5 meter og ned. Prekonsolideringsspenningene ligger på omtrent 300 kPa i 6-7 meters dybde og stiger til ca 400 kPa i 14-15 meters dybde. Overkonsolideringsgraden er funnet til litt over 2 fra 7-10 meters dybde. Fra 10 meter og nedover ligger den mellom 1,5 og 2. Figuren er hentet fra s.10 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].



Figur 1.6: Sammenstilling av OCR og  $K_0$  funnet ved ulike testmetoder for Tiller-Flotten området. I det middels til lite sensitive leirlaget synker OCR fra omtrent 7 ved 2 meters dybde, ned til en verdi på 3 ved 7,5 meters dybde.  $K_0$  synker i dette området fra omtrent 1,4 i 2 meters dybde ned til 0,9-1 i 7,5 meters dybde. Både OCR og  $K_0$  opplever en liten knekk rundt 5 meters dybde, noe som sammenfaller med starten på det underhydrostatiske poretrykket i bakken. OCR synker fra 3 i 7,5 meters dybde og ned til omtrent 2 ved profilets slutt.  $K_0$  synker fra ca 0,9 ved 7,5 meter, ned til 0,7 ved profilets slutt. Figuren er hentet fra s.25 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

Grunnvannet i området ligger på mellom 1-2 meters dybde som presentert i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Fra grunnvannstanden og ned til omtrent 5 meters dybde viser piezometer målingene i figur 1.5 et hydrostatisk

poretrykk. Fra 5 meters dybde og ned vises derimot et underhydrostatisk poretrykk. Dette kan skyldes terrengets helning, og en medfølgende grunnvannstrømning ned mot Nidelva i øst.

Figur 1.5 viser en overkonsoliderings grad, OCR, på litt over 2 fra ca 7 meters dybde ned til omtrent 10 meters dybde. Under dette nivået ligger OCR en plass mellom 1,5 og 2. Det vises ingen stor variasjon i verdiene funnet med 250mm storblokkprøver og 160mm miniblokkprøver. OCR verdien skyldes trolig belastningen jorda var utsatt for som følge av isbreene som dekte landskapet under den siste istiden. I tillegg kan krypeffekter ha bidratt noe til dette [2].

Figur 1.6 viser OCR og  $K_0$  for en dybde på 20 meter ved Tiller-Flotten prøvetakingsområde. Figuren er en sammenstilling av resultatene fra CRS ødometerforsøk, CPTU sonderinger, dilatometer og jordtrykkceller utført i [2]. Figuren viser den samme tendensen for OCR i det sensitive og kvikke leirlaget som beskrevet for figur 1.5. I det middels til lite sensitive leirlaget fra 2 til 7,5 meters dybde synker OCR med dybden fra en verdi på 7 ned til en verdi på 3, men en markert knekk i 5 meters dybde. Verdiene for  $K_0$  synker også med dybden. I 2 meters dybde vises en verdi på 1,4. Denne verdien synker til 0,9 i 7,5 meters dybde med en knekk i 5 meters dybde. Fra 7,5 meters dybde synker verdien videre og en verdi på rundt 0,7 kan ses i 20 meters dybde.

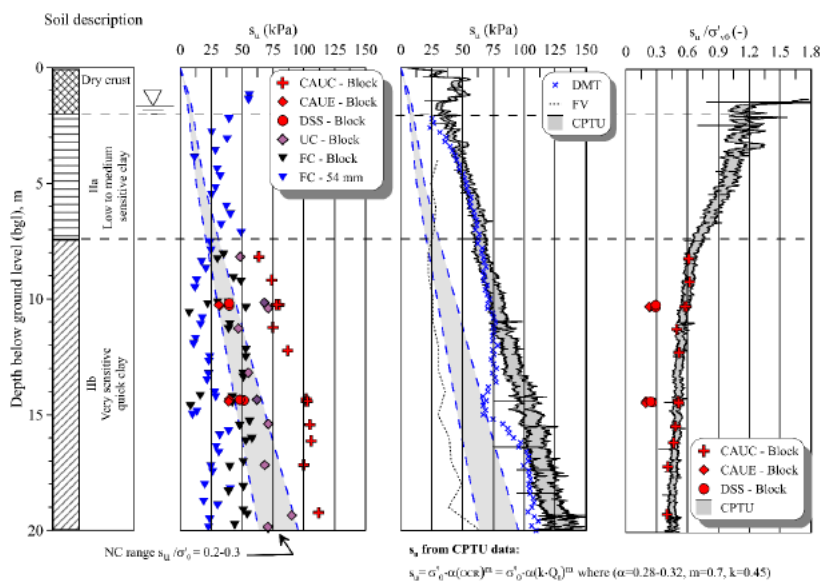
### Styrkeparametre

Styrkeparametre for prøvetakingsområdet er funnet og presentert i [2], se figur 1.7. Resultatene er fremstilt fra anisotrop konsoliderte udrenerte aktive treaksialforsøk (CAUC), anisotrop konsoliderte udrenerte passive treaksialforsøk (CAUE), direkte skjærforsøk (DSS), enaksiale trykkforsøk, konus forsøk, dilatometer, vinge boring og CPTU sonderinger.

Figur 1.7 viser en  $s_u$  på rundt 60 kPa i tørrskorpa. I det øverste leirlaget ligger den udrenerte skjærstyrken mellom 25 og 35 kPa. Ved omtrent 5 meters dybde begynner  $s_u$  å øke. Ved slutten av det øvre, middels sensitive leirelaget finnes det en  $s_u$  på mellom 30-50 kPa. Den udrenerte skjærstyrken stiger så videre og ender mellom 30-105 kPa ved 15-16 meters dybde. Skjærstyrken holder seg så relativt konstant ned til slutten av jordprofilen.

Det bør merkes at verdiene for  $s_u$  ned til 7,5 meters dybde samt de lavere verdiene av  $s_u$  stammer fra konus forsøk utført på 54mm sylinderprøver. De høyeste verdiene for den udrenerte skjærstyrken fra 7,5 meters dybde ned til 20 meters dybde er basert på CAUC treaksial forsøk. Fra sammenstillingen av treaksialforsøk, direkte skjærforsøk og CPTU sonderinger i  $s_u/\sigma'_{v0}$  plottet, vises en god korrelasjon mellom skjærstyrken funnet ved CAUC forsøk og CPTU sonderinger.

Med CAUC forsøk er friksjonsvinkelen ved en stabil tilstand etter brudd, under store tøyninger funnet til å ligge mellom 29-32 ° og med en kohesjon på omtrent 5 kPa [2]. De drenerte styrkeparametrene er kun funnet for det sensitive og kvikke laget fra 7,5 meter ned til 20 meters dybde.



Figur 1.7: Skjærstyrke profil for Tiller-Flotten prøvetakingsområdet. Profilet er satt sammen av avanserte og enkle laboratorieforsøk, men også ulike feltforsøk. På tvers av laboratorie og feltforsøk vises en god korrelasjon mellom CAUC forsøk, CPTU sonderinger og DMT sonderinger, med et avvik i 14-15 meters dybde for DMT. De andre forsøksmetodene resulterer jevnt over i en lavere skjærstyrke hvor konusforsøk på 54mm sylindrerprøver viser de laveste verdiene av  $s_u$ . Figuren er hentet fra s.37 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

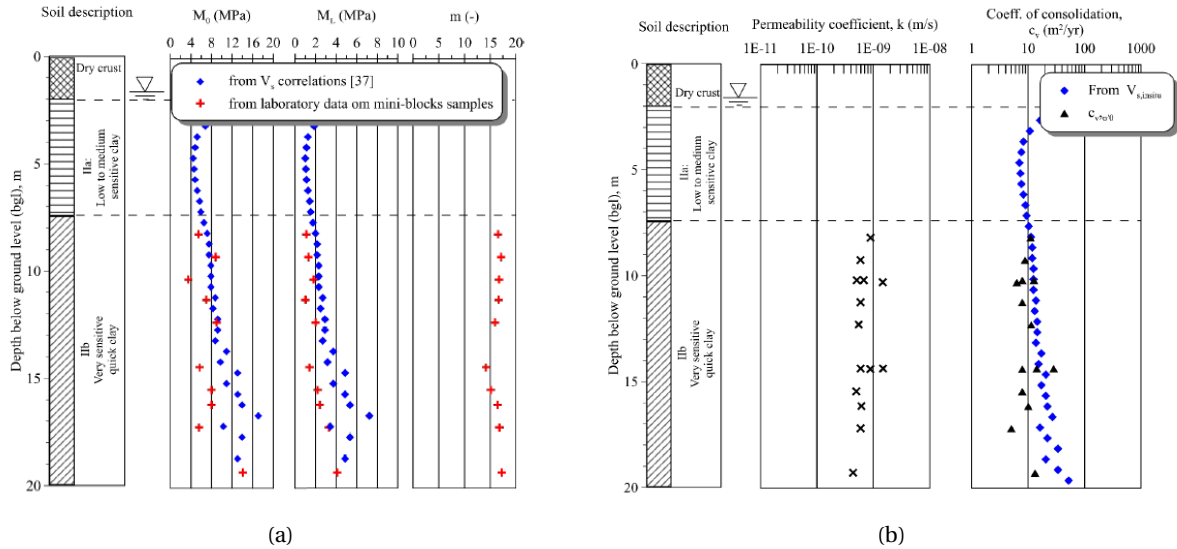
## Setningsparametre

Setningsparametrene for Tiller-Flotten området er i [2] funnet ved CRS ødometerforsøk utført på blokkprøver av høy kvalitet og ved korrelasjon med in-situ skjærbølgehastigheter i leira. Resultatene er vist i figur 1.8.

Figur 1.8a viser tangent modulene og modultallet funnet for området. Tangent modulen ved in-situ spenningsnivå,  $M_0$  er funnet til å ligge omtrent på 7 MPa ved 3 meters dybde. Verdien synker så til litt over 4 MPa ved 5 meters dybde før den stiger til omtrent 14 MPa ved 19 meters dybde. Tangent modulen for spenninger ved prekonsolideringen,  $M_L$  følger tilnærmet den samme utviklingen som tangent modulen ved in-situ spenningsnivå. Ved 3 meters dybde er tangentmodulen funnet til 2 MPa. Verdien synker så til rundt 1 MPa ved 5 meters dybde før den stiger til mellom 4-6 MPa ved 19 meters dybde. Modultallet holder seg tilnærmet konstant på 16.

Figur 1.8b viser permeabiliteten og konsolideringskoeffisienten for prøvetakingsområdet. Permeabiliteten funnet i jorda viser en tilnærmet konstant verdi rundt  $5 \times 10^{-10}$  m/s. Det vises noen små avvik hvor en høyere permeabilitet er funnet. Dette tyder på en noe lagdelt grunn med enkelte drenerende lag. Konsolideringskoeffisienten  $C_v$  er funnet til å være omtrent  $20 \text{ m}^2/\text{år}$  ved 2 meters dybde. Denne faller så til omtrent  $6 \text{ m}^2/\text{år}$  ved 4-5 meters dybde før den stiger til  $30-40 \text{ m}^2/\text{år}$  ved 20 meters dybde.

Som for treaksialforsøkene er det kun utført ødometerforsøk fra 7,5 meters dybde og nedover. Verdiene over 7,5 meters dybde er utelukkende basert på in-situ skjærbølgehastigheter. Mellom 7,5 og 20 meters dybde er det utført både CRS ødometer og målinger av in-situ skjærbølgehastigheter. Resultatene viser en tendens til høyere verdier for tangentmodul ved in-situ spenning, tangentmodul ved prekonsoliderings spenning og konsolideringskoeffisient ved bruk av skjærbølgehastigheter.



Figur 1.8: Setningsparametre for Tiller-Flotten området. Figur 1.8a viser tangentmodulen ved in-situ effektivspenning  $M_0$ , ved prekonsolideringsspenning  $M_L$  og modultallet  $m$ . Figur 1.8b viser permeabiliteten  $k$ , og konsolideringskoeffisienten  $C_v$  for leira på Tiller-Flotten.  $M_0$ ,  $M_L$  og  $C_v$  viser alle den samme oppførselen med dybde. Fra 3 meters dybde synker verdiene ned mot 4-5 meters dybde, før de så stiger jevnt ned til profilets slutt.  $m$  og  $k$  viser begge jevne verdier i spektret 7,5 - 20 meters dybde hvor de er målt. Figuren er hentet fra s.31-32 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

### 1.3 Struktur

Oppgaven vil følge følgende strukturering.

Først vil det nødvendige teoretiske grunnlaget til oppgaven beskrives. Deretter vil resultatene oppnådd både gjennom forsøk, men også gjennom de teoretiske beregningene presenteres. De ulike aspektene ved forsøkene vil så diskuteres og en mulig tolkning av resultatene vil presenteres før forfatterens tanker rundt fremtidig arbeid på området presenteres. Til slutt vil konklusjonen som kan trekkes fra både de utførte forsøkene og de teoretiske beregningene presenteres.

# Kapittel 2

## Teori og metode

### 2.1 Styrkeparametre for leire

Leire er et vanlig materiale å finne i norsk jord og det bygges mye på leirholdig grunn. Det er derfor svært viktig å finne de korrekte styrkeparametrene for leira.

Sandven et.al 2015 [6] beskriver tre ulike oppførsler for leire.

1. Udrenert ved rask pålasting av grunnen og korte perioder med last. En vesentlig del av lasten tas opp av porevannet i grunnen. Den udrenerte skjærstyrken,  $s_u$ , er den styrende styrkeparameteren.
2. Drenert ved langsom pålasting av grunnen og lengre perioder med last. Lasten tas opp av kornskjelettet i sin helhet. Attraksjonen,  $a$ , og friksjonsvinkelen,  $\phi$ , er de styrende styrkeparametrene.
3. Delvis drenert. En blanding av de to tilstandene over.

Forskjellen mellom tilstandene er direkte knyttet til leiras permeabilitet og hvorvidt porevannet får unnslippe når leira er under belastning. Den siste tilstanden, delvis drenert, er trolig den som er mest korrekt i forhold til hvordan leire i realiteten oppfører seg under belastning. Til tross for at denne tilstanden er den mest realistiske, brukes den ikke i praksis da den blir komplisert å simulere.

I denne oppgaven vil det fokuseres på leiras udrenerte oppførsel. I praksis finnes den udrenerte skjærstyrken,  $s_u$ , oftest i aktiv tilstand, altså ved kompresjonstester. Styrken omtales da som  $s_{ua}$ .

$s_{ua}$  angis for et borhull som et profil med variasjon i dybden. Profilet settes sammen av resultater fra prøver tatt i ulike nivåer i borhullet kombinert med erfaringsdata hvor  $s_{ua}$  profilet velges som den mest sannsynlig opptredende aktive skjærstyrken til materialet i henhold til NIFS rapport 77 fra 2014 [7].

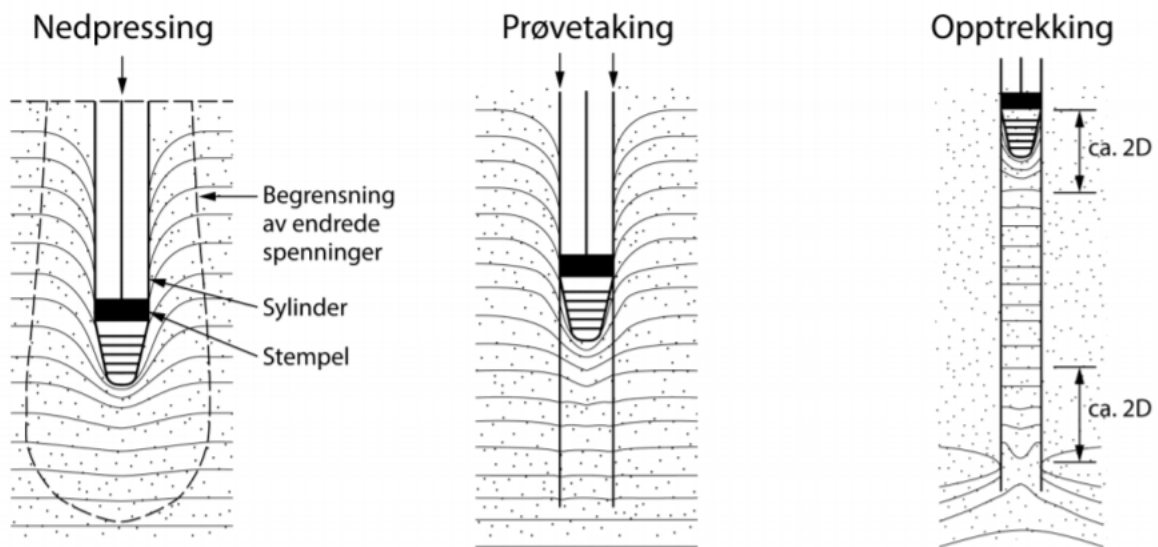
NIFS rapport 77 fra 2014 fastslår at  $s_{ua}$  profilet bør velges etter følgende rangering [7].

1. Treaksialforsøk av god kvalitet
2. CPTU

3. Erfaringsverdier
4. Konus/ Enaksialforsøk/ Vingebor

## 2.2 Prøvetakingsmetode

Den mest brukte prøvetakingsmetoden i dagens geotekniske bransje er 54mm stempel prøvetakeren. Prøvetakeren består av en sylinder med 54mm i diameter lagd enten av stål eller et komposittmateriale med en skarp egg nederst som skjærer seg gjennom jorden. Denne prøvetakeren gir prøver med korrekt diameter for videre labforsøk og er derfor mest kostnadseffektiv i bruk. En ulempe med denne prøvetakeren er at den forstyrrer prøvene i begge ender i tillegg til at skjærflaten til leira blir en del av prøvestykket. Dette forstyrrer en del av prøvestykket som vist på figur 2.1. Her er de ulike nivåene i jorda representert ved horisontale linjer. Som man ser vil disse linjene bøye av nærmest prøvetakeren, noe som illustrerer prøveforstyrrelse.



Figur 2.1: Forstyrrelse av prøver tatt med stempelprøvetaker. De horisontale strekene representerer ulike nivåer eller lag i jorda og avbøyningen av disse linjene illustrer hvordan jorda forstyrres under prøvetaking. Figuren er hentet fra NGF melding 11 s.26. [8]

Alternativer til 54mm stempelprøvetakeren er for eksempel 75mm og 95mm stempelprøvetakere. Når diameteren på sylindren økes vil den forstyrrede sonen flyttes lenger ut fra midten av prøvestykket. Før forsøk kan utføres på prøver fra 75mm og 95mm sylindre, må prøvene trimmes ned til en diameter på 54mm. Under trimmingen vil det ytterste laget av leire, utsatt for skjærkrefter og derfor forstyrret under prøvetakingen, kuttes forsiktig bort fra prøvestykket. Igjen står en prøve av høyere kvalitet enn hva en 54mm prøvesylinder kan gi.

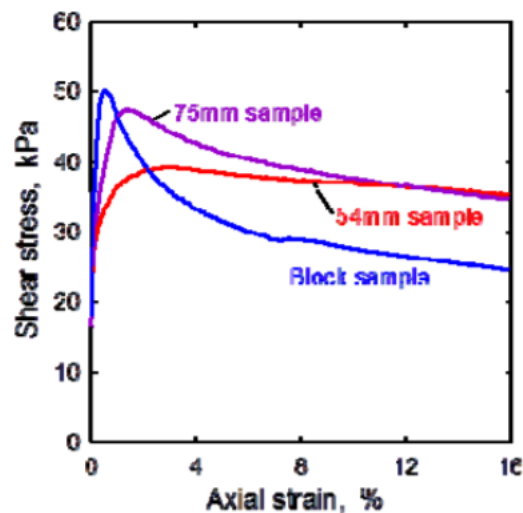
Bozozuk [9] viste dette gjennom enaksiale kompresjonsforsøk publisert i 1970. Her ble test resultater fra prøver tatt opp med en 124mm prøvesylinder i bløt marin leire sammenlignet med tilsvarende prøver tatt opp med en 54mm prøvesylinder. Resultatene viste liten forskjell i den udrenerte skjærstyrken, mens prekonsolideringsspenningen fra 124mm sylindreprøver var 40% høyere enn den funnet i 54mm sylindreprøver. Forsøkene utført på leire fra 124mm sylindreprøver gikk også til brudd ved en lavere aksial tøyning enn forsøkene utført



på 54mm sylindrerprøver.

Resultatene i studiet til Bozozuk viste en økning av prøve kvalitet med økning av diameter. Edén [10] publiserte i 1970 en avhandling hvor han sammenlignet flere ulike sylindrerprøvetakere med blokkprøver på en sensitiv leire. I likhet med Bozozuk, benyttet også Edén enaksiale kompresjonsforsøk for å bestemme styrken til leira. Som i studiet til Bozozuk ble det ikke funnet store forskjeller i den udrenerte styrken til leira hentet opp med de ulike diametrene av sylindrerprøvetakere. Blokkprøvene tatt opp i studiet viste derimot opp mot det dobbelte av styrke i forhold til sylindrerprøvene. Det ble også påvist 25% lavere prekonsoliderings spenning ved sylindrerprøvene generelt, sammenlignet med blokkprøvene. Konklusjonen ble derfor at selv sylindrerprøvetakere av større diameter skader materialet i en ikke neglisjerbar grad, og at kun uforstyrrede blokkprøver kan anses å gi tilnærmet korrekt informasjon om leiras egenskaper.

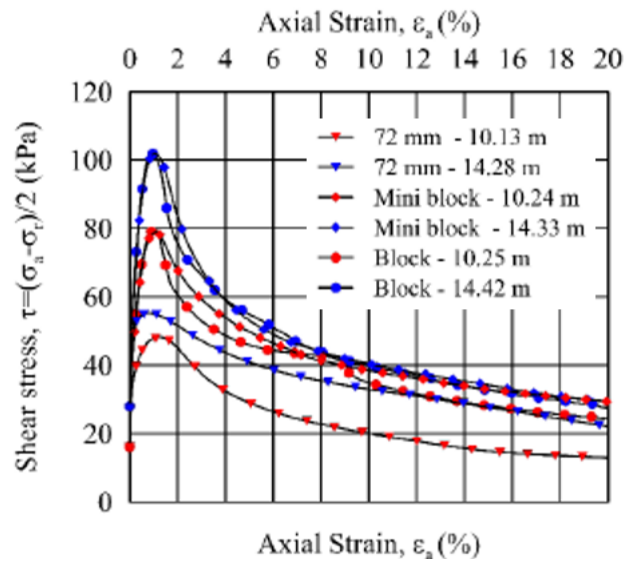
Lunne et.al 1997 [11] viste gjennom treaksialforsøk at blokkprøver også der viser overlegenhet sammenlignet med sylindrerprøver, spesielt 54mm. Dette kan ses i figur 2.2.



Figur 2.2: Sammenligning av resultater fra treaksialforsøk på leire tatt opp med 54mm sylindrer, 75mm sylindrer og blokkprøver presentert ved aksial tøyning plottet mot skjærstyrke. Både blokkprøve og 75mm sylindrerprøve viser betydelig høyere skjærstyrke enn 54mm sylindrerprøve. Blokkprøven når brudd ved en lavere tøyning enn 75mm og spesielt 54mm sylindrerprøve og utviser en betydelig mer utpreget kontraktant oppførsel etter brudd. Figuren er hentet fra Lunne et.al. 1997 [11]

[11] fant også ut at forskjellen mellom blokk og sylindrerprøver øker ved avtagende plastisitet, økende dybde og økende sensitivitet i leira. Effekten av prøveforstyrrelser er særlig påvirket av plastisiteten til leira. Lav plastisitet gir stor effekt av prøveforstyrrelser.

Av praktiske hensyn vil det i denne oppgaven benyttes miniblokkprøver. Dette er blokkprøver med en diameter på 160mm. Forsøkene utført i NGTS rapport 20160154-21-R [2] viser ingen merkbar forskjell mellom resultater fra miniblokk sammenlignet med storblokkprøver se figur 2.3.



Figur 2.3: Sammenstilling av resultater fra 250mm blokk, 160mm miniblokk og 72mm sylindrerprøver presentert i  $\epsilon - q$  plott for treaksialforsøk utført på Tiller-Flotten leire. Figuren viser en tilnærmet lik oppførsel for blokk og miniblokk prøver, med en litt mer utpreget kontraktant oppførsel etter brudd for blokkprøver. 72mm sylindrerprøver bryter ved en betydelig lavere skjærspenning enn prøvene fra både blokk og miniblokk. Figuren er hentet fra s.35 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

## 2.3 Treaksialforsøk

Treaksialforsøk kan i hovedsak utføres på 2 ulike måter. Drenert og udrenert. Forskjellen ligger i hvorvidt porevannet tillates å unnslippe under skjærtesten. Statens Vegvesen R210 [12] angir ulike variasjoner i måten skjærspenningene påføres prøvestykket basert på hvilke belastningsforhold som ønskes undersøkt. De ulike metodene for å påføre skjærspenninger er vist i tabell 2.1. De to første metodene påfører en større spenning aksielt enn radielt. Dette medfører en aksial kompresjon av prøvelegemet og kalles for aktive treaksialforsøk. De to siste metodene påfører størst spenning radielt på prøvestykket. Dette medfører en radiell kompresjon og en aksial ekstensjon. Dette omtales som passive treaksialforsøk.

Metode	Type	$\sigma_a$	$\sigma_r$
1	Aktiv	Øker	Konstant
2		Konstant	Avtar
3	Passiv	Konstant	Øker
4		Avtar	Konstant

Tabell 2.1: Forskjellige metoder for å øke skjærspenningene under skjærfasen i et treaksialforsøk. Metodene er hentet fra s.223 i Statens Vegvesen R210 [12].

I denne oppgaven vil det brukes udrenerte skjærforsøk. Dette er den mest benyttede metoden for treaksialforsøk hvor prøvestykkene består av vannmettet leire slik som på Tiller-Flotten området. Skjærspenningene vil påføres som beskrevet for metode 1 i tabell 2.1. Dette tilsvarer en lastsituasjon hvor jorden belastes vertikalt, mens forholdene forblir uendret horisontalt.

### 2.3.1 Målte parametre

Under et treaksialforsøk kontrolleres og måles flere parametre for å ha god kontroll over hva som skjer med prøven.

I konsolideringsfasen kontrolleres aksialspenningen  $\sigma_1$ , og den radielle spenningen  $\sigma_3$ , som prøven utsettes for, [6]. Disse spenningene brukes til å sette prøven tilbake til in-situ spenningsforhold. Mens konsolideringen pågår måles det utpressede porevannet av prøven,  $\Delta V$ . Det utpressede porevannet brukes til å vurdere hvorvidt prøven er ferdig konsolidert eller ikke. Denne vurderingen gjøres oftest på bakgrunn av mengde utpresset porevann per tidsenhet.  $\Delta V$  benyttes også til å kalkulere tverrsnittsarealet til prøvestykket etter endt konsolidering.

$$A_a = A_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right) / \left(1 - \frac{\Delta V}{3V_0}\right) \quad (2.1)$$

I denne likningen er:

$A_a$	Tverrsnittsareal etter konsolidering
$A_0$	Tverrsnittsareal før konsolidering
$\Delta V$	Utpresset porevann under konsolidering
$V_0$	Volum av prøven før konsolidering

I skjærfasen kontrolleres den radielle spenningen  $\sigma_3$ , og hastigheten for aksiell deformasjon  $\delta$ , [6]. Ettersom testen gjennomføres udrenert, stenges drenasjeveiene ut av prøven slik at  $\Delta V$  holdes konstant lik 0 og et poretrykk,  $u$ , kan måles. I tillegg måles påsatt aksiell kraft,  $P$ , og aksiell deformasjon,  $\delta$ , under skjærforsøket. Ut fra disse verdiene kan  $\varepsilon$ ,  $A_s$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_3$ ,  $p$ ,  $p'$  og  $q$  kalkuleres.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h_0} \quad (2.2)$$

$$A_s = \frac{A_a}{1 - \varepsilon} \quad (2.3)$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{A_s} + \sigma_3 \quad (2.4)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (2.5)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (2.6)$$

$$p = (\sigma_1 + 2 * \sigma_3) / 3 \quad (2.7)$$

$$p' = (\sigma'_1 + 2 * \sigma'_3) / 3 \quad (2.8)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.9)$$

Hvor:

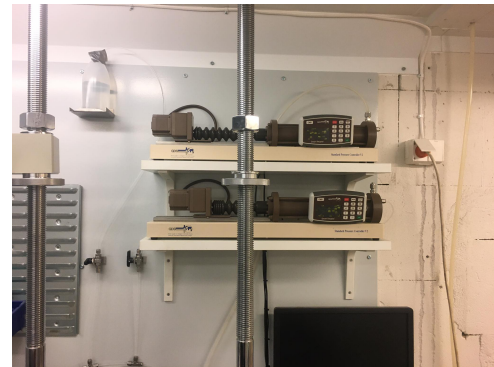
$\varepsilon$	Aksiell tøyning
$h_0$	Opprinnelig høyde på prøvestykket
$A_s$	Tverrsnittsareal under skjærforsøket
$\sigma_1$	Total aksialspenning
$\sigma'_1$	Effektiv aksialspenning
$\sigma'_3$	Effektiv radiellspenning
$p$	Middelspenning av totalspennings tilstanden
$p'$	Middelspenning av effektivspennings tilstanden
$q$	Deviatorspenningen

Programvaren som benyttes under treaksialforsøkene i denne oppgaven registrerer og kalkulerer de nevnte parametrene automatisk.

### 2.3.2 Utstyr



(a)



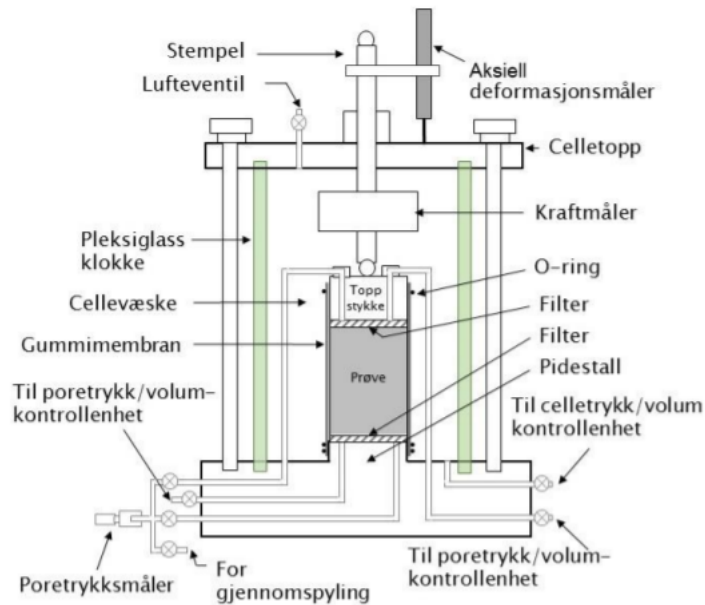
(b)

Figur 2.4: Et av treaksialapparatene som ble benyttet under forsøkene. Apparatet er produsert av GDS i likhet med alle apparatene benyttet i denne oppgaven. På bildet til venstre kan selve lastmotoren med pidestall, filtre og O-ringer, treaksialcellen, deformasjonsmåleren og mye av slangene tilknyttet poretrykksystemet ses. På bildet til høyre kan høydebassenget, celletrykk- og poretrykkpumper ses. Dette apparatet hadde et problem i poretrykksystemet og ble tatt ut av bruk i denne oppgaven.

Treksial forsøkene utføres ved bruk av avansert treksial utstyr med mulighet for å automatisere forsøkene. Forsøkene i denne oppgaven vil ikke kjøres automatisk da operatøren ikke har erfaring med dette.

Utstyret, som vist på figur 2.4a og figur 2.4b, består av en pidestall og et toppstykke, pore- og celletrykksledninger, poretrykksmåler, porøse steinfilter, papirfilter til topp og side (ikke vist på bildene), O-ringer, membran (ikke vist på bildene), deformasjonsmåler, klokke med lastcelle og holder for deformasjonsmåleren, treksial ramme, poretrykkpumpe, celletrykkpumpe og et høydebasseng. Utstyret styres ved bruk av PCen som kan ses på figur 2.4a.

Figur 2.5 gir et mer oversiktlig bilde av de ulike komponentene som inngår i et treksial apparat.



Figur 2.5: Prinsskisse som viser de ulike komponentene i et treaksialapparat for en ferdig innbygd prøve. Figuren er hentet fra Statens Vegvesen R210 s.223. [12]

Membranen brukes for å skille pore- og celletrykk system. For at forsøket skal tilfredsstillende NS-EN ISO 17892-9 [13], skal membranene ligge neddykket i vann 24 timer før forsøket utføres. Den må inspiseres for å sikre at den er hel og ikke har noen hull eller andre feil som kan påvirke prøveresultatene. For å minske risikoen for at vann strømmer på tvers av pore- og celletrykkssystem påføres et tynt lag med fett langs de vertikale sidene av pidestallen og toppstykket som membranene klemmes mot. Dette bedrer tetningen O-ringene skaper ved å klemme membranene mot pidestall og toppstykket.

Membranene produseres ofte med en diameter på 90-95% av diameteren til prøvestykket som beskrevet av La Rochelle et.al [14]. Dette medfører et radielt trykk på prøvestykket i tillegg til påsetting av radiell spenning gjennom celletrykk. Denne tilleggsspenningen korrigeres det for automatisk i treaksial apparatet og vil ikke diskuteres videre.

I følge NS-EN ISO 17892-9 [13] skal filtersteinene ha lik diameter som prøvestykket før testen er startet. For å sikre at den påførte aksielle kraften går med til å skjære prøvestykket, skal filtersteinene tåle mer i kompresjon og være betydelig stivere enn hva prøvestykket er. Før testen må filterene renses grundig i et ultralydbad for å sikre at de er rene og ikke tilstoppet av gamle prøverester for så å kokes i destillert vann slik at filterene er 100% vannmettet.

Filterpapir brukes i endene samt langs siden. Filterpapir i endene har som mål å skille filtersteinene fra prøvestykket og dermed unngå inntrenging av leire i filtersteinene. Filterpapir langs siden har som mål å redusere nødvendig konsolideringstid ved å korte ned drenasjeveien for porevannet. Ved lav  $s_u$  vil papiret langs siden av prøvestykket tilføre en viss stivhet til prøvestykket [13]. Dette håndteres i likhet med membranspenningen, av programvaren for treaksialapparatet og diskuteres ikke videre.

Pumpene vist på figur 2.4b, styrer celle- og poretrykket under forsøk. Pumpene måler også volumet av vann som pumpes inn og ut av celle- og poretrykk systemene. For å unngå at luft ødelegger poretrykkmålingene brukes luftfritt vann i poretrykkspumpa. I celletrykkspumpa kan rent springvann benyttes.

Rammen som pidestallen står på, se figur 2.4a, inneholder en last motor som presser prøvestykket opp mot lastcella, se figur 2.5. Lastmotoren styres ved en rate gitt i mm/min som prøvestykket skal presses mot lastcellen med. Aksiell deformasjon måles med en deformasjonsmåler montert over treaksial cellen. Den påførte lasten måles i lastcellen.

### **2.3.3 Rekkefølge**

De fleste udrenert treaksialforsøk består av de følgende 5 trinnene:

1. Tilpassing og innbygging av prøvestykket.
2. Konsolidering
3. Metning av poretrykkssystemet
4. B-test
5. Skjærforsøk

Rekkefølgen på konsolidering, metning og B-test kan variere noe. Se [6], [12], [15] for ulike prosedyrer rundt dette.

For denne oppgaven varieres størrelsen av baktrykket og rekkefølgen på konsoliderings- og metningsfasen. Variasjonen ble utført for å studere effekten av de ulike prosedyrene med ulike baktrykk på graden av oppnådd metning i forsøkene.

#### **Innbygging**

Innbyggingen starter med at prøvestykket kuttet til ønsket størrelse. Prøvestykket kan ikke kuttet til en mindre diameter enn 34mm med en høyde mellom 1,8 - 2,5 ganger diameteren på prøvestykket for at testforsøket skal følge NS-EN ISO 17892-9, [13]. Vanligst er det å utføre tester på prøvestykker med 54mm i diameter og en høyde på 100mm. Dette er målene som ble fulgt for forsøkene i denne oppgaven. Det er viktig å utføre en visuell sjekk for å kontrollere om prøven har noen skader eller store korn som kan forstyrre prøveresultatene [13]. Prøvene veies for å få kontroll på den våte prøvevekten. Papirfiltre vannmettes og påføres prøven langs siden og i toppen. Prøvestykket omsluttet av en membran før den bygges helt inn i cellen.

Lufteventilene på toppen av treaksialcellen åpnes og cellen fylles med vann til det står halvveis opp på det innebygde prøvestykket. Dette nivået brukes som referansepunkt for trykkmalere. Celletrykk, poretrykk og baktrykk settes til null. Treaksial cellen fylles full med vann, celletrykkspumpa kobles inn på cellen og lufteventilene stenges. Det påføres et lite celletrykk på 5-10 kPa i henhold til Statens Vegvesen R210 [12]. Dette skal hindre vann i å samle seg mellom membranen og prøvestykket. Det spyles så gjennom poretrykkssystemet med luftfritt vann fra et høydebasseng. Se figur 2.4b. Spylingen skal fjerne eventuelle luftbobler som kan fanges i koblinger,

slanger, filtre, mellom prøvestykket og membranen og som kan ha blitt sugd opp av prøvestykket som følge av svelling.

### Konsolidering

Konsolideringsfasen skal sette prøven tilbake til in-situ spenningsforhold. Ønsket effektiv vertikalspenning under konsolideringsfasen bestemmes ut ifra dybden prøven er tatt fra, enhetsvekten til materialet over og poretrykket i dybden der prøven er hentet. For denne oppgaven brukes enhetsvektene funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Det kalkuleres med enhetsvekt på  $18 \text{ kN/m}^3$  fra bakkenivå ned til 3 meters dybde.  $17,5 \text{ kN/m}^3$  fra 3 til 4 meters dybde. Fra 4 meter ned til 7,5 meter brukes  $17 \text{ kN/m}^3$ . Grunnvannstanden i området settes til 1,7 meter for beregningene etter figur 1.5. Det regnes med et hydrostatisk poretrykk, noe som ikke stemmer helt med piezometer målingene utført i [2]. Med tilnærmet hydrostatisk poretrykk ned til 5 meters dybde blir feilen i poretrykk omtrent 6 kPa ved 6 meters dybde.

Konsolideringsfasen kan utføres enten isotropt eller anisotropt. Forskjellen ligger i hvorvidt  $\sigma_1 = \sigma_3$  eller  $\sigma_1 \neq \sigma_3$ . Anisotrop konsolidering oppnår mer realistiske initialspenninger i prøvestykket enn hva isotrop konsolidering gjør, men litt forsiktighet må utøves i valget av  $K_0$ . Dersom  $K_0$  velges for lav kan de opprinnelige skjærspenningene i prøven overskrides og prøvestykket gå til brudd i konsolideringsfasen. For å unngå dette kan isotrop konsolidering benyttes. Her induseres ingen skjærspenninger på prøven og det er derfor mer skånsomt. Ved anisotrop konsolidering kan  $\sigma'_3$  skrives som:

$$\sigma'_3 = K_0 \times \sigma'_1 \quad (2.10)$$

$$K_0 = 0,53 \times OCR^{0,47} \quad (2.11)$$

Her er  $K_0$  hviletrykkskoeffisienten. L'Heureux et.al [16] fant i 2017 ut at uttrykket i likning 2.11 beskriver  $K_0$  godt for norske leirer. På grunn av høy OCR og  $K_0$  såvidt over 1 for Tiller-Flotten leira, velges det i denne oppgaven å konsolidere forsøkene isotropt med korrekt effektiv middelspenning. Den effektive middelspenningen regnes ut ved å benytte likning 2.8 hvor  $\sigma'_3$  uttrykkes med likning 2.10.

NS-EN 17892-9 [13] angir ingen tid for spenningsøkning under konsolideringsfasen. Olga Lepkovski [17] konkluderte i sin hovedoppgave i 2019 med at hastigheten konsolideringsspenningene settes på med har liten effekt for leirer hvor  $K_0$  er mellom 0,65 og 0,8. Forsøk på sensitive og kvikke blokkprøver viste en viss tendens mot at rask påføring av konsolideringsspenningene forringet prøven noe, men likevel minimalt. Konsolideringsspenningene i denne oppgaven settes på med en hastighet på 0,2 kPa/min. Det velges en lav hastighet for påføring av konsolideringsspenningene for å forindre en eventuell forringelse av prøvematerialet til tross for en allerede lav risiko. Hastigheten er valgt med utgangspunkt i hastighetene angitt for isotrope konsolideringer i Statens Vegvesen R210 [12].

Prøven har blitt trykkpåkjent av de overliggende jordmassene i opptil flere tusen år før den hentes opp av bakken. Som beskrevet av Poirier et.al i 2005 [18] vil prøven oppleve en totalspenningsavlastning under ekstraksjon fra grunnen. Avlastningen medfører en elastisk ekspansjon av leira og dermed skapes et undertrykk i porevannet. Dette undertrykket vil motvirke kreftene fra den elastiske ekspansjonen og danne en kraftlikevekt slik at den effektive spenningstilstanden i prøven opprettholdes. Under konsolideringsfasen belastes prøven tilbake til sin in-situ spenningstilstand. Konsolideringsspenningene vil i teorien ikke påføre en endring i de effektive spenningene i prøven og dermed ikke utsette prøven for en kompresjon. Teoretisk sett vil det derfor ikke presses ut porevann av en uforstyrret prøve. Når vann likevel presses ut, er dette et tegn på at prøven har blitt forstyrret. Denne utpressingen av porevann har vist seg å være størst i starten for så å avta med tiden. Derfor velges et stoppkriterium for konsolideringen med en volumendring per tidsenhet. Når volumendringen tilfredsstillende dette stoppkriteriet vil konsolideringsfasen kunne avsluttes. På grunn av mangelfull erfaring med automatisert utførelse av treaksialforsøk utføres forsøkene manuelt i denne oppgaven. Konsolideringen startes derfor på ettermiddagen og anses som avsluttet etter 20 timer i henhold til Statens Vegvesen R210 [12]. Stoppkriterium basert på volumendring per tidsenhet vil derfor ikke benyttes i denne oppgaven.

### **Metning**

Metningen av systemet utføres ved å sette på et baktrykk i prøven. Dette er et trykk som påføres parallelt i celle- og poretrykkssystem og endrer derfor ikke effektivspenningstilstanden i prøven. Baktrykket har som mål å skape et indre trykk i poretrykkssystemet som komprimerer og løser opp eventuell luft som fortsatt skulle finnes seg der til tross for spylingen utført tidligere. Effekten baktrykket har for fjerning av eventuell luft i systemet påvirkes av både temperaturen som forsøkene utføres på, spenningsnivået som settes på og tilstedeværelse av allerede oppløst gass i vannet som benyttes. Disse faktorene, og flere, er diskutert nøyere i kapittel 2.5 og 2.6. Dersom baktrykket ikke lykkes i å komprimere og løse opp den frie luften i poretrykkssystemet vil dette gi en feilaktig poretrykkmåling under skjærforsøket da noe av middelspennings endringen på prøvestykket vil tas opp som en økning i effektivspenning på prøvestykket og derfor ikke fullt ut som en poretrykkøkning. Det er derfor svært viktig med en god effekt av baktrykket for å sikre gode og pålitelige forsøksresultater.

Ved komprimering av luft vil det opprinnelige volumet okkupert av luften fylles med vann. Dersom trykket påføres med en høy hastighet vil ikke vannet i poretrykkssystemet, på grunn av leiras lave permeabilitet, få tid til å fylle rommene etter luftboblene og prøven vil utsettes for en kompresjon. NS-EN ISO 17892-9 [13] angir ingen krav for hastigheten av baktrykkøkningen. Hastigheten for påføring av baktrykk og celletrykk settes her til 5 kPa per minutt. Hastigheten er basert på anbefalinger mellom 2-10 kPa per minutt, angitt i Statens Vegvesen R210 [12], og valgt til 5 kPa for å sikre at prøven ikke komprimeres i denne fasen.

Poretrykkssystemet er i kontakt med prøvestykket kun i endene gjennom pidestall og toppstykket, se figur 2.5. For å sikre at baktrykket virker jevnt over prøven bør prøvestykket få hvile med påsatt baktrykk slik at dette trykket får fordelt seg jevnt over høyden av prøven. For forsøkene i denne oppgaven hviler prøven 30 minutter mellom påsatt baktrykk og start av B-testen i henhold til [12]. Der forsøkene ble kjørt med endret rekkefølge på prosedyrene, ble det ikke benyttet en 30 minutters hvileperiode før B-testen da forsøkene sto over natten med en konstant spenningssituasjon etter konsolideringsspenningene var påført.



Utføring av metningsfase må vurderes ut ifra in-situ metningsforhold som beskrevet av Sandven et.al [6]. Der som prøvestykket ikke var vannmettet før ekstraksjon vil det være feil å utføre forsøket fullt mettet. Der prøvene in-situ befinner seg under grunnvannstand anses det som rimelig å anta en 100% metningsgrad.

### **B-test**

B-testen er en måte å kontrollere om poretrykksystemet (prøven, filtre, slanger, koblinger med mer) er fullt mettet. Dette gjøres ved at det settes på et økt isotropt celletrykk, mens baktrykket holdes konstant. Deretter foretas poretrykkmålinger og B-verdien kalkuleres ut i fra følgende formel angitt i NS-EN ISO 17892-9 [13].

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (2.12)$$

Hvor

- $B$  Poretrykkparameter
- $\Delta u$  Poretrykkendring
- $\Delta \sigma$  Spenningsendring

Testen finner ut hvor stor del av den påsatte totalspenningen som tas opp av poretrykket i prøven og forteller dermed hvor godt vannmettet prøven er. Ideelt sett for en udrenert test skulle verdien vært lik 1 slik at hele den isotrope spenningsendringen tas opp som et poretrykk. Både porevannets og leirmaterialets porøsitet og kompressibilitet knytter B-verdien og graden av vannmetning sammen. Vann har ikke uendelig stivhet, slik det ofte er antatt i geoteknikken, og vil komprimeres noe ved belastning, som igjen overfører litt belastning på kornskjelettet. Dermed vil aldri en B-verdi på 1 kunne opptre. I følge [13] kreves en B-verdi på 0,95 for å si at prøvestykket er godt nok mettet. For forsøkene i denne oppgaven er det valgt en spenningsøkning på 20 kPa. Verdien er valgt lavt innenfor spekteret på 10-100 kPa anbefalt i Statens Vegvesen R210 [12] slik at et stort sjokk på prøven unngås idet spenningene økes. Et sjokk som følge av en høy spenningsøkning vil kunne forstyrre prøven.

I følge NS-EN ISO 17892-9 [13] må B-verdien nås innen 10 minutter etter starten av B-testen. Statens Vegvesen R210 [12] angir også den maksimale lengden for B-testen til å være 10 minutter, men foreslår å avslutte B-testen etter 2 minutter. B-testen påfører som nevnt prøven en tilleggsspenning. Dersom denne spenningen får virke over for lang tid kan dette, i likhet med en for stor spenningsøkning som nevnt over, forstyrre og deformere prøven. Dette gjelder spesielt der prøven ikke er 100% vannmettet. For å minimere prøveforstyrrelsen, men likevel få nødvendig data for oppgaven, vil forsøkene avsluttes så snart en stabil B-verdi er oppnådd, men senest etter 10 minutter. Ved sammenligning av B-verdier vil den oppnådde verdien etter 1 minutt brukes da en udrenert, fullt mettet prøve i teorien skal få en rask poretrykkøkning ved belastning.

Etter B-testen senkes spenningene med en hastighet på 5 kPa per minutt tilbake til spenningstilstanden før B-testen. For å sikre en jevn spenningsfordeling over hele prøvestykket får prøven hvile 1 time før skjærforsøket utføres i henhold til [12]. Om skjærforsøket startes direkte etter B-testen vil det målte poretrykket ikke stem-

me med det faktiske poretrykket. Denne effekten er tilsvarende effekten diskutert i det andre avsnittet under skjærtest i dette kapitlet, og de to effektene vil forsterke hverandre.

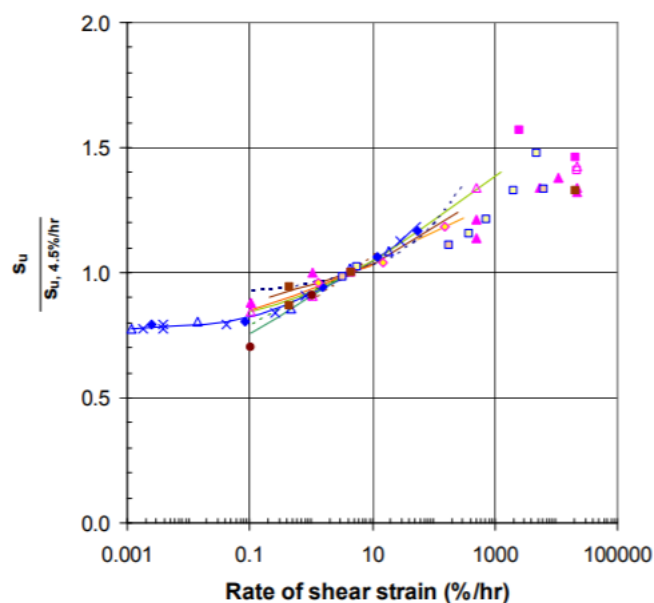
### Skjærtest

Skjærforsøket utføres, i et aktivt treaksial forsøk, ved at prøven komprimeres vertikalt med en konstant deformasjonsrate, målt i mm/min. Deviator spenningen økes som en følge av dette helt fram til brudd og leiras kapasitet for skjærspenning,  $\tau$ , kan kalkuleres. Skjærstyrken til leira velges i denne oppgaven som den høyeste målte verdien av  $\tau$  for hvert forsøk.

$$\tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (2.13)$$

Andersen et.al [19] fant i 2008 en sammenheng mellom den oppnådde skjærstyrken til marin leire og deformasjonshastigheten som ble benyttet under skjær. Studien viste en økning i oppnådd skjærstyrke med økende deformasjonshastighet og, se figur 2.6. Som beskrevet av Sandven et.al [6] vil en rask deformasjon av prøven skape en ujevn poretrykkoppbygning over høyden med det største poretrykket midt i prøven. Med poretrykkmåling kun i pidestallen, vil det målte poretrykket være et underestimat av det faktiske poretrykket i prøven. De kalkulerte effektivspenningene, se likning 2.5 og 2.6, vil derfor bli overestimert noe som igjen medfører en misledende spenningssti under forsøket ved plotting i p'-q og NTNU plott.

I denne oppgaven utføres skjærforsøket med en deformasjonshastighet på 0,033mm per minutt. Dette tilsvarer en tøyningshastighet på 2% per time som angitt for aktive treaksialforøk i Statens Vegvesen R210 [12]. Skjærforsøket kjøres til minst 10% aksial tøyning i henhold til [12].



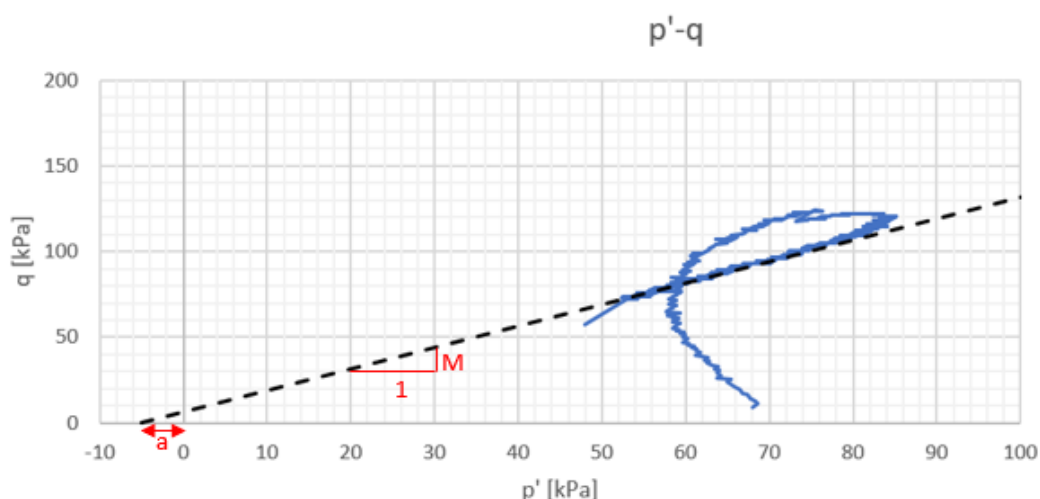
Figur 2.6: Effekten av tøyningshastighet per time på oppnådd skjærstyrke i leire. Presentasjonen er gjort ved logaritmen til hastigheten av skjærtøyningene plottet mot den oppnådde skjærstyrken normalisert med skjærstyrken ved en tøyningshastighet på 4,5% per time. Figuren er hentet fra Andersen et.al 2008 [19].

Etter avsluttet skjærforsøk bygges cellen ned og prøven avbildes og plasseres i en skål med kjent vekt. Membran, filtersteiner og papirfilter spyles grundig over skålen for å få med så mye av leiren som mulig for å sikre korrekt tørr vekt. Skålen plasseres i en varmeovn som holder 105 °C og står der minst 24 timer, frem til prøven har tørket. Skålen med den tørkede prøven avkjøles før den veies og tyngden noteres.

Resultatene fra skjærforsøkene presenteres normalt i  $p'$ - $q$ ,  $\epsilon$ - $q$ , MIT eller NTNU plott. I denne oppgaven vil  $p'$ - $q$ ,  $\epsilon$ - $q$  og NTNU plott benyttes. Ved å presentere resultatene på denne måten kan både de udrenerte og drenerte styrkeparametrene finnes. Den udrenerte skjærstyrken,  $s_u$ , kan leses av som den høyeste opptredende skjærspenningen, mens de drenerte styrkeparametrene kan finnes ved bruk av en tangent som vist for et  $p'$ - $q$  plot i figur 2.7. Attraksjonen i leira kan finnes ved det negative avviket fra y-aksen. For  $p'$ - $q$  plottet beskrives helningen til tolkningslinjen av  $M$ , mens for NTNU plottet beskrives helningen til tolkningslinjen av  $S$ . Friksjonsvinklene finnes henholdsvis ved likning 2.14 og 2.15 for  $p'$ - $q$  og NTNU plottene og representerer en stabil tilstand etter brudd hvor store deformasjoner opptrer. Normale verdier av attraksjon og friksjon for ulike fastheter i norske leirer er vist i tabell 2.2. Fastheten for norske leirer bestemmes ut ifra den den udrenerte skjærstyrken til materialet i henhold til Statens Vegvesen V220 [20]. Ettersom grunnforholdene i Norge varierer fra sted til sted, kan ikke verdiene i tabell 2.2 forventes å være kompatible med Tiller-Flotten området. Tabellen er derfor kun vist for å illustrere endringene i attraksjon og friksjon ved endringer i leirens fasthet.

Leirens fasthet	$s_u$ [kPa]	Attraksjon [kPa]	$\tan \phi$
Bløt	<25	5-10	0,35-0,45
Middels fast	25-50	10-20	0,4-0,55
Fast	>50	20-50	0,5-0,6

Tabell 2.2: Normale verdier for styrkeparametrene attraksjon og friksjon basert på leirens stivhet for norske leirer. Stivheten er definert av den udrenerte skjærstyrken til materialet. Tallene er hentet fra s.267 i kompendiet for faget Geotechnics Field and Laboratory Investigations ved NTNU [6] og side 2-10 i Statens Vegvesen V220 [20].



Figur 2.7: Eksempel på tolkning av drenerte styrkeparametre i  $p'$ - $q$  plott for forsøk 9. Attraksjonen finnes som tolkningslinjens negative avvik fra y-aksen. Helningen på tolkningslinjen i  $p'$ - $q$  plott er definert som  $M$  og kan benyttes til å finne friksjonsvinkelen gjennom likning 2.14.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{3M}{M+6}\right) \quad (2.14)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{S}{1+S}\right) \quad (2.15)$$

Som beskrevet av Nordal [21] vil helningen på spenningsstien i p'-q og NTNU plottene indikerer oppførselen innad i kornstrukturen. En komplett elastisk prøve vil, under udrenerte forhold, ikke oppleve en volumendring. Ved å bruke Hookes lov kan man uttrykke volumtøyningen ved middelspenningsendringen på bulkmodulen til leira. Volumendring lik null vil derfor resultere i likning 2.16.

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta p'}{K} = 0 \Rightarrow \Delta p' = 0 \quad (2.16)$$

I praksis stemmer dette ofte dårlig og vi får en spenningssti hvor  $\Delta p' \neq 0$  [21]. Dette håndteres ved å introdusere et nytt stivhetsledd, deviatorspenning over dilatansmodul, i likningen for volumtøyningen.

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta p'}{K} + \frac{\Delta q}{H} = 0 \quad (2.17)$$

Ved å skrive om likning 2.17, introdusere Janbus dilatans parameter  $D = -K/H$  og benytte sammenhengen  $\Delta p' = \Delta p - \Delta u$  får man Janbus poretrykk likning.

$$\Delta u = \Delta p - D\Delta q \quad (2.18)$$

Verdien av D indikerer helningen til spenningsstien i forhold til en elastisk oppførsel hvor  $D = 0$ . En elastisk oppførsel innebærer at kornstrukturen ikke endres ved belastning.  $D > 0$  indikerer at kornene klatrer over hverandre og dermed skaper en volumøkning under skjær. Dette betegnes som en dilatant oppførsel.  $D < 0$  betyr at kornstrukturen komprimeres ytterligere under skjær og dermed skaper en volumreduksjon. En jord som utviser denne egenskapen kalles kontraktant.

Ved en elastisk oppførsel med  $D = 0$  gir likning 2.18  $\Delta u = \Delta p \Leftrightarrow \Delta u - \Delta p = 0$ . Dette tilsvarer  $\Delta p' = 0$  og en vertikal spenningssti ved bruk av p'-q plottet. Av den enkle grunn at den elastiske oppførselen tilsvarer en vertikal spenningssti i p'-q plottet, vil dilatansen til forsøkene, ved behov, vurderes i p'-q plottet.

Erfaringer viser at bløte leirer pleier å vise tendenser til å kontraktere, mens stivere leirer heller utviser dilatans under skjærbelastning.

### 2.3.4 Prøveforstyrrelse

For å kunne vurdere forsøkernes relevans og brukbarhet er det viktig å ha et verktøy for å kunne vurdere kvaliteten av de forsøkene som er utført. Som nevnt i kapittel 2.3.3 vil prøvene oppleve en avlastning under ekstraksjon og en påfølgende elastisk ekspansjon som skaper et undertrykk i prøvens porevann. Dette undertrykket opprettholder prøvens effektivspenninger. En uforstyrret prøve vil i teorien ikke oppleve en endring i volumet av porer, volumet av porevann eller i kornstrukturen. Konsolidering tilbake til in-situ spenninger vil derfor ikke påføre prøven en effektivspenning, men kun sette prøvens poretrykk tilbake til in-situ verdi. Uten en endring i de effektive spenningene utsettes ikke prøven for en kompresjon og med et uendret volum av porer, porevann og uendret kornstruktur vil teoretisk sett ikke porevann presses ut av prøven. Dette blir det ideelle målet for en uforstyrret prøve under konsolidering og et naturlig mål på graden av forstyrrelse i en prøve blir derfor volumendringen av prøven. Ved å anta at kornskjelettet er inkompressibelt vil volumendringen av prøven være lik volumet av utpresset porevann. Volumtøyningen kan beregnes ut ifra likning 2.19 [6].

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2.19)$$

Her er

- $\varepsilon_{vol}$  Volumtøyning
- $\Delta V$  Utpresset porevann
- $V_0$  Opprinnelig prøvevolum

Forsøk utført av Lunne et.al i 1997 [11] konkluderer med at endringen i poretall er en bedre indikasjon på prøveforstyrrelse enn volumtøyningen. Dette skyldes at en gitt endring i porevolumet vil skade jordprøven og medføre en endring i kornskjelettet. Skaden eller endringen i kornskjelettet vil øke med et synkende opprinnelig porevolum. Denne skaden på kornskjelettet tas det ikke hensyn til ved bruk av volumtøyningen. Poretallsforholdet kan finnes ved å ta utgangspunkt i likning 2.20 som foreslått av Lunne et.al 1998 [22].

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\Delta V}{V_0} \frac{1 + e_0}{e_0} \quad (2.20)$$

Hvor

- $\Delta e$  Poretallsendring
- $e_0$  Opprinnelig poretall

$e_0$  på høyre side av likningen kan uttrykkes som følger.

$$e_0 = \frac{w\rho_s}{\rho_w S_r} \quad (2.21)$$

Hvor

$w$	Vanninnhold
$\rho_s$	Jordas partikkeldensitet
$\rho_w$	Vannets densitet
$S_r$	Grad av vannmetning

Dersom prøven er fullstendig vannmettet,  $S_r = 1$ , kan likning 2.21 skrives om til likning 2.22.

$$e_0 = \frac{w\rho_s}{\rho_w} \quad (2.22)$$

Ved å sette dette inn i likning 2.20 får man likning 2.23.

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\Delta V}{V_0} \frac{\rho_w + w\rho_s}{w\rho_s} \quad (2.23)$$

I denne oppgaven vil volumtøyningen og endringen i poretall benyttes til å vurdere graden av prøveforstyrrelse. For å beregne endringen i poretall kreves partikkeldensiteten til leira. Partikkeldensiteten funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2] holder seg mellom 2,83 - 2,88  $g/cm^3$  med et avvik i omtrent 6,8 m dybde hvor  $\rho_s$  ble funnet til omtrent 2,79  $g/cm^3$ . Prøvene i denne oppgaven er hentet fra 5,65-6,35 m dybde. Partikkeldensiteten i [2] ble funnet til 2,86  $g/cm^3$  rett over 5,65 meters dybde, mens avviket på 2,79  $g/cm^3$  er funnet i omtrent 6,85 meters dybde. Partikkeldensiteten ble beregnet for ødometerforsøkene utført i denne oppgaven, se tabell 3.9. Dette ble gjort da volumet til et ødometerforsøk er kjent med stor nøyaktighet slik at leiren benyttet i denne oppgaven kan sammenlignes med partikkeldensiteten funnet i [2]. Partikkeldensiteten ble funnet til 2,88  $g/cm^3$  for ødometerforsøk 1, 2,97  $g/cm^3$  for ødometerforsøk 2 og 2,87  $g/cm^3$  for ødometerforsøk 3. Dette samsvarer godt med densitetene funnet i [2], men da det er usikkert om alt materialet har blitt samlet opp fra apparat, filtre og liknende etter et ødometerforsøk besluttet det å benytte den gjennomsnittlige densiteten i [2] som ligger på 2,85  $g/cm^3$ .

Kriteriene for de forskjellige gradene av prøve kvalitet er gjengitt i tabell 2.3 og tabell 2.4 for henholdsvis volumtøyning og poretalls forhold.

Utpresset porevann [ $cm^3$ ]	Klassifisering
0 - 5	Godt forsøk
5 - 10	Akseptabelt forsøk
> 10	Dårlig forsøk

Tabell 2.3: Kriterier for vurdering av prøve kvalitet basert på volum utpresset porevann. Verdiene er hentet fra s.2-18 i Statens Vegvesen V220 [20].

OCR	$\Delta e / e_0$			
	Veldig god til utmerket	God til brukbar	Dårlig	Veldig dårlig
1-2	<0,04	0,04-0,07	0,07-0,14	>0,14
2-4	<0,03	0,03-0,05	0,05-0,1	>0,1
4-6	<0,02	0,02-0,035	0,035-0,07	>0,07

Tabell 2.4: Kriterier for vurdering av prøve kvalitet basert på endring i poretall med utgangspunkt i OCR for leira. Verdiene er hentet fra NGF melding 11 s.29 [8].

NGF melding 11 [8] angir, i tillegg til volumendring og poretalls forhold, spenningsstiene, spennings-tøynings forløpet og styrkeparametrene forsøket gir som gode indikasjoner på prøvens tilstand.

Både volumtøyningen og poretallsforholdet finnes ved utførelse av treaksialforsøk. Dette medfører at graden av prøveforstyrrelse ikke blir kjent før prøven allerede har gjennomgått en kostbar og tidkrevende prosess i laboratoriet. Dersom resultatet viser en utilstrekkelig prøve kvalitet vil forsøkene ikke kunne benyttes og hele prøven må trolig ses på som forstyrret. For å kunne finne prøve kvaliteten på et tidligere tidspunkt, og uten å utsette prøven for potensielle forstyrrelser, har det blitt gjort forsøk på andre metoder for å bestemme prøve kvaliteten.

Blant andre Landon et.al 2007 [23] foreslo å benytte bærbare bender element for å måle hastigheten på skjærbølgene rett etter ekstraksjon og i laboratoriet før de avanserte forsøkene utføres. Metoden bygger på resultatene til blant andre Okomura 1991 [24] og Jamiolkowski et.al 1995 [25] som viste at hastigheten på skjærbølgene er avhengig av poretallet, strukturen og den effektive spennings tilstanden til leira. Dermed vil en endring i hastigheten til skjærbølgene indikere en endring i enten strukturen, poretallet eller den effektive spenningstilstanden hvilket er tegn på at prøven er delvis forstyrret.

I flere artikler, blant annet av Tanaka et.al 1996 [26], blir det foreslått å benytte målt undertrykk i porevannet normalisert med hensyn på vertikal effektivspenning som en indikator for prøve kvaliteten. Som beskrevet av Poirier et.al i 2005 [18] vil prøven ved ekstraksjon fra grunnen påvirkes både mekanisk og ved en totalspennings avlastning. Avlastningen vil, som beskrevet i kapittel 2.3.3, medføre et undertrykk i porevannet som opprettholder de effektive spenningene i prøven. Dette undertrykket påvirkes blant annet av in-situ spenningstilstand, størrelsen og fordelingen av porer, ekstraksjonen av prøvelegemet og hvordan prøven behandles i laboratoriet. Ved målte endringer i poreundertrykket etter ekstraksjon vil dette indikere en forstyrrelse av prøven. Donohue og Long 2009 [27] målte undertrykket direkte etter ekstraksjon og før forsøk i laboratoriet og kunne konkludere med at prøver tatt opp og lagret over et par måneder ikke viste tegn til økt prøveforstyrrelse som følge av tid.

Prøve kvaliteten vil ikke vurderes med hensyn på skjærbølgehastigheter eller målt undertrykk i porevannet for prøvene i denne oppgaven.

## 2.4 Ødometerforsøk

Ødometerforsøk er en forsøksmetode som benyttes for å finne jordprøvens deformasjonsegenskaper og pre-konsolideringsspenning. Forsøket går ut på å skape en endimensjonal deformasjonssituasjon ved at en prøve

bygges inn i en stålring som utelukker horisontal deformasjon under kompresjon [12]. Ødometerstivheten blir derfor en forenkling og beskriver kun setninger korrekt der grunnen, for eksempel er belastet av et fundament med stor utstrekning sammenlignet med mektigheten av jordmassene under.

Ødometerforsøk er hovedsaklig delt inn i to ulike grupper.

### 2.4.1 Konstant lastøkning

En metode er å benytte et ødometerforsøk med konstant lastøkning. Her komprimeres prøvestykket med en gradvis lastøkning mens deformasjon, vertikalspenning og poretrykk registreres. Den kontinuerlige lastøkningen gir en mild belastning av prøvestykket og faren for skader på strukturen i kornskjelettet holdes til et minimum. Sandven et.al [6] angir tre ulike typer kontinuerlige ødometerforsøk.

- CRS Konstant tøyingsgrad
- CPR Konstant poretrykks ratio
- CG Konstant gradient

For ødometerforsøkene i denne oppgaven vil CRS metoden benyttes. Under et CRS forsøk bestemmes ønsket deformasjon per tidsenhet. Tøyningen holdes da konstant gjennom forsøket, se likning 2.2.

Som nevnt over registreres vertikal deformasjon, vertikalspenning og poretrykk underveis i forsøket. Ut ifra disse parametrene kan effektiv vertikalspenning, tangent modulen  $M$  og konsoliderings koeffisienten  $C_v$  beregnes. Med åpen drenering i toppen av ødometerapparatet og poretrykksmåler i bunnen, finnes det høyeste poretrykket i bunnen. Statens Vegvesen R210 [12] antar en parabolisk poretrykksfordeling over prøvens høyde hvor prøvens midlede poretrykk kan finnes ved å multiplisere det registrerte poretrykket med 2/3 se likning 2.24.

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3} \times u_b \quad (2.24)$$

$$M \approx \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon} \quad (2.25)$$

$$C_v = \frac{h_i^2}{2u_b} \times \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon} \quad (2.26)$$

Hvor

- $\sigma'_v$  Effektiv vertikalspenning
- $\sigma_v$  Total vertikalspenning
- $u_b$  Poretrykk i bunnen av prøven
- $M$  Tangent modul



$\Delta\sigma'_v$	Endring i vertikal effektivspenning
$\Delta\varepsilon$	Tøyningsendring
$C_v$	Konsoliderings koeffisient
$h_i$	Opprinnelig høyde av prøven

## 2.4.2 Trinnvis lastøkning

Den andre metoden er å benytte trinnvis pålastning, kalt IL. Her lastes det på en ønsket spenning over en kort periode. Prøvestykket blir stående med konstant spenning i en ønsket tidperiode før det hele gjentas med en høyere spenning. Dette gjøres ofte ved å doble spenningen for hvert laststeg i følge Sandven et.al [6]. Den hurtige økningen i spenning mellom laststegene gir sjokklaster på prøvestykket. I de største stegene kan dette medføre skade på prøvestykket i form av en kollaps i kornskjelettet.

Denne metoden benyttes ikke i denne oppgaven.

## 2.4.3 Prosedyrer

### Innbygging

Ødometerprøven kuttes ut av et ca 40mm høyt leireestykke fra midten av blokken med ca 160mm i diameter. Prøven kuttes grovt ned slik at den er litt større enn diameteren på ødometerringen som måler 50mm. Ødometerringen veies og smøres inn med litt silikon utvendig slik at leiren som skjæres bort enkelt kan fjernes. Ødometerringen presses så rolig gjennom prøvestykket inntil leire fyller hele ringen og stikker et par mm over toppen. Den overflødig leiren kuttes forsiktig bort fra midten av ødometerringen og utover ved bruk av en tynn trådsag. Ødometerringen med prøve veies igjen og monteres i ødometeret.

### Kompresjon

Ødometerforsøkene i denne oppgaven ble komprimert med 0,005mm per minutt. Dette er innenfor anbefalingene til Statens Vegvesens R210 [12] på 0,0033-0,0067mm per minutt. Loggingen ble utført hvert 5. sekund for det første ødometeret og hvert 20. sekund for de to neste. Dette er en høyere frekvens på loggingen enn hva anbefalingen på omtrent 240 sekunder i [12] tilsier. Det ble benyttet logging hvert 5. sekund da dette var standard oppsett for det benyttede ødometerapparatet. Etter det første forsøket ble dette ansett å være for ofte, og intervall tiden ble økt til hvert 20. sekund.

## 2.4.4 Prøveforstyrrelse

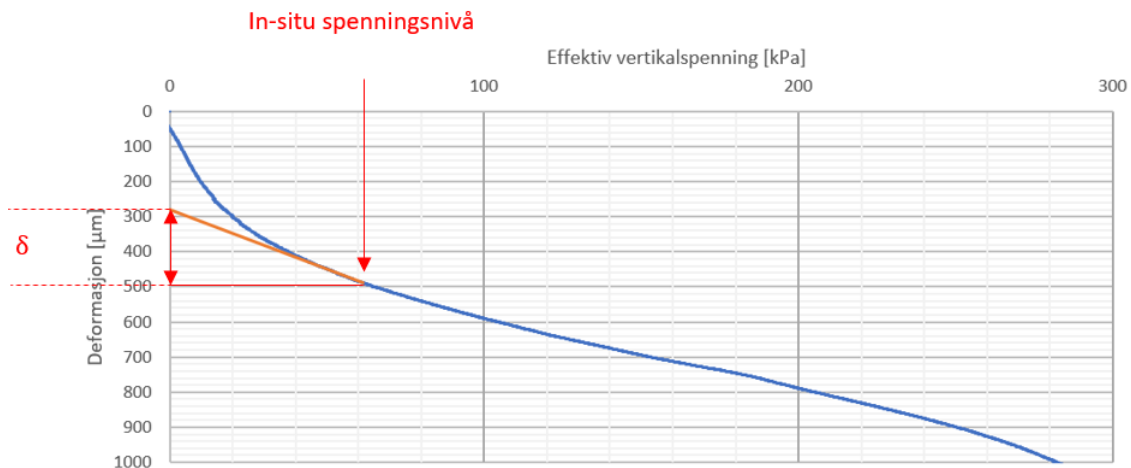
Som for treaksialforsøk vil prøveforstyrrelsen under et ødometerforsøk beskrives av poretallsendringen frem til in-situ spenning som foreslått av Lunne et.al 1997[11]. For ødometerforsøk vil volumtøyningen i likning 2.23 tilsvare den aksielle tøyningen frem til in-situ spenningsnivå da horisontal deformasjon er utelukket. Dette gir følgende formel.

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \varepsilon_a \times \frac{\rho_w + w\rho_s}{w\rho_s} \quad (2.27)$$

NGTS rapport 20160154-20-R [2] beskriver mulige falske deformasjoner i starten av ødometerforsøkene utført på Tiller-Flotten leira. Dette er deformasjoner som ikke gjenspeiler den faktiske deformasjonen av prøvelegemet. Falske deformasjoner kan oppstå dersom apparatet ikke er i tilstrekkelig kontakt ved start av forsøket. Da vil de første målingene av deformasjon ikke representere en deformasjon av leiren, men kun bevegelsen til stampelet frem til en god kontakt med prøven er nådd og de egentlige startbetingelsene for et ødometerforsøk er tilfredsstillt. Falske deformasjoner kan også oppstå dersom innbyggingen og trimmingen av ødometerforsøkene danner et lag med forstyrret materiale langs prøvens ytterkanter. Forstyrret leire har generelt en lav kompressibilitet og store deformasjoner vil oppstå ved små spenninger. Disse falske deformasjonene kamouflerer dermed de faktiske deformasjonene og resulterer i en økt aksial tøyning som igjen gir uttrykk for at prøven er mer forstyrret enn hva den egentlig er.

For å gjenspeile den faktiske deformasjonen foreslo Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] å lage en tangent til spenning-deformasjon kurven i in-situ spenningsnivå og deretter trekke denne til y-aksen som vist i figur 2.8. Deformasjonen fra tangentens krysningspunkt med y-aksen til deformasjonen ved in-situ spenningsnivå benyttes til å beregne aksial tøyning. Metoden er bygd på tilfredsstillelse om en konstant tangent modul opp til in-situ spenningen, se likning 2.25.

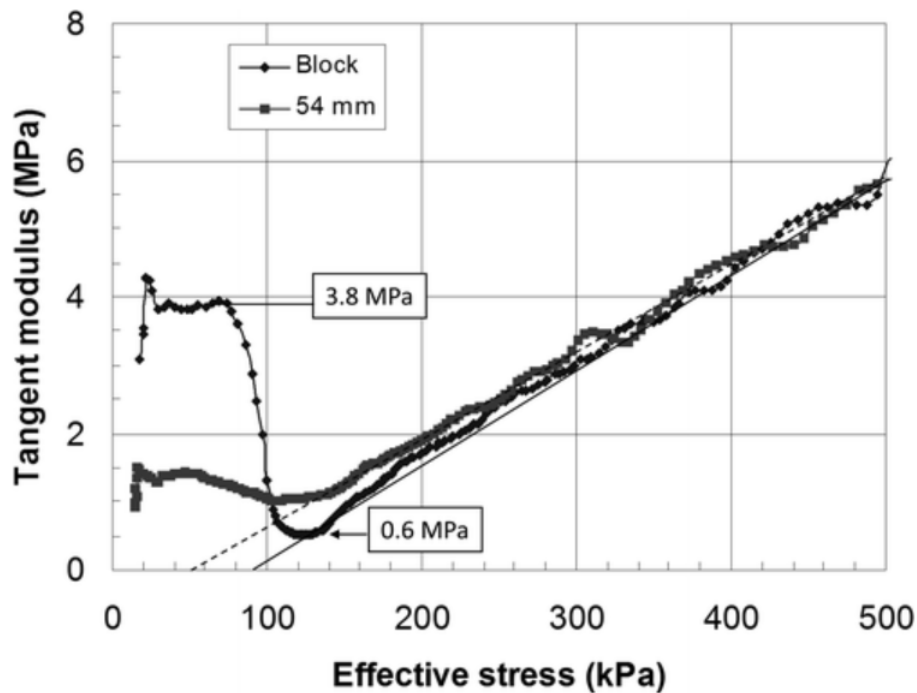
Prøveforstyrrelsen i ødometerforsøkene ble vurdert med begge metodene beskrevet over for å finne aksialtøyningen i likning 2.27. Som ved utregning av poreallsforholdet for treaksial forsøkene, ble den midlede partikkeldensiteten funnet i [2] benyttet.



Figur 2.8: Korreksjon av falsk deformasjon for ødometerforsøk 1 etter forslag fra Berre og Lunne gitt til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Tangenten til kurven i punktet for  $\sigma'_{v0}$  trekkes tilbake til y-aksen. Deformasjonen,  $\delta$ , leses av som differansen mellom deformasjonen målt ved  $\sigma'_{v0}$  og deformasjonen der tangenten krysser y-aksen.

Karlsrud og Hernandez-Martinez [28] foreslo i 2013 å benytte forholdet mellom tangent modulen ved in-situ spenningsnivå og ved prekonsoliderings spenningen for å vurdere prøve kvaliteten. Dette bygger på at ufor-

styrrede prøver har vist seg å gi mye høyere verdi for tangent modulen frem til prekonsoliderings spenningene sammenlignet med forsøk utført på prøver av dårligere kvalitet, se figur 2.9. Forsøk med leire av høyere kvalitet har også vist seg å gi et mer markant fall ved prekonsoliderings spenningene samt en lavere verdi for minste tangent modul sammenlignet med prøver av dårligere kvalitet. Denne metoden er ikke brukt for å finne prøve-kvaliteten i denne oppgaven.

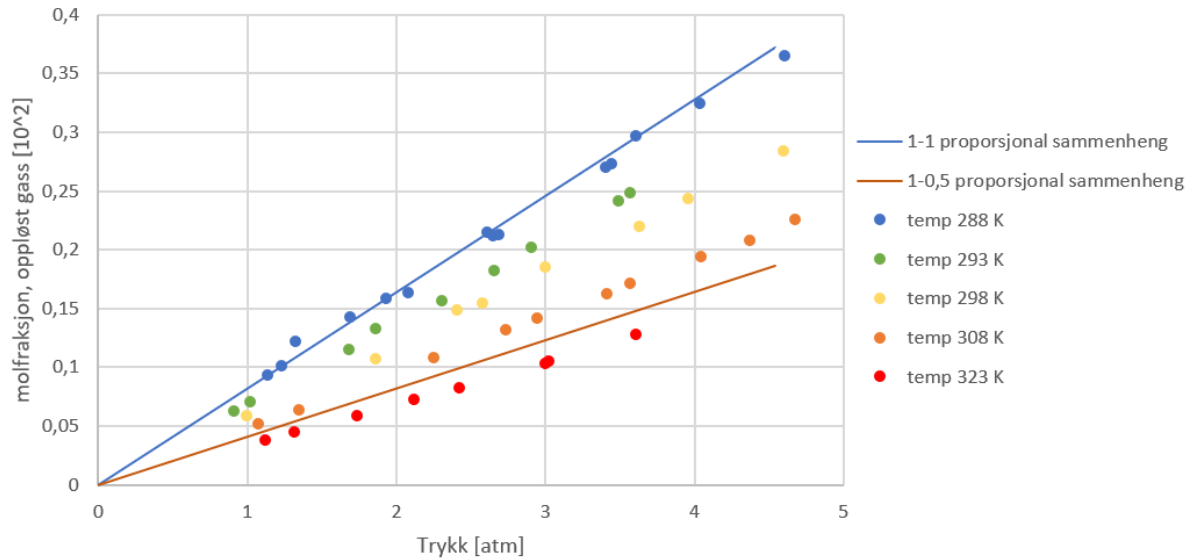


Figur 2.9: Eksempel på bruk av tangentmodulen funnet ved ødometerforsøk til vurdering av prøve-kvalitet. Prøve-kvaliteten finnes her ved forholdet mellom tangentmodul ved  $\sigma'_{v0}$  og tangentmodul ved  $p'_c$ . Som figuren viser er en 54mm sylindertestprøve betydelig mer forstyrret enn en blokktestprøve. Figuren er hentet fra s. 1275 i Karlsrud og Hernandez-Martinez 2013 [28].

## 2.5 Løselighet av gass i vann

William Henry, [29], publiserte i 1803 en artikkel hvor han presenterte sine resultater av forskning på oppløsning av ulike gasser i vann. Han testet ut hvorvidt mengden av gass som oppløses i luftfritt vann påvirkes av de ytre forholdene temperatur og trykk.

William Henry fant ut at dersom gassen komprimeres med 2 atmosfærer, som tilsvarer en ekstra atmosfære, vil volumet av gass som løses i vann tilsvare 2 ganger det volumet som løses under normale forhold ved 1 atmosfære. Tilsvarende vil volumet av gass som løses i vann under kompresjon av 3 atmosfærer tilsvare 3 ganger volumet av gassen som løses i vann ved 1 atmosfære. Forsøkene viste at volumet av gass som løses i vann varierer mellom de ulike gassene. Dalmolin et.al [30] forsket i 2006 på effekten av trykk på løseligheten til  $CO_2$  i vann ved ulike temperaturer. Ved å presentere resultatene fra *Table 1* i [30] grafisk er det tydelig at det støttes oppunder Henry sine resultater, se figur 2.10. Resultatene viser at det kun er en en-til-en proporsjonal sammenheng, som beskrevet av Henry, mellom økt trykk og økt løselighet ved 288K eller 14,85°C.



Figur 2.10: Plot av resultatene fra *Table 1* i Dalmolin et.al 2006 [30]. Figuren viser en økende grad av oppløst  $\text{CO}_2$  ved synkende temperatur og økende trykk. Dette underbygger Henry sin teori fra 1803. 1-1 og 1-0,5 proporsjonalitets linjene er lagt inn for illustrasjonsformål.

William Henry, [29], tok også for seg effekten av temperatur på løseligheten til gasser i vann. Dette ble testet ved bruk av gassene  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  og  $\text{N}_2\text{O}$ . Resultatene viser utvetydig for alle gassene at løseligheten øker med synkende temperatur. Forsøkene viser også her, som forsøkene med endringer i trykk, at de ulike gassene har ulik løselighet i vann. *Table 2* i Battino og Clever sin rapport fra 1965, [31], sammenstiller flere forsøk utført av ulike forskere for gassene  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  og  $\text{Ar}$  som utgjør hovedbestanddelene av luft ved normale trykk og temperaturer. Forsøkene underbygger William Henry sine observasjoner for effekten av temperatur på løseligheten til ulike gasser i vann i likhet med forsøkene utført av Dalmolin et.al 2006 [30] se figur 2.10.

Resultatene av Henrys forskning betyr at gasser og væsker vil søke en likevekt når de kommer i kontakt med hverandre. Løseligheten av en gass i en væske kan skrives som følgende i henhold til Sander [32].

$$c_a = H^{c^p} p_g \quad (2.28)$$

Hvor

$c_a$  Konsentrasjon av gass i væskeform

$H^{c^p}$  Henrys konstant

$p_g$  Gassens partielle trykk

Løseligheten av gass kan angis mer anvendelig ved å multiplisere  $c_a$  med den molare vekten av gassen.

$$s = c_a M_g \quad (2.29)$$

Her er

- $s$  Gassens løselighet
- $M_g$  Gassens molare vekt

Gass	$H^{cp} [\frac{mol}{m^3 Pa}]$	$\frac{d \ln H}{d(1/T)} [K]$
O <sub>2</sub>	$1,3 \times 10^{-5}$	1500
N <sub>2</sub>	$6,4 \times 10^{-6}$	1300
Ar	$1,4 \times 10^{-5}$	1500

Tabell 2.5: Henrys konstant og konstantens temperaturavhengighet for hovedbestanddelene i luft. Verdiene er hentet fra s.11, 12 og 20 i R. Sander 2015 [32].

Konstantene oppgitt i tabell 2.5 er gitt for en standard temperatur på 298,15 K. Som nevnt tidligere har temperatur en stor effekt på løseligheten av gass i vann og dermed på Henrys konstant. For å ta hensyn til denne effekten kan likning 2.30 benyttes [32].

$$H^{cp}(T_1) = H^{cp}(T_0) \times \exp\left(\frac{d \ln H}{d(1/T)} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (2.30)$$

Her er

- $T_1$  Temperaturen gassen er utsatt for
- $T_0$  Standard temperatur for verdiene i [32] på 298,15 K
- $\frac{d \ln H}{d(1/T)}$  Temperaturavhengigheten for Henrys konstant

Effekten av trykkøkning på løseligheten av gassene antas videre i denne oppgaven å øke med en en-til-en proporsjonalitet med utgangspunkt i resultatene til Dalmolin et.al [30], se figur 2.10. I denne oppgaven vil det jobbes med temperaturer som ligger rundt +/- 10 K av den en-til-en proporsjonale linja. Antagelsen vil ikke gi helt korrekte svar, men feilen vil ikke bli veldig stor.

I alle forsøkene William Henry utførte er det viktig å bemerke seg at det på 1800-tallet ikke fantes en god måte å skape luftfritt vann.

Ray F. Weiss [33] gjorde i 1974 forsøk på løseligheten til CO<sub>2</sub> som en funksjon av vannets saltinnhold. *Table IV* i [33] viser en tydelig sammenheng mellom saltinnholdet i vannet og løseligheten til CO<sub>2</sub> for temperaturen  $\approx 20,6$  °C. Weiss gjorde også en sammenstilling ved bruk av forsøksresultater hentet fra litteratur i 1970 [34]. Her har resultater fra forsøk utført på gassene N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> og Ar blitt benyttet. Også her, i *Table 4-12* [34], synker løseligheten til de ulike gassene med økende saltinnhold. Dermed vises det generelt sett en reduksjon i løseligheten til ulike gasser som løses i vann ved økende saltinnhold i vannet.

Denne oppgaven vil hovedsaklig ta for seg hvordan man best mulig kan oppnå fullstendig metning av poretrykkssystemet under et udrenert treaksial forsøk. Henrys lov styrer hvor god effekt baktrykket har på metnings-

fasen ved ulike temperaturer. Under enkelte forsøk kan det være ønskelig å utføre forsøket med korrekt saltinnhold i porevannet. Det er derfor utført et litteratursøk for å undersøke effekten av saltinnhold i vannet på vannets kapasitet til å absorbere luft. Dette vil ikke behandles videre i denne oppgaven.

## 2.6 Kompressibilitet av gass

Kompressibiliteten av gass styres av den ideelle gassloven, se likning 2.31, som først foreslått av Emile Clapeyron i 1834 og vist derivert av Laugier og Garai 2007 [35].

$$P_g V_g = nRT \quad (2.31)$$

Hvor

$P_g$  Gassens absolutte trykk

$V_g$  Volum av gass

$n$  Antall mol gass

$R$  Den ideelle gasskonstant

$T$  Temperatur

Den ideelle gassloven er sammensatt av Boyles lov, Gay-Lussacs lov og Avogadros lov.

$$P_g V_g = k \quad (2.32)$$

$$\frac{P_g}{T} = k \quad (2.33)$$

$$\frac{V_g}{n} = k \quad (2.34)$$

Boyles lov sier at ved en konstant temperatur og en gitt mengde gass, vil volumet av en ideell gass være invers proporsjonal med det absolutte trykket gassen er utsatt for [35].

Gay-Lussacs lov sier at ved en gitt mengde gass og et konstant volum, vil temperaturen til en gass være proporsjonal med det absolutte trykket gassen er utsatt for [35].

Avogadros lov sier at ved like volum, lik temperatur og likt trykk vil antall molekyler være uavhengig av type gass [35].

Alle lovene nevnt over gjelder for ideelle gasser. En ideell gass er en tilnærming til reelle gasser og er basert på bakgrunn av følgende antagelser som beskrevet av Pedersen [36].

En gass består av mange molekyler som kontinuerlig flyr tilfeldig rundt.

Gassmolekylene er som punkter, altså små sammenlignet med avstanden dem imellom.

Gassmolekylene beveger seg alltid i rette linjer.

Det virker kun krefter mellom molekylene under kollisjon.

For å benytte den ideelle gassloven i praksis må gassen man vurderer være i en tilstand hvor den er tilnærmet lik en ideell gass. I følge Fjellvåg og Ystenes [37] er dette tilfredsstillt dersom gassen har et lavt trykk, godt under kritisk trykk, og samtidig en høy temperatur som er godt over kritisk temperatur. Kritisk temperatur og trykk for hovedbestanddelene av luft er gitt i tabell 2.6.

Gass	Kritisk temperatur [°C]	Kritisk trykk [atm]
Nitrogen	-147	33,9
Oksygen	-118,4	50,8
Argon	-122	48,6

Tabell 2.6: Kritisk temperatur og trykk for hovedbestanddelene av luft. Verdiene er hentet fra s. 13 og 16 i Praxair - Gassfarer og gassikkerhet 2017 [38].

Den ideelle gassloven er med på å bestemme hvor god effekt metningsprosessen, nærmere bestemt baktrykket, vil ha på komprimeringen av eventuelle gassbobler i poretrykkssystemet under treksial forsøk.

## 2.7 Teoretisk volumreduksjon av luft ved en udrenert, isotrop belastning

Feilen i registrert poretrykk i et treksialforsøk er direkte knyttet til volumet av luft som fremdeles befinner seg i ulike deler av poretrykkssystemet, for eksempel i prøven, i slanger og i koblinger. For å luke ut feilen i målt poretrykk må ideelt sett all denne luften løses opp og komprimeres ut av systemet. Ved å anta at luften tilfredsstillt kravene til en ideell gass som beskrevet i kapittel 2.6, kan effekten et påsatt baktrykk i treksialapparatet har på det gjenværende volumet av luft i systemet undersøkes ved å benytte likning 2.31.

$$P_g V_g = nRT$$

Etter at prøvestykket er bygd inn og slanger, koblinger og liknende er gjennomspylt stenges systemet. Det kan derfor ikke komme inn eller slippe ut mer luft av systemet. Som beskrevet i Statens Vegvesen R210 [12] skal temperaturen holdes konstant under et udrenert treksialforsøk. Med disse forutsetningene kan derfor  $n$  og  $T$  antas å være konstante. Høyre side av den ideelle gassloven blir derfor konstant og vi sitter igjen med Boyles lov, se likning 2.32.

$$P_g V_g = k$$

Boyles lov beregner gjenværende volum av et stoff i gassfasen. Som man ser av figur 2.10 vil en gitt mengde gass løses i opprinnelig luftfritt vann ved 1 atm. Volumet av gjenværende luft i systemet vil derfor kunne skrives som følger.

$$V_{fg} = V_{tg} - V_{dg} \quad (2.35)$$

Hvor

$V_{fg}$  Volum fri gass

$V_{tg}$  Ekvivalent totalt volum gass

$V_{dg}$  Ekvivalent volum oppløst gass

Konstanten på høyre side av likning 2.32 medfører at likningen kan skrives om slik at den uttrykker 2 tilstander med ulike grensebetingelser for luften.

$$P_{g0} V_{g0} = P_{g1} V_{g1} \quad (2.36)$$

Ved å substituere inn  $V_{tg0}$  og  $V_{tg1}$  for henholdsvis  $V_{g0}$  og  $V_{g1}$  og løse for  $V_{tg1}$  finnes det ekvivalente totale volumet av luften. Dette er volumet som luften ville okkupert etter en trykkendring dersom deler av luftpartiklene ikke hadde blitt løst i vann.

$$V_{tg1} = \frac{P_{g0}}{P_{g1}} V_{tg0} \quad (2.37)$$

For å finne volumet av luften som er i gassform brukes likning 2.35. Likningen kan skrives om ved å benytte Henrys lov som vist i likning 2.29. Før dette gjøres er det ønskelig å skrive om likning 2.29 slik at den uttrykker mengden oppløst gass som et volum. Etersom likning 2.29 uttrykker løseligheten til gassen ved vekt per volumenheter vann oppnås dette ved å multiplisere med volumet av vann og dele dette på gassens tyngdetetthet ved tilstandens trykk og temperatur.

$$V_{dg} = s \frac{V_w}{\rho_g} \quad (2.38)$$

Hvor

$s$  Gassens løselighet

$V_w$  Volum vann

$\rho_g$  Gassens tyngdetetthet

Likning 2.35 kan dermed skrives om til likning 2.39. Her uttrykkes det gjenværende volumet av luft i gassform som det totale ekvivalente volumet av luft i systemet minus det oppløste ekvivalente volumet av luft.

$$V_{fg} = V_{tg} - s \frac{V_w}{\rho_g} \quad (2.39)$$



I denne oppgaven vil likning 2.39 benyttes for et system med et fastsatt volum, valgt av beregningsmessige hensyn til 1 liter. Systemets volum vil være fylt av et gitt initielt volum luft, mens resten vil være vannfylt. Systemet holder en temperatur på 26,9 °C og har et referansetrykk på 100 kPa. Systemet utsettes så for en jevn trykkøkning inntil en tilleggsspenning på 1000 kPa utover referansespenningen på 100 kPa er nådd. Endringene i gjenværende luft beregnes og plottes med gjenværende volum luft, men også i gjenværende prosentandel luft av systemets opprinnelige volum mot tilleggsspenningen over referansespenningen. Deretter vil de samme beregningene utføres, men denne gang med en temperatur på 6,9 °C.

### 2.7.1 Valg av gassenes tetthet

For å beregne likning 2.39 kreves kunnskap om gassenes densiteter ved ulike trykk og temperaturer. Dette er hentet fra nettsiden *Engineering ToolBox*. Her er densiteter for både oksygen, nitrogen og argon presentert i tabeller ved ulike temperaturer og trykk i henholdsvis [39], [40] og [41]. Gassene vil i beregningene utsettes for temperaturer og trykk som ligger langt unna de kritiske verdiene presentert i tabell 2.6. Det kan derfor antas en oppførsel som er tilnærmet lik oppførselen til en ideell gass i følge Fjellvåg og Ystenes [37]. Den ideelle gassloven, se likning 2.31, tilsier at en temperaturøkning ved konstant trykk og konstant mengde gass vil gi en lineær volumøkning og dermed en lineær økning i tettheten til gassen. I realiteten vil dette ikke stemme helt, og for å benytte de mest korrekte verdiene velges det å utføre beregninger ved en opprinnelig temperatur på 26,9 °C hvor densitetene til de ulike gassene er oppgitt i *Engineering ToolBox*. En endring i temperatur vil gjøres til 6,9 °C da densitetene er kjent også ved denne temperaturen. Ved å holde en litt større temperaturforskjell i beregningene, og ikke interpolere til temperaturer mellom 6,9 og 26,9 °C ved å anta en ideell gass, kan det også, etter Henrys lov, forventes å se en større effekt av temperaturendringene på det gjenværende volumet av luft i gassform.

	Oksygen	Nitrogen	Argon
Tetthet ved 6,9 °C og 100 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	1376	1205	1717
Tetthet ved 6,9 °C og 1000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	13860	12090	17300
Tetthet ved 6,9 °C og 3000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	-	36480	-
Tetthet ved 6,9 °C og 5000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	-	61016	-
Tetthet ved 6,9 °C og 10000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	147600	-	-
Tetthet ved 26,9 °C og 100 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	1284	1126	1603
Tetthet ved 26,9 °C og 1000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	12910	11230	16110
Tetthet ved 26,9 °C og 3000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	-	33680	-
Tetthet ved 26,9 °C og 5000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	65970	56130	82280
Tetthet ved 26,9 °C og 10000 kPa [g/m <sup>3</sup> ]	134600		-

Tabell 2.7: Densitetene til hovedbestanddelene av luft ved 6,9 °C og 26,9 °C ved ulike trykk. Verdiene ble benyttet til å etablere en endring i gassenes tetthet ved varierende trykk for de to temperaturene vist. Verdiene er hentet fra *Engineering ToolBox* [39], [40] og [41].

Trykket luften utsettes for vil også påvirke tettheten for gassene i beregningene. Med konstant temperatur og konstant mengde luft, kan Boyles lov benyttes dersom en oppførsel tilnærmet lik en ideell gass antas for luften. Som sagt vil temperaturene og trykkene i denne oppgaven være langt unna de respektive kritiske verdiene for  $N_2$ ,  $O_2$  og Ar, og en tilnærmet ideell oppførsel kan forventes. En lineær økning for tettheten av gassene ved økende trykk kan derfor forventes etter Boyles lov. Verdiene benyttet for å beregne  $\rho_g$  ved ulike trykk er vist i tabell 2.7. Som forventet viser densitetene seg å følge en tilnærmet lineær økning ved økende trykk. Det velges derfor å benytte en lineær interpolasjon mellom verdiene ved 100 kPa og 1000 kPa for å etablere en densitet ved de spenningsnivåer som inngår i beregningene.

Tetthetene til oksygen, nitrogen og argon er som sagt hentet fra en nettside da det ikke har lyktes forfatteren å oppdrive tettheter til gassene ved de ulike temperaturene fra publisert litteratur. Dette stiller derfor et naturlig spørsmålsteget ved troverdigheten til disse verdiene. Troverdigheten til disse verdiene er diskutert grundigere i kapittel 4 hvor tetthetene i tabell 2.7 sammenlignes med kjente tettheter ved standard temperatur og trykk (STP).

## Kapittel 3

# Forsøksresultater

### 3.1 Treksialforsøk

Tabell 3.1 viser en oversikt over de utførte treksialforsøkene i denne oppgaven. Rekkefølgen på prosedyrene fulgt under utførelsen av de ulike forsøkene er beskrevet med bokstavkombinasjoner under kolonnen Prosedyrer. Følgende bokstaver er brukt for de ulike prosedyrene.

- k Konsolideringsfasen
- m Metningsfasen
- b B-test med følgende avlastning tilbake til ønsket effektivspenning
- s Skjærforsøk

Forsøk	Dybde [m]	Baktrykk [kPa]	Prosedyrer	Parallele forsøk	Apparat	Kommentar
1	5,74	0	k-m-b-s	-	Høyre kjeller	Feil med poretrykkmåler
2	5,74	1000	k-m-b-s	1	Høyre kjeller	Feil med poretrykkmåler
3	5,74	11	k-m-b-s	1	Venstre kjeller	Vertikal sprekk i prøve og problemer med komputer
4	5,89	500	k-m-b-s	-	Ny lab	Luft funnet i poretrykkmåler
5	5,89	1000	k-m-b-s	2	Venstre kjeller	-
6	5,89	305	k-m-b-s	2	Ny lab	-
7	6,09	600	k-m-b-s	3	Venstre kjeller	-
8	6,09	403	k-m-b-s	3	Ny lab	Mulig lekkasje i membran
9	6,26	500	k-m-b-s	4	Venstre kjeller	Lastcelle traff prøve under innbygging
10	6,26	500	m-k-b-s	4	Ny lab	-
11	6,26	400	m-k-b-s	-	Ny lab	-

Tabell 3.1: Oversikt over treksialforsøkene utført i denne oppgaven.

### 3.1.1 Udrenerte styrkeparametre

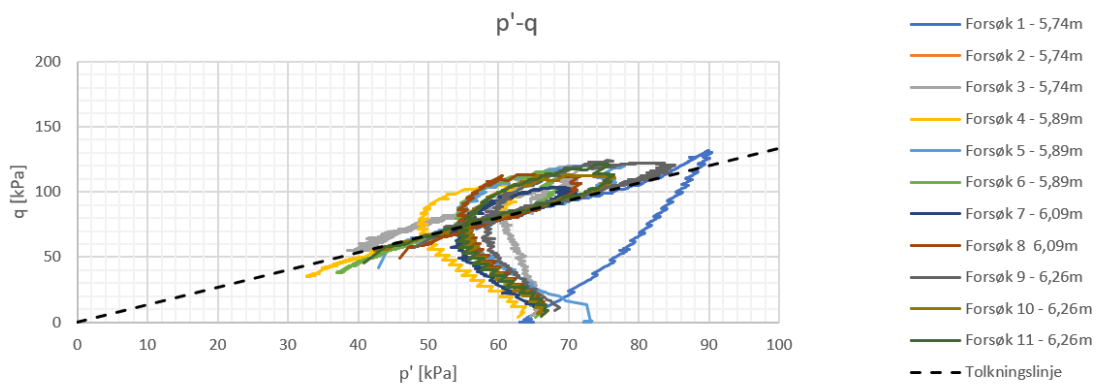
Leiras skjærspenning og tilhørende aksielle tøyning ved peak verdi, funnet ved CAUC forsøk i denne oppgaven er presentert i tabell 3.2. Presentasjon av de individuelle resultatene i p'-q og NTNU plott kan ses i vedlegg A.

Forsøk	Dybde [m]	Skjærstyrke [kPa]	Aksiell tøyning ved brudd [%]
1	5,74	65,84	1,71
2	5,74	85,55	2,08
3	5,74	59,88	1,61
4	5,89	52,85	1,34
5	5,89	60,32	1,59
6	5,89	57,66	1,52
7	6,09	51,76	1,62
8	6,09	56,64	1,29
9	5,26	62,14	1,27
10	5,26	56,49	1,48
11	5,26	60,72	1,69

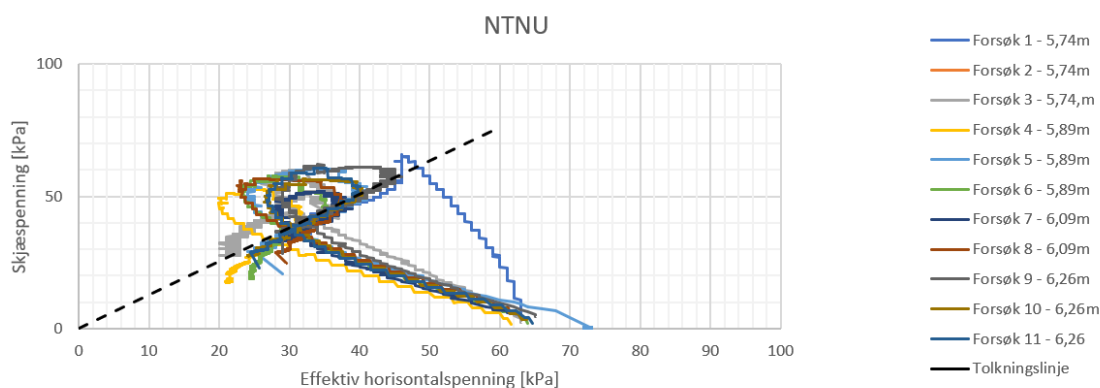
Tabell 3.2: Udrenert skjærstyrke funnet ved CAUC forsøk i denne oppgaven.

### 3.1.2 Drenerte styrkeparametre

Bakgrunnen for tolkning av attraksjon og friksjonsvinkel kan ses i figur 3.1 og figur 3.2. Friksjonsvinkelen hentet ut gjelder ved en stabil tilstand under store deformasjoner.



Figur 3.1: Sammenstilling av forsøksresultatene funnet ved CAUC forsøk presentert i p'-q plott. Tolkningslinjen representerer en representativ attraksjon og helning for de utførte forsøkene. Forsøk 2 er ikke vist i figuren da forsøket ble vurdert til sterkt forstyrret og fordi apparatet benyttet til forsøket gav en feilaktig poretrykkmåling. Dette er diskutert nærmere i kapittel 4.



Figur 3.2: Sammenstilling av forsøksresultatene funnet ved CAUC forsøk presentert i NTNU plott. Tolkningslinjen viser en representativ helning og attraksjon for de utførte forsøkene. Forsøk 2 er ikke vist da forsøket er blitt vurdert til sterkt forstyrret og apparatet gav et feilaktig poretrykk. Dette er nærmere diskutert i kapittel 4.

Tolkningslinjene resulterte i følgende parametre.

Presentasjons metode	Attraksjon [kPa]	Friksjonsvinkel [°]
p'-q	0	33,06
NTNU	0	33,06

Tabell 3.3: Drenerte styrkeparametre funnet ved bruk av representative tolkningslinjer for de utførte forsøkene. Tolkningene basert på p'-q og NTNU plott resulterte i like parametre.

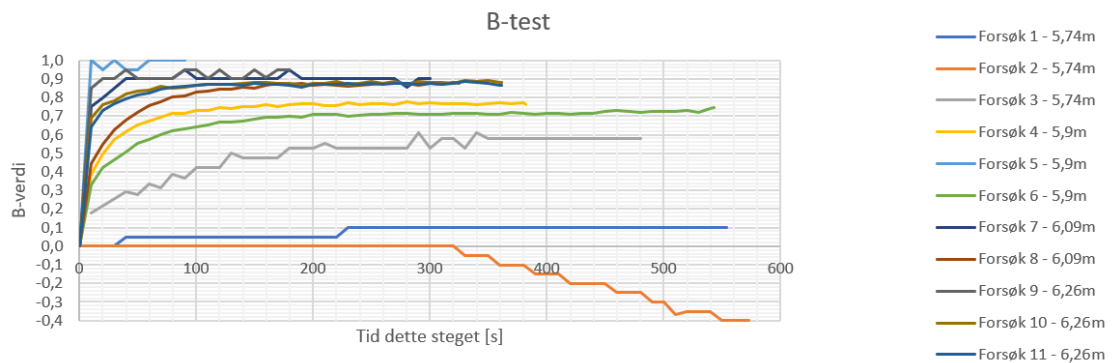
### 3.1.3 Metningsgrad

Tabell 3.4 viser oppnådd B-verdi etter ett minutt, funnet ved B-tester i de utførte forsøkene.

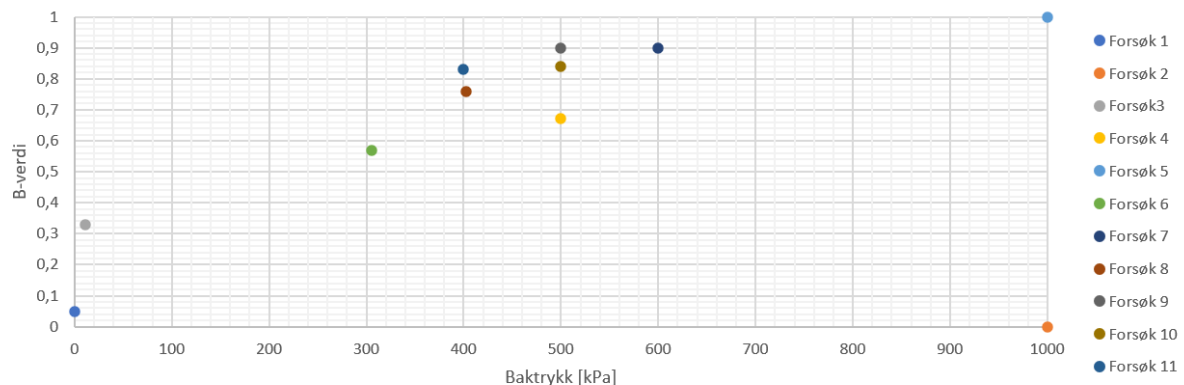
Forsøk	Dybde [m]	Baktrykk [kPa]	Prosedyre	B-verdi etter 1 minutt
1	5,74	0	k-m-b-s	0,05
2	5,74	1000	k-m-b-s	0
3	5,74	11	k-m-b-s	0,33
4	5,89	500	k-m-b-s	0,67
5	5,89	1000	k-m-b-s	1
6	5,89	305	k-m-b-s	0,57
7	6,09	600	k-m-b-s	0,9
8	6,09	403	k-m-b-s	0,76
9	6,26	500	k-m-b-s	0,9
10	6,26	500	m-k-b-s	0,84
11	6,26	400	m-k-b-s	0,83

Tabell 3.4: Oppnådd B-verdi etter ett minutt for de utførte forsøkene. Prøvens dybde, benyttet baktrykk og prosedyre er også vist for de ulike forsøkene.

Figur 3.3 viser utviklingen av B-verdiene for de utførte forsøkene med tid. Figur 3.4 viser den oppnådde B-verdien etter ett minutt ved de ulike baktrykkene som ble benyttet under forsøkene.



Figur 3.3: B-verdiene oppnådd under B-test for de utførte forsøkene. Forsøkene ble kjørt til en stabil B-verdi var oppnådd.



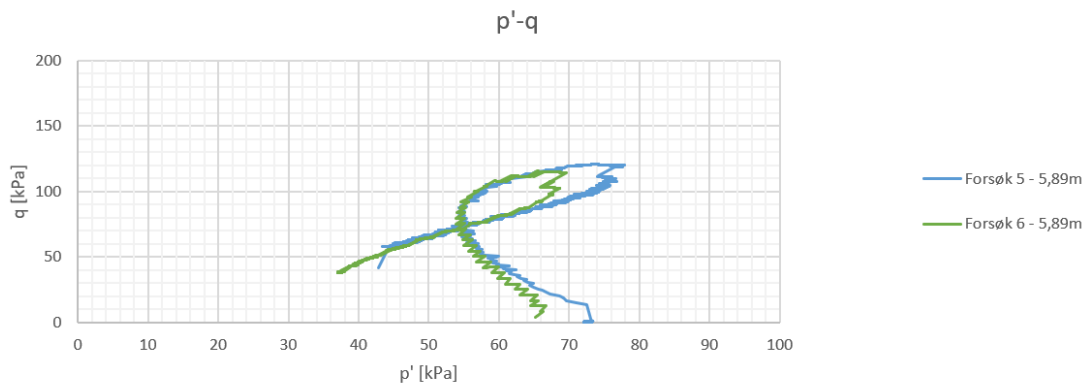
Figur 3.4: Oppnådd B-verdi under B-test etter 1 minutt plottet mot det benyttede baktrykket for de utførte forsøkene. Avviket for forsøk 1 og forsøk 2 som diskuteres i vedlegg C kan tydelig ses.

### 3.1.4 Sammenligning av forsøk

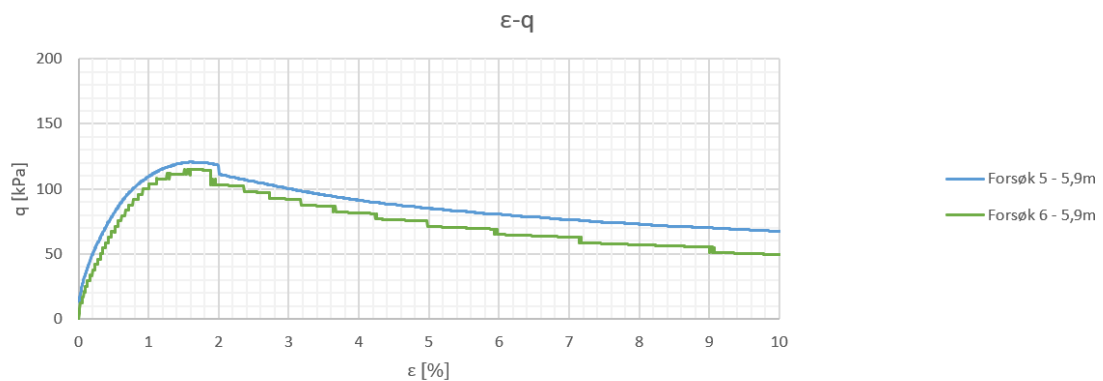
Her vises resultater fra forsøk og teoretiske beregninger som skal vurderes opp mot hverandre basert på ulikheter i prosedyrer. Forsøk 1, 2 og 3 opplevde problemer og ble derfor ikke inkludert i denne studien. En nøyere diskusjon rundt disse forsøkene, og mindre problemer opplevd under de andre forsøkene og beregningene kan ses i vedlegg C.

## Forsøk 5 og 6

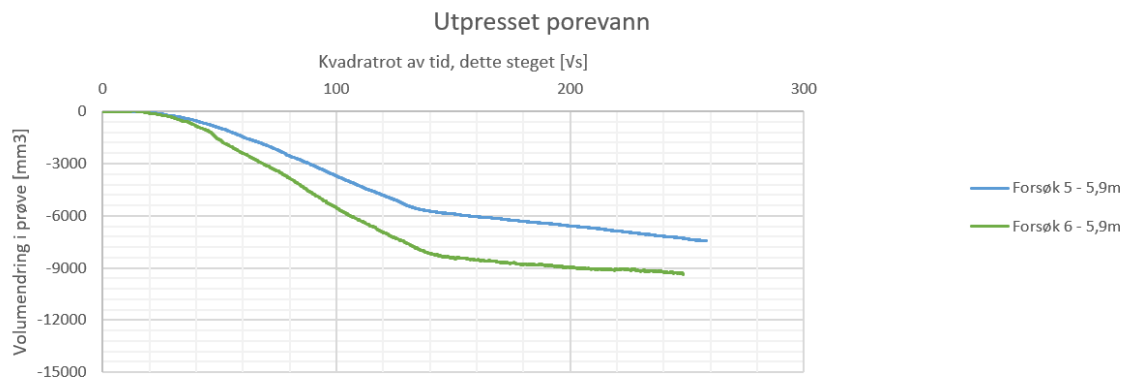
Forsøk 5 og 6 ble kjørt parallelt på leire hentet opp fra 5,84 til 5,95 meters dybde med en midlet dybde på 5,89 meter. Prosedyrene ble utført i rekkefølgen k-m-b-s. Baktrykket i forsøk 5 var 1000 kPa, i forsøk 6 ble et baktrykk på 305 kPa benyttet.



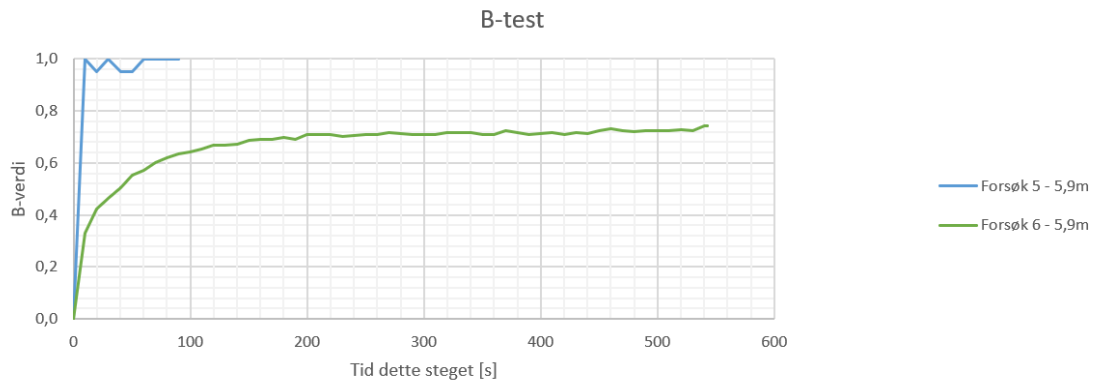
Figur 3.5: Forsøk 5 og 6 presentert i  $p' - q$  graf.



Figur 3.6: Forsøk 5 og 6 presentert i  $\epsilon - q$  graf.



Figur 3.7: Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 5 og 6.

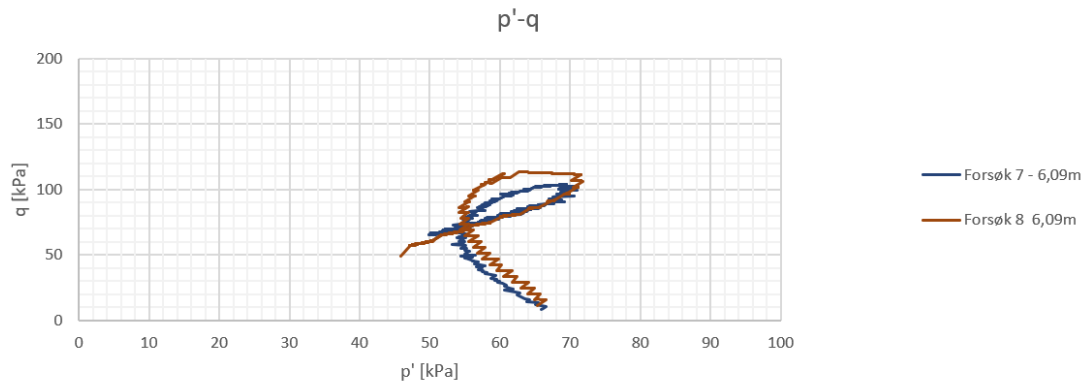


Figur 3.8: B-verdiene under B-test for forsøk 5 og 6.

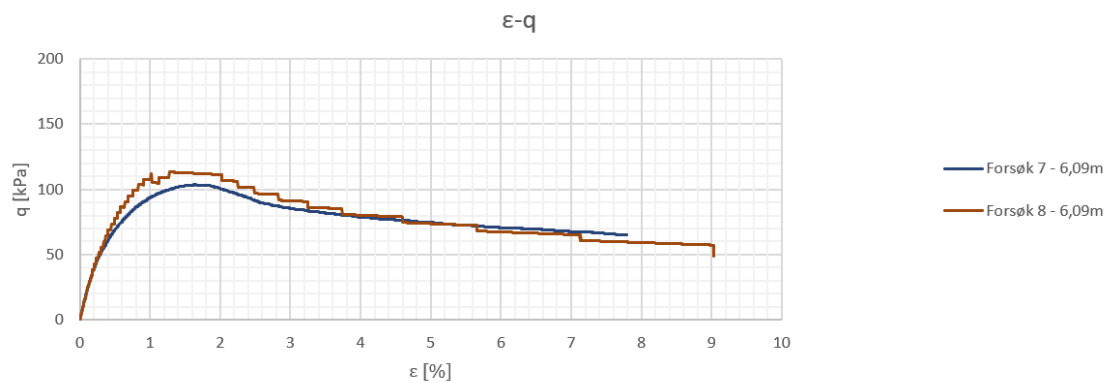


## Forsøk 7 og 8

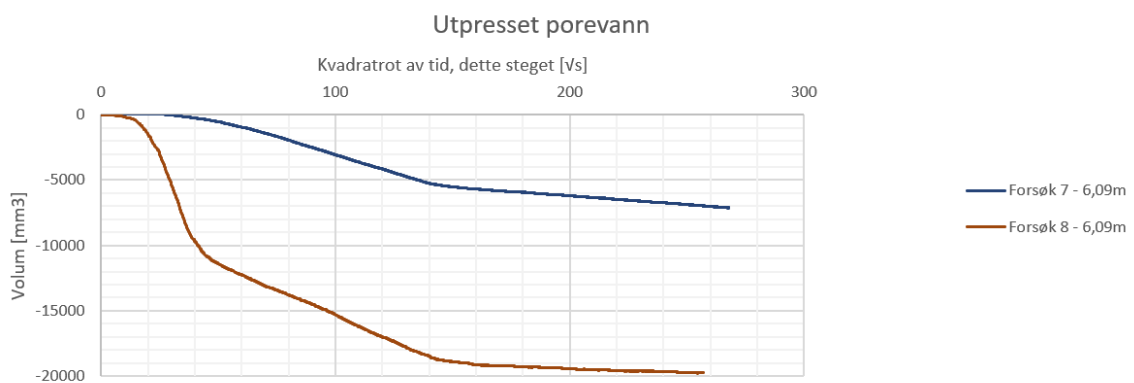
Forsøk 7 og 8 ble kjørt parallellt på leire hentet opp fra 6,04 til 6,16 meters dybde. Det ble trimmet av mest i bunnen av prøvene og den gjennomsnittlige dybden til forsøkene er derfor satt til 6,09 meter. Prosedyrene ble utført i rekkefølgen k-m-b-s. Baktrykket i forsøk 7 var 600 kPa, og i forsøk 8 ble 403 kPa benyttet.



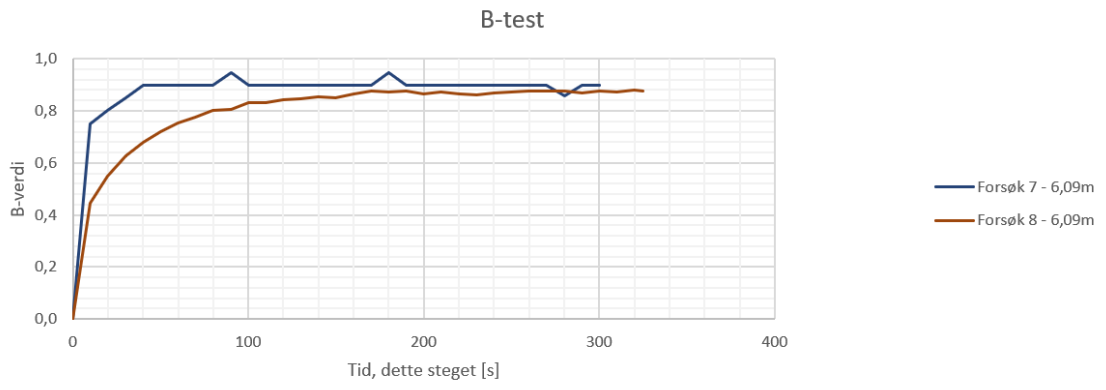
Figur 3.9: Forsøk 7 og 8 presentert i  $p' - q$  graf.



Figur 3.10: Forsøk 7 og 8 presentert i  $\epsilon - q$  graf.



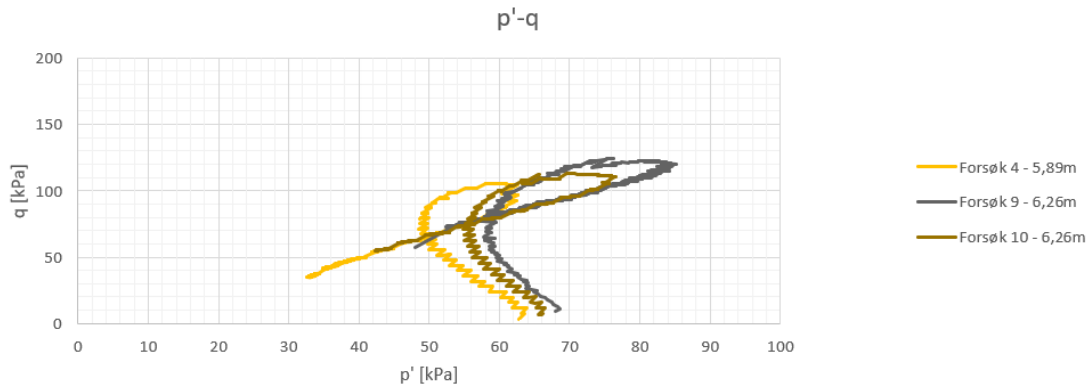
Figur 3.11: Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 7 og 8.



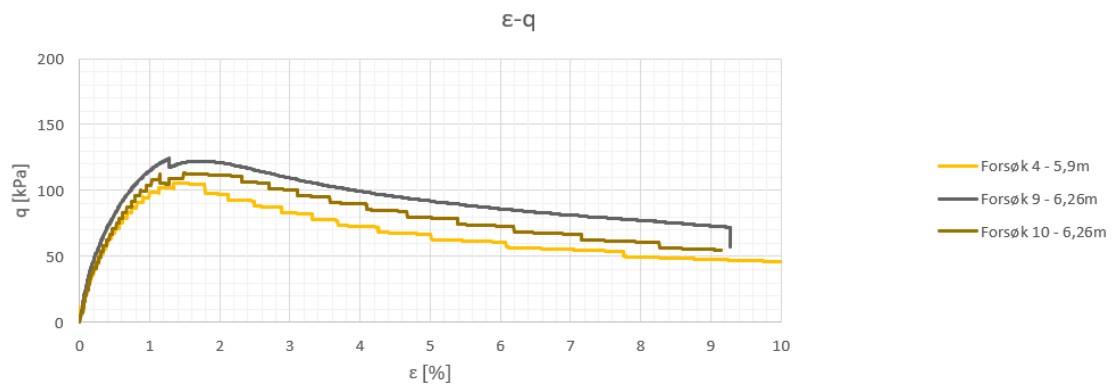
Figur 3.12: B-verdiene under B-test for forsøk 7 og 8.

### Forsøk 4, 9 og 10

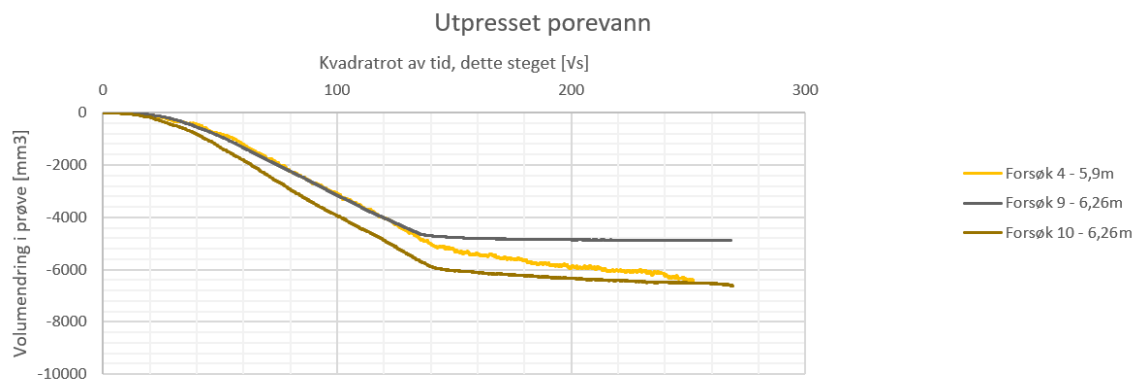
Forsøk 9 og 10 ble kjørt parallele med leire hentet opp fra 6,20 til 6,32 meters dybde med en midlere dybde på 6,26 meter. Forsøk 4 var ikke et parallelt forsøk og ble kjørt på leire hentet opp fra 5,84 til 5,95 meters dybde med en midlet dybde på 5,89 meter. Rekkefølgen k-m-b-s ble benyttet under forsøk 4 og 9, mens rekkefølgen m-k-b-s ble benyttet under forsøk 10. Alle forsøkene ble kjørt med samme baktrykk på 500 kPa.



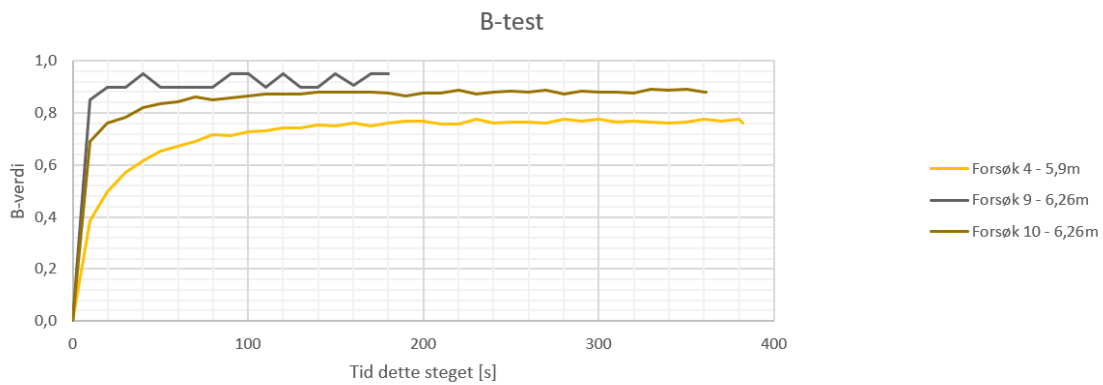
Figur 3.13: Forsøk 7 og 8 presentert i  $p' - q$  graf.



Figur 3.14: Forsøk 4, 9 og 10 presentert i  $\epsilon - q$  graf.



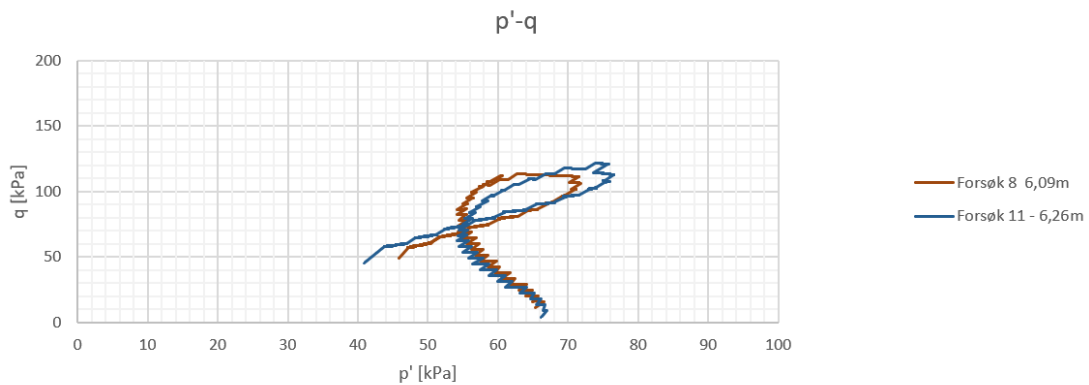
Figur 3.15: Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 4, 9 og 10.



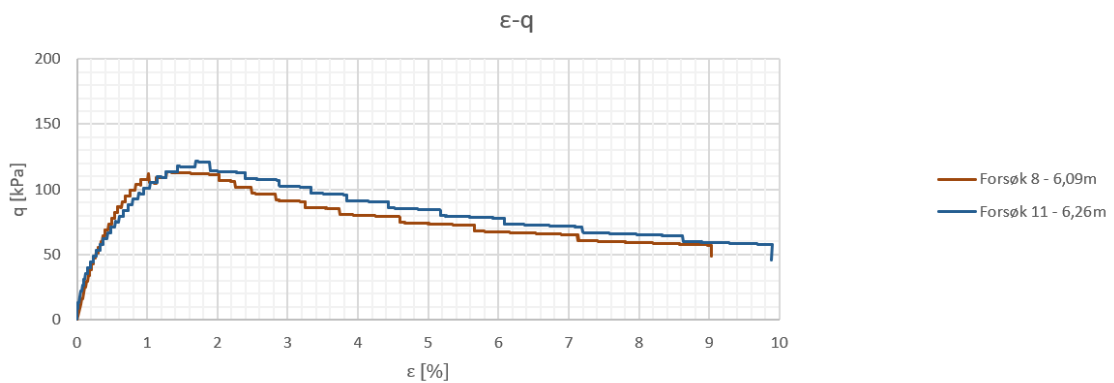
Figur 3.16: B-verdiene under B-test for forsøk 4, 9 og 10.

## Forsøk 8 og 11

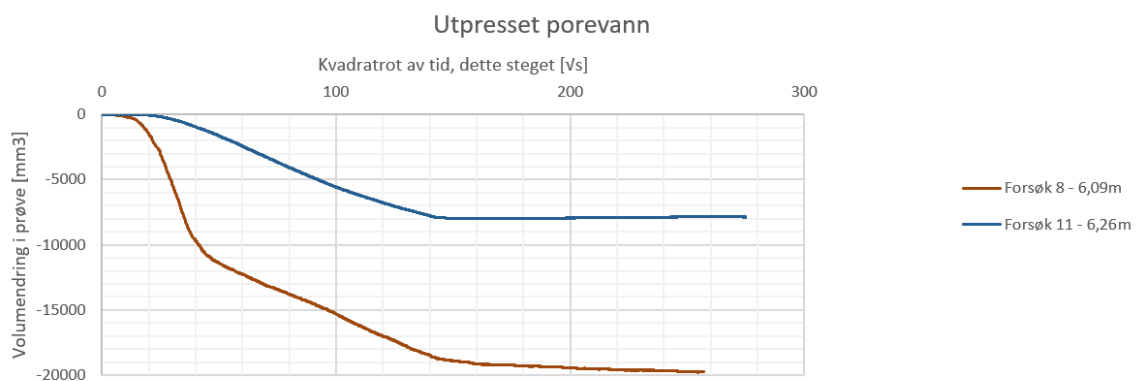
Forsøk 8 og 11 ble kjørt hver for seg, men forsøk 8 var en del av et annet parallelt forsøk. Forsøk 8 ble kjørt på leire hentet opp fra 6,04 til 6,16 meters dybde. Det ble trimmet av mest i bunnen av prøven og den gjennomsnittlige dybden til forsøket er derfor satt til 6,09 meter. Forsøk 11 ble kjørt på leire hentet opp fra 6,20 til 6,32 meters dybde med en midlere dybde på 6,26 meter. Prosedyrene for forsøk 8 ble utført i rekkefølgen k-m-b-s. Under forsøk 11 ble prosedyrene utført i rekkefølgen m-k-b-s. Forsøkene ble utført med samme baktrykk på 400 kPa.



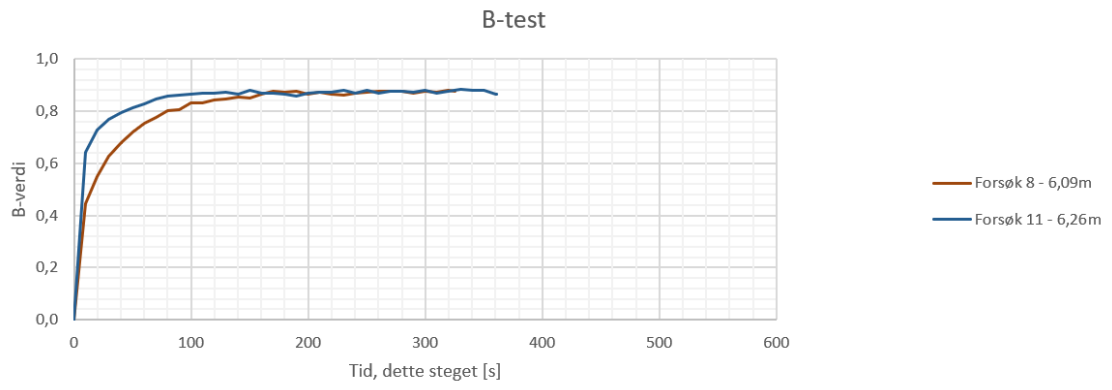
Figur 3.17: Forsøk 8 og 11 presentert i  $p' - q$  graf.



Figur 3.18: Forsøk 8 og 11 presentert i  $\epsilon - q$  graf.



Figur 3.19: Volum utpresset porevann under konsolideringen av forsøk 8 og 11.



Figur 3.20: B-verdiene under B-test for forsøk 8 og 11.

### 3.1.5 Vanninnhold

Tabell 3.5 gir en oversikt over vanninnholdet i leireprøvene benyttet til treaksialforsøk i denne oppgaven. Under forsøk 6 ble ikke den våte vekten av prøvestykket i den 100mm lange krybben notert ned. Dermed er den våte vekten og vanninnholdet for denne leireprøven ukjent. For en full oversikt over alle vekter registrert under forsøkene se vedlegg A.

Forsøk	Våt vekt [g]	Tørr vekt [g]	Vanninnhold [%]
1	428,34	292,28	46,55
2	427,66	292,01	46,45
3	425,12	288,38	47,42
4	425,59	287,64	47,96
5	427,98	287,29	48,97
6	-	281,64	-
7	412,55	278,23	48,28
8	424,5	286,1	48,37
9	447,94	322,93	38,71
10	448,66	321,82	39,41
11	446,97	322,23	38,71

Tabell 3.5: Vanninnhold i leireprøvene benyttet til treaksialforsøk.

### 3.1.6 Prøveforstyrrelse

Tabell 3.6 viser kvaliteten på treaksialforsøkene basert på volumet av utpresset porevann og endringen i pore-tall. Prøvekvaliteten til forsøk 3 kunne ikke beregnes som følge av en problematisk konsolideringsfase. Dette er diskutert nærmere i vedlegg C.

Forsøk	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	Kvalitet	$\Delta e/e_0$	Kvalitet
1	4003	Godt	0,0196	Veldig god til utmerket
2	7262	Akseptabelt	0,0356	Dårlig
4	6422	Akseptabelt	0,0315	God til brukbar
5	7449	Akseptabelt	0,0365	Dårlig
6	9359	Akseptabelt	0,0458	Dårlig
7	7132	Akseptabelt	0,0349	God til brukbar
8	19746	Dårlig	0,0967	Veldig dårlig
9	4880	Godt	0,0239	God til brukbar
10	6617	Akseptabelt	0,0324	God til brukbar
11	7867	Akseptabelt	0,0655	Dårlig

Tabell 3.6: Prøveforstyrrelse for treaksialforsøkene basert på volum av utpresset porevann og endringen i pore-tall.

## 3.2 Ødometerforsøk

Tabell 3.7 viser en oversikt over de utførte ødometerforsøkene i denne oppgaven. Forsøk 2 ble utført med en godt forstyrret prøve. Det skyldes problemer med å få en prøve ut av leira da den sprakk opp og falt fra hverandre under innbygging i ødometer ringen. Da det lykkes med å få en prøve i ringen uten for store synlige skader ble det valgt å utføre forsøket for å se om noe informasjon kunne hentes ut.

Etter forsøk 3 ble det oppdaget et problem med poretrykkmåleren på apparatet benyttet under dette forsøket. Det høyeste registrerte poretrykket viser 0,9 kPa etter omtrent 50 minutter. Poretrykket avtar så mot en verdi på -0,7 kPa på slutten av forsøket.

Forsøk	Dybde [m]	Apparat	Kommentar
1	5,83	Høyre, grunnkurslab	-
2	6,05	Høyre, grunnkurslab	Forstyrret under innbygging
3	6,08	Venstre, grunnkurslab	Feil med poretrykkmåler

Tabell 3.7: Oversikt over ødometerforsøkene utført i denne oppgaven.

### 3.2.1 Parametre

Tabell 3.8 gir en oversikt over parametrene funnet i ødometerforsøkene. Forsøk 2 er sterkt forstyrret og har mistet den karakteristiske knekken ved prekonsolideringen som kan ses for forsøk 1. Forsøk 3 målte som sagt intet poretrykk og effektivspenningene som vises her representerer derfor den totale spenningstilstanden i prøven. Resultatene fra begge forsøkene må brukes med forsiktighet.

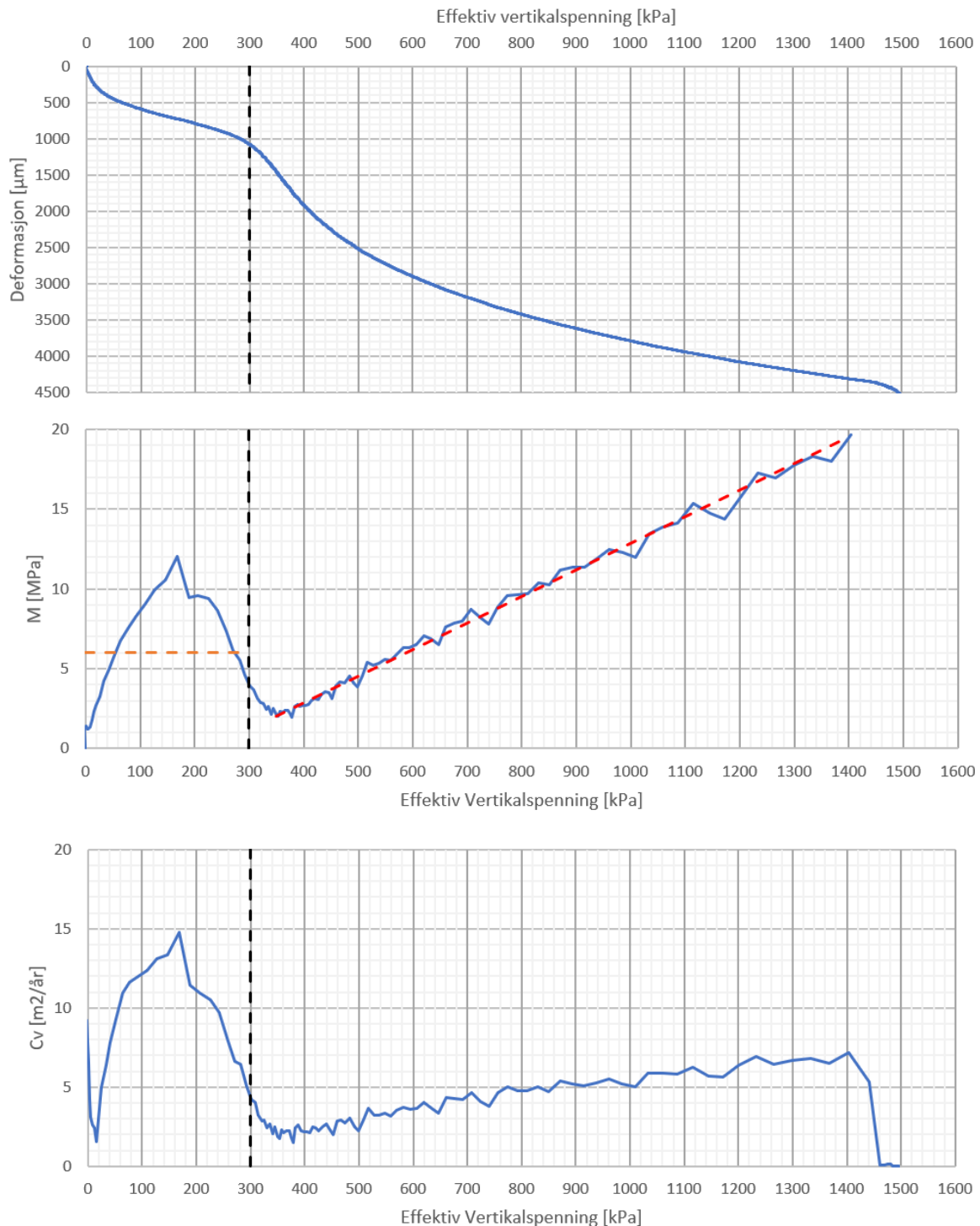
Forsøk	$p'_c$	Korrigert $p'_c$	$M_0$ [MPa]	$m$	$C_v$ [ $m^2/\text{år}$ ]
1	300	-	6	16,7	7
2	360	-	3	10	14
3	360	340	-	-	-

Tabell 3.8: Oversikt over parametrene funnet under ødometerforsøkene.

Tolkningen av parametrene er vist i figur 3.21, figur 3.22 og figur 3.23. Tolkningen av  $p'_c$  er vist med en stiplet sort linje, tolkningen av  $M_0$  med en stiplet oransje linje og tolkningen av  $m$  med en stiplet rød linje. Den korrigerte verdien for  $p'_c$  er et resultat av en manglende poretrykkmåling under ødometerforsøk 3. Verdien av  $p'_c$  er derfor korrigert ved bruk av det målte poretrykket i ødometerforsøk 1 ved tilsvarende spenningsnivå. Dette er diskutert nærmere i vedlegg C.

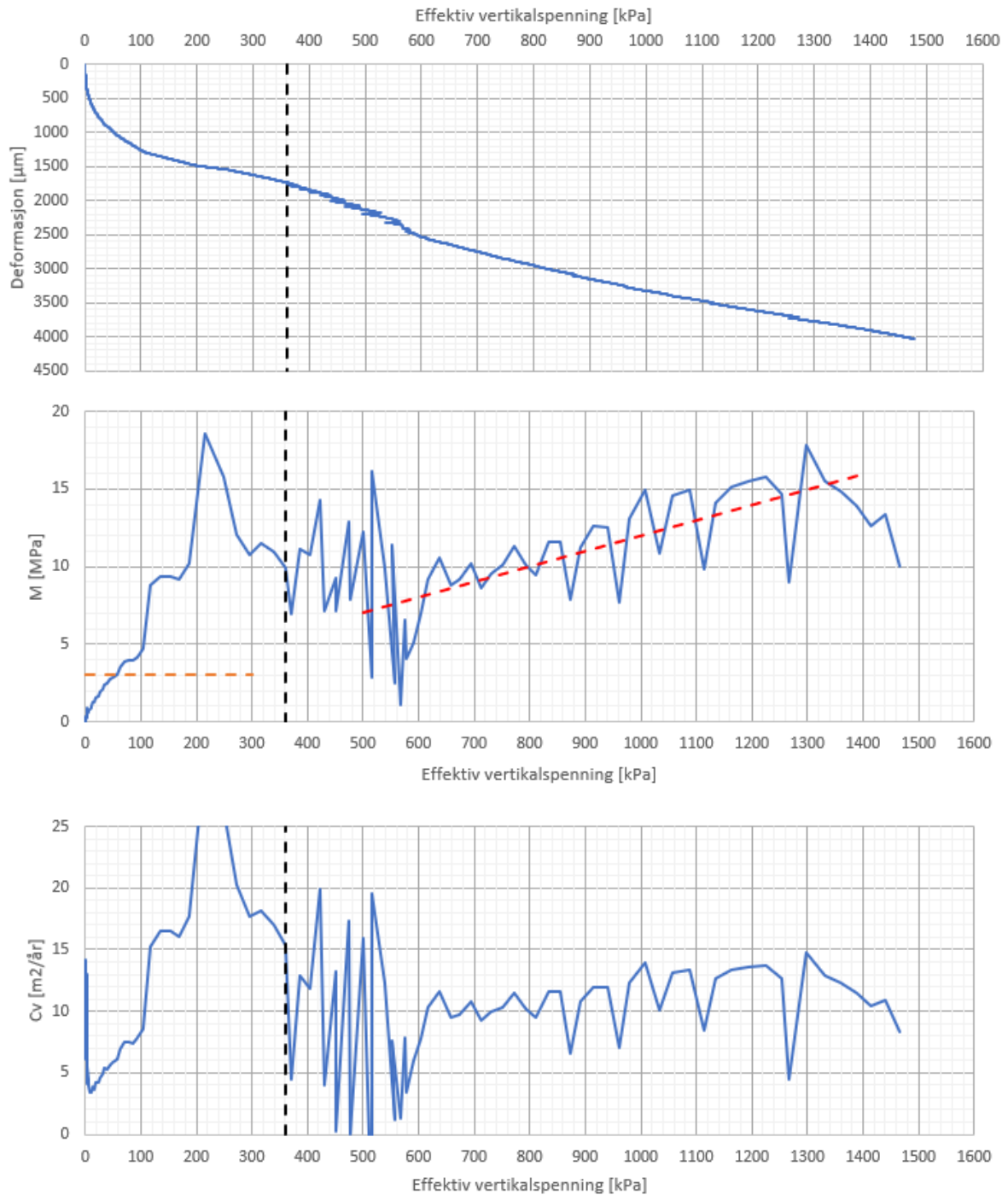


### 3.2.2 Ødometerforsøk 1 - 5,83 meters dybde



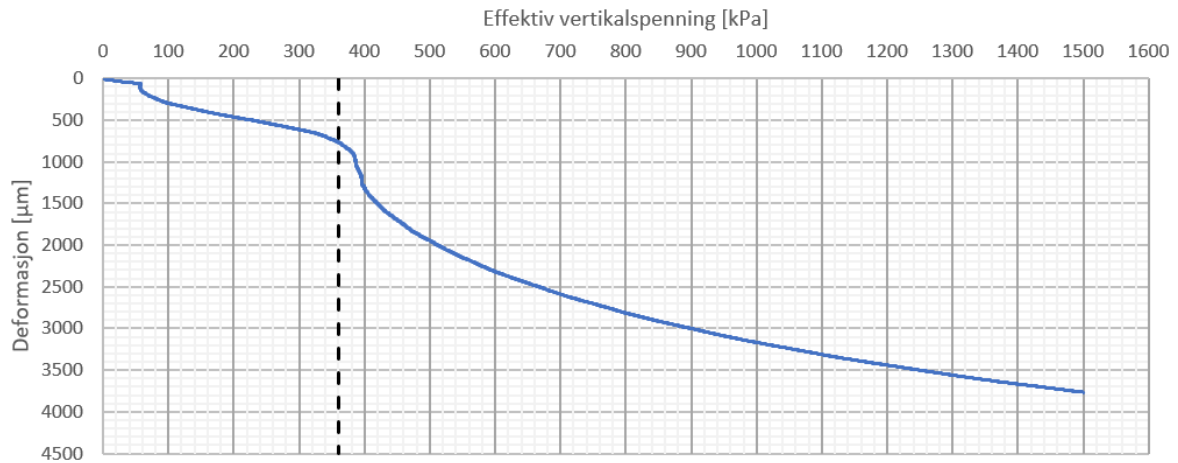
Figur 3.21: Resultater fra det første ødometerforsøket utført på leire hentet opp fra 5,83 meters dybde. Øverst er effektiv vertikalspenning,  $\sigma'_v$  plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er  $\sigma'_v$  plottet mot tangentmodulen,  $M$ . Nederst er  $\sigma'_v$  plottet mot konsolideringskoeffisienten,  $C_v$ .  $\sigma'_{v0}$  ble antatt å være 61,3 kPa. Vanninnholdet ble funnet til 47,77%, enhetsvekt til 17,58 kN/m<sup>3</sup>, partikkeldensitet til 2,88 g/cm<sup>3</sup>. Prøvekvaliteten til forsøket ble ved Lunne et.al 1997 [11] sin metode funnet til dårlig. Ved korreksjonen som foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] ble prøvevaliteten funnet som veldig god til utmerket.

### 3.2.3 Ødometerforsøk 2 - 6,05 meters dybde



Figur 3.22: Resultater fra det andre ødometerforsøket utført på leire hentet opp fra 6,05 meters dybde. Øverst er effektiv vertikalspenning,  $\sigma'_v$  plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er  $\sigma'_v$  plottet mot tangentmodulen,  $M$ . Nederst er  $\sigma'_v$  plottet mot konsolideringskoeffisienten,  $C_v$ .  $\sigma'_{v0}$  ble antatt å være 62,85 kPa. Vanninnholdet ble funnet til 51,88%, enhetsvekt til 17,43 kN/m<sup>3</sup>, partikkeldensiteten til 2,97 g/cm<sup>3</sup>. Prøvekvaliteten til forsøket ble ved Lunne et.al 1997 [11] sin metode funnet til Veldig dårlig. Ved korreksjonen som foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] ble prøvevaliteten funnet som god til brukbar.

### 3.2.4 Ødometerforsøk 3 - 6,08 meters dybde



Figur 3.23: Resultater fra det tredje ødometerforsøket utført på leire hentet opp fra 6,08 meters dybde. Vist er vertikalspenning,  $\sigma'_v$  plottet mot vertikaldeformasjonen.  $\sigma'_{v0}$  ble antatt å være 63,06 kPa. Vanninnholdet ble funnet til 45,24%, enhetsvekt til 17,78 kN/m<sup>3</sup>, partikkeldensiteten til 2,87 g/cm<sup>3</sup>. Prøvekvaliteten til forsøket ble ved Lunne et.al 1997 [11] sin metode funnet til Veldig god til utmerket. Ved korreksjonen som foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2] ble prøve kvaliteten funnet som god til brukbar. Poretrykkmåleren viste seg å være defekt for apparatet brukt til dette forsøket. Plottene av effektiv vertikalspenning mot M og  $C_v$  er ikke vist da resultatene kun viste rette linjer og ikke gjenspeilet forholdene i bakken. Plott av effektiv vertikalspenning mot M og  $C_v$  kan ses i vedlegg B.

### 3.2.5 Vanninnhold

Tabell 3.9 gir en oversikt over vanninnholdet i ødometerprøvene. For en fullstendig oversikt se vedlegg B.

Forsøk	Våt vekt [g]	Tørr vekt [g]	w [%]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1	71,70	48,52	47,77	17,58	2,88
2	71,05	46,78	51,88	17,43	2,97
3	72,49	49,91	45,24	17,78	2,87

Tabell 3.9: Vanninnhold i de ulike ødometerforsøkene utført i denne oppgaven med tilhørende enhetsvekt og partikkel densitet.

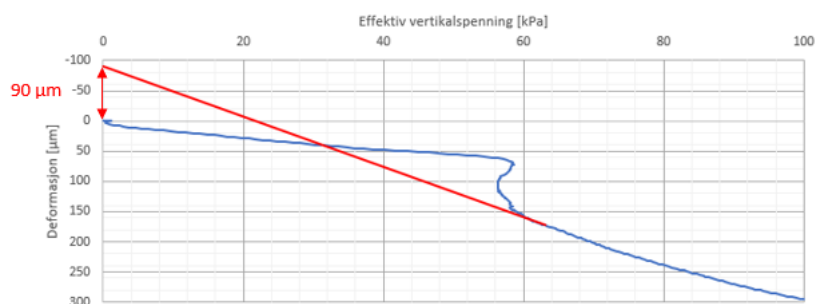
### 3.2.6 Prøveforstyrrelse

Tabell 3.10 gir en oversikt over kvaliteten på prøvestykkene som ble benyttet i ødometerforsøkene.

Forsøk	Metode etter Lunne et.al [11]		Korrigert for falske deformasjoner	
	Poretallforhold	Kvalitet	Poretallforhold	Kvalitet
1	0,042	Dårlig	0,018	Veldig god til utmerket
2	0,089	Veldig dårlig	0,035	God til brukbar
3	0,015	Veldig god til utmerket	0,023	God til brukbar

Tabell 3.10: Prøveforstyrrelse for ødometerforsøkene basert på metoden til Lunne et.al [11] og forslaget til korreksjon av falske deformasjoner gitt fra Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2].

Tabell 3.10 viser en lavere prøve kvalitet etter korreksjon for falske deformasjoner enn før korreksjonen ble utført for forsøk 3. Resultatene fra forsøk 3 viser en bratt kurve rundt in-situ spenningsnivå på 63 kPa. Tangenten til in-situ punktet blir derfor bratt og krysser deformasjonsaksen i omtrent -90  $\mu\text{m}$ , se figur 3.24.



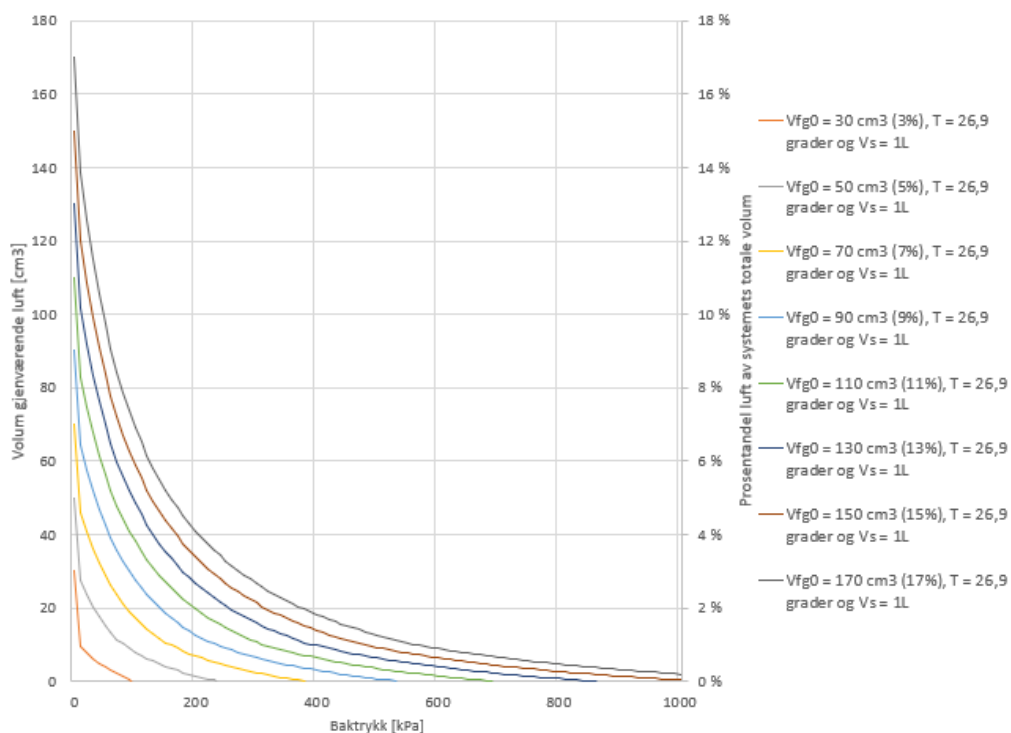
Figur 3.24: Korreksjon for falske deformasjoner i ødometerforsøk 3 utført etter korreksjonen foreslått av Lunne og Berre til forfatterene av NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Tangenten til kurven i punktet for  $\sigma'_{v0}$  krysser y-aksen ved en negativ verdi for de vertikale deformasjonene. Forsøket hadde prøve kvaliteten veldig god til utmerket før korreksjonen. Etter korreksjonen fikk forsøket kvaliteten god til brukbar.

### 3.3 Beregnet volumreduksjon av luft ved en udrenert, isotrop belastning

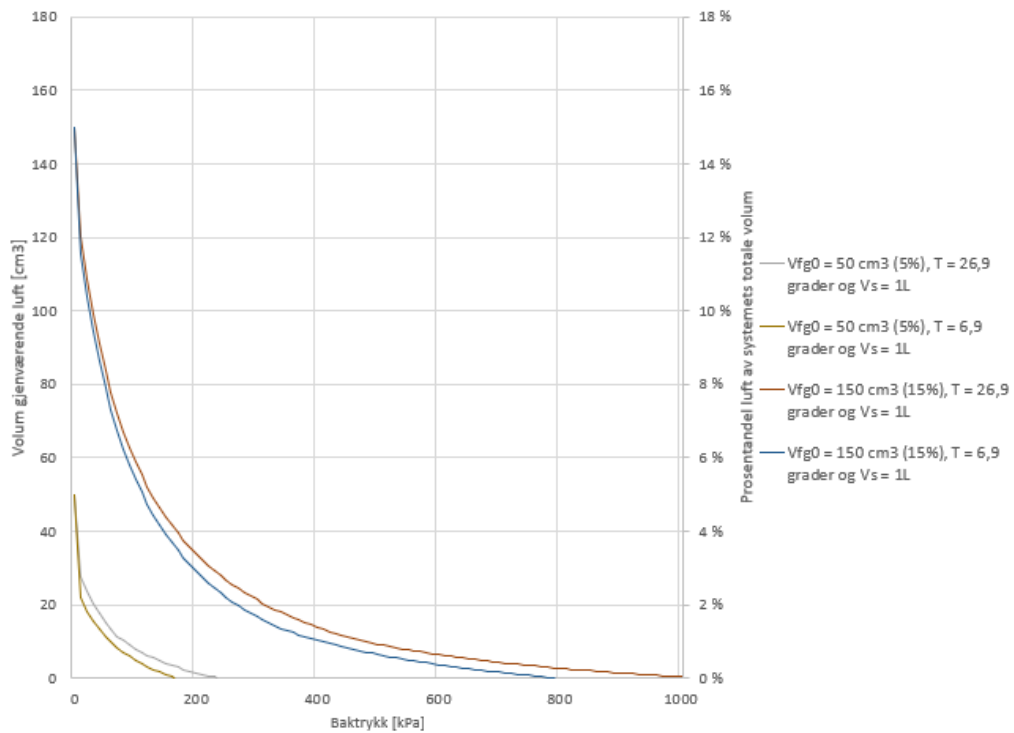
Figur 3.25 og 3.26 er fremstilt ved å benytte likning 2.39 som utledet i kapittel 2.7.

Figur 3.25 beskriver et system hvor systemets temperatur og systemets totale volum er konstant. Figuren viser volumet av gjenværende gass som en funksjon av et påsatt trykk utover referansetrykket på 100 kPa eller omtrent 1 atmosfære. Det er utført beregninger for ulike volumer av initiell luft i systemet. For eksempel vil et system hvor 7% av systemet initielt består av luft kun ha omtrent 2% luft igjen ved en trykkøkning på 100 kPa. For å bli kvitt de siste 2% med luft i systemet kreves det derimot en økning i trykket på nesten 300 kPa.

Figur 3.26 beskriver et system hvor kun systemets totale volum holdes konstant. Figuren viser beregningene med 5% og 15% initielt volum luft fra figur 3.25 sammenlignet med kurver for tilsvarende volum hvor temperaturen har blitt senket. For eksempel vil systemene med 15% initiell luft ha tilnærmet like volumer av gjenværende luft ved lave trykk. 2% gjenværende luft oppnås ved omtrent 310 kPa for det varmeste systemet, mens det kaldeste systemet kun behøver 270 kPa. Ved 100% vannmetning er forskjellen enda større og det varme systemet trenger et trykk som er 200 kPa høyere for å løse opp all luft i systemet enn hva det kalde systemet behøver.



Figur 3.25: Kurvene viser effekten av en trykkøkning på det gjenværende volumet av luft i systemet. Systemet har et referansetrykk på 100 kPa og et fast volum på 1 liter. Ved hver beregning ble trykket økt jevn opp til 1000 kPa over referansetrykket. Systemets volum besto av et gitt initielt volum luft, mens resten var vannfylt. Det opprinnelige volumet av luft ble variert på tvers av beregningene, mens temperaturen i systemet ble holdt konstant ved 26,9 °C for alle beregningene.



Figur 3.26: Kurvene viser effekten av en endring i trykk ved ulike temperaturer på det gjenværende volumet av luft i systemet. Systemet har et referansetrykk på 100 kPa og et fast volum på 1 liter. Ved hver beregning økes trykket jevn opp til 1000 kPa over referansetrykket. Systemets volum består av et gitt initielt volum luft, mens resten er vannfylt. Først ble et system med 5% og 15% initielt volum luft beregnet ved 26,9 °C. Deretter ble systemet beregnet for de samme volumene av luft, men ved en temperatur på 6,9 °C.

## Kapittel 4

# Diskusjon

Målet med denne oppgaven var å vurdere innvirkningen av ulike prosedyrer på graden av vannmetning i lei-reprøvene under treaksialforsøk. Det ble også utført en teoretisk studie hvor oppløsningen av luft i et lukket system under påvirkning av trykk og temperatur ble undersøkt. Først vil potensielle feilkilder som må tas i betraktning rundt resultatene både fra laboratorieforsøkene og de teoretiske beregningene diskuteres. Deretter vil resultatene oppnådd under laboratorieforsøk og ved teoretiske beregninger diskuteres for å se om de ulike prosedyrene har resultert i forskjeller i graden av metning. Relevansen av laboratorieforsøkene vil så vurderes opp mot resultatene oppnådd i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Til slutt vil tanker og ideer til fremtidig arbeid på omådet diskuteres.

### 4.1 Feilkilder

Under dette kapittelet vil de antatt viktigste feilkildene for denne studien diskuteres. Enkelte av forsøkene opplevde problemer både tilknyttet utstyr og operatørfeil. En dypere diskusjon rundt effekten av de ulike feilkildene på forsøksresultatene kan finnes i vedlegg C.

#### 4.1.1 Utførelse av forsøk

Forfatteren av denne oppgaven var også operatør under forsøkene. Før oppgavestart hadde operatøren minimalt med kunnskap og erfaringer knyttet til utførelsen av laboratorieforsøk. Dette gjelder alle praktiske aspekter ved de utførte forsøkene. Det ble utført noen testforsøk ved oppstart av oppgaven, men grunnet pandemien gikk det omtrent 2 måneder mellom siste test og første forsøk.

#### Prøvehåndtering

Forsøkene ble utført på miniblokk prøver med en diameter på 160mm. Som nevnt vil en uforstyrret prøve i praksis ikke kunne hentes opp av bakken og enhver håndtering av prøven vil forstyrre prøven ytterligere i en viss grad. Operatøren hadde, foruten en video og litteratur gjennomgang, aldri behandlet blokkprøver før denne oppgaven. Det viste seg som en spesielt delikat manøver der erfaring virker å være essensielt for en god

utførelse. Det vil derfor være grunn til å tro at noe av prøvenes forstyrrelse kan stamme fra prøvehåndteringen. I forfatterens øyne er dette et problem som kun delvis kan reduseres ved litteratur- og videogjennomgang. For å minimere risikoen for prøveforstyrrelse fra prøvehåndteringen i størst mulig grad er det kun praktisk erfaring opparbeidet gjennom laboratoriearbeid over lengre tid som vil fungere.

### **Bruk av luftfritt vann**

Under forsøkene ble det benyttet luftfritt vann for å mette poretrykksystemet. Det inkluderer vannet i poretrykkpumpa, vannet benyttet til å mette papirfiltre før påføring og vannet i høydebassenget. Dersom dette vannet ble stående for lenge med tilgang på luft, vil luften begynne å trekke inn i vannet igjen for å oppnå likevekt i henhold til Henrys lov. Det antatt luftfrie vannet kan dermed ha tilført poretrykksystemet luft og på den måten virket mot sin hensikt. Under metningsfasen vil dette bety en lavere grad av oppløsning for den frie luften som måtte befinne seg i poretrykksystemet.

For å minimere dette problemet kunne alle bestanddeler med luftfritt vann blitt tømt og nytt luftfritt vann blitt tilført før hvert enkelt forsøk. Fremstillingen av luftfritt vann er en tidkrevende prosess, spesielt ved volumene som er nødvendige for å fylle alle komponentene som skal ha luftfritt vann under et treksialforsøk. Det ble, på grunn av en sen oppstart i laboratoriet som følge av den pågående pandemien, kun fremstilt luftfritt vann ved behov, og da hovedsaklig til høydebassenget.

### **4.1.2 Laboratorieutstyr**

Underveis i forsøket ble det oppdaget problemer tilknyttet laboratorieutstyret som skulle brukes.

#### **Treksialapparat**

Under B-testene for forsøk 1 og forsøk 2 ble det oppdaget et problem med det målte poretrykket. Ved forsøk 1 ble det registrert en lavere B-verdi enn forventet tross for at forsøket ble kjørt uten baktrykk. Operatøren mistenkte luft i poretrykkspumpa og tømte derfor denne og fylte den opp med nytt, luftfritt vann. Ved forsøk 2, som ble kjørt med et baktrykk på 1000 kPa på samme apparat, ble det registrert en lav og deretter synkende B-verdi ned til -0,4. For at en negativ verdi skal kunne oppnås må en økning i totalspenningene medføre en reduksjon i poretrykket hvilket ikke er fysisk mulig. Det ble derfor bygd inn et forsøk hvor restleire fra tidligere forsøk ble benyttet for å konstatere at dette ikke var brukerfeil. Den samme oppførselen ble registrert igjen. Det ble først mistenkt en lekkasje i poretrykksystemet, men vann fra en eventuell lekkasje ble ikke funnet. Det ble derfor antatt å være en feil i poretrykkmåleren og apparatet ble tatt ut av bruk for denne oppgaven.

Under forsøk 3 gikk komputeren som ble benyttet til styring av forsøket i frys flere ganger. Under frysningene ble programmet automatisk stoppet og loggingen av parametre ble da avsluttet. Innvirkningen av stoppene på forsøksresultatene er diskutert i vedlegg C. Det ble under forsøket brukt en programvare for å kunne styre forsøkene fra en tredje komputer. På denne måten kunne forsøkene overvåkes uten behov for å fysisk være på laboratoriet. Det ble fattet mistanke om at komputeren ikke hadde kapasitet til å håndtere programvaren for ekstern styring samtidig som forsøket ble utført. Det ble derfor startet et forsøk på restleire også her. Under



testforsøket ble ikke programvaren for ekstern styring benyttet. Testforsøket ble kjørt i 24 timer uten uønskede stopp i forsøket. Det ble derfor bestemt å benytte treaksialapparatet, men uten å benytte programvaren. Det forekom ingen flere uønskede stopp under de senere forsøkene.

### Ødometer apparat

Under det tredje ødometerforsøket ble det oppdaget et problem med poretrykkmåleren for dette apparatet. Det ble under forsøket registrert lave verdier, under 1 kPa, som videre sank ned mot en negativ verdi på -0,7 kPa. Problemet ble oppdaget etter ødometerforsøket var ferdig utført. Da dette var det siste planlagte og utførte ødometerforsøket ble ingen tiltak iverksatt for å forbedre dette opp mot et nytt forsøk. Effektene av det feilmålte poretrykket og korreksjonen av dette er nærmere diskutert i vedlegg C.

### 4.1.3 Valg av gassenes tetthet

Som beskrevet i kapittel 2.7 ble tettheten til de ulike gassene funnet på nettsiden *Engineering ToolBox* slik at beregninger ved ulike temperaturer kunne utføres og effektene av temperaturendringene kunne vurderes. Det har ikke lyktes forfatteren å oppdrive litteratur som underbygger de eksakte tetthetene funnet på *Engineering ToolBox* ved de gitte temperaturene. Rapporten Gassfarer og gassikkerhet skrevet av Praxair i 2017 [38] inneholder data for tettheten til de ulike gassene ved en tempertur på 0 °C og et trykk på 1 atmosfære. Verdiene fra [38] kan ses i tabell 4.1.

	Oksygen	Nitrogen	Argon
Tetthet ved STP [g/m <sup>3</sup> ]	1430	1250	1780

Tabell 4.1: Tetthet for oksygen, nitrogen og argon ved standard temperatur og trykk. Verdiene er hentet fra s.13 og 16 i Praxair Gassfarer og gassikkerhet [38].

Som nevnt i kapittel 2.7 opplever gassene, ved temperaturene og trykkene som benyttes i denne oppgaven, en tilstand som er tilnærmet lik tilstanden for en idealgass. Den ideelle gassloven, se likning 2.31, sier at ved et konstant trykk og en økning i temperatur vil volumet for en gitt mengde gass øke. En volum økning for en fast mengde gass tilsvarer en reduksjon i gassens tetthet. Tetthetene i tabell 2.7 viser en synkende tetthet med en økende temperatur og tetthetene som kan ses ved 6,9 °C er relativt nærme, men litt lavere enn tetthetene ved STP i tabell 4.1. Denne tendensen stemmer overens med hva som kan forventes basert på den ideelle gassloven. De benyttede verdiene i tabell 2.7 virker på det grunnlaget å være tilnærmet som forventet og av den grunn ses de på som troverdige.

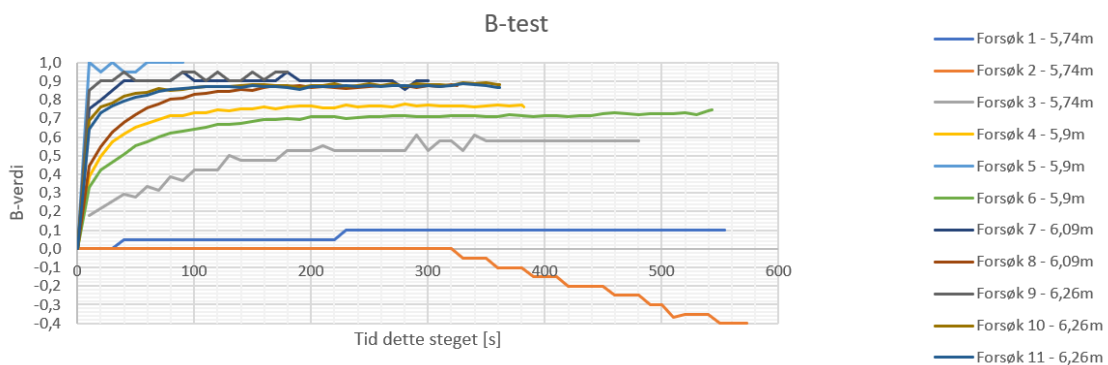
## 4.2 Sammenligning av resultater

Her vil effekten av de ulike prosedyrene funnet ved både laboratorieforsøk og teoretiske beregninger diskuteres nærmere for å se om de ulike endringene i prosedyrer har medført en endring i metningsgraden.

#### 4.2.1 Endringer i påført baktrykk

Som forventet, med bakgrunn i Henrys lov og Boyles lov, viser forsøkene en økende B-verdi og metningsgrad med økende baktrykk, se figur 3.4. Forsøk 4 ga en lavere B-verdi enn forventet basert på det benyttede baktrykket. Dette skyldes trolig en oppsamling av luft i poretrykkmåleren og er grundigere diskutert i vedlegg C.

Med unntak av B-verdien på 1 for forsøk 5 ved 1000 kPa baktrykk, viser de øvrige forsøkene en tendens til å flate ut ved en B-verdi på omtrent 0,9, se figur 3.3. En B-verdi på 1 er som sagt ikke oppnåelig, og ved nærmere vurdering av verdien for forsøk 5, se figur 3.3, varierer B-verdien mellom 0,95 og 1. Variasjonen skyldes trolig en lav nøyaktighet i poretrykkmåleren, og den faktiske B-verdien kan derfor trolig antas å ligge mellom 0,95 og 1.



Gjenvisning av figur 3.3

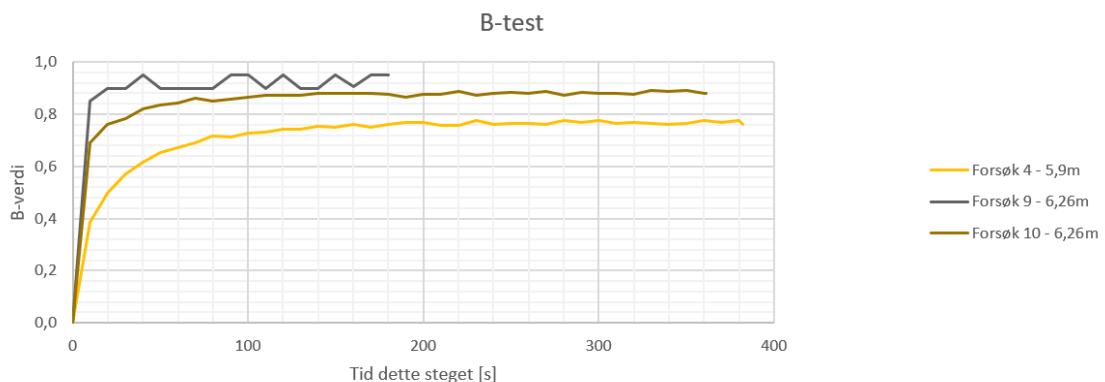
For udrenerte forhold, det vil si en momentan poretrykkendring av tilsvarende størrelse som en totalspenningsendring, tilfredsstillende kun B-verdien funnet i forsøk 5 kravet på 0,95 gitt i NS-EN ISO 17892-9 [13]. Forsøk 7 og 9 opplever den samme økningen i poretrykk som forsøk 5 i starten, men de bøyer av noe tidligere og stabiliserer seg rundt en verdi på 0,9. Forsøk 7 og 9 utviser også liknende variasjoner som beskrevet over for forsøk 5, mellom en B-verdi på 0,9 og 0,95. Det virker rimelig å anta at disse variasjonene stammer fra den manglende nøyaktigheten i måleutstyret da de er utført på samme treaksialapparat som forsøk 5. Dette innebærer trolig at B-verdien under forsøk 7 og 9 ligger en plass mellom 0,9 og 0,95, og dermed er nær ved å tilfredsstillende kravet i [13].

For å oppnå tilfredsstillende grad av metning i form av tilstrekkelig høy poretrykkrespons slik at [13] tilfredsstillende, vurderes det som nødvendig å benytte et baktrykk på 500 til 600 kPa basert på forsøksresultatene i denne oppgaven.

#### 4.2.2 Endringer i prosedyrerekkefølgen

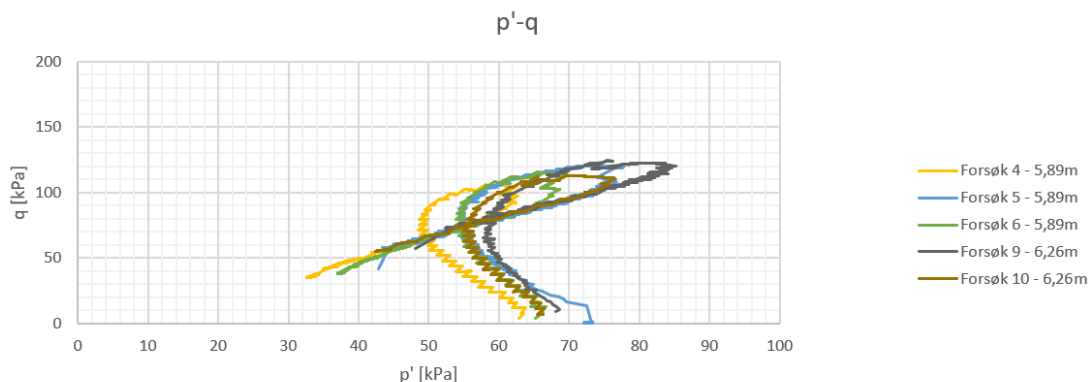
Forsøk 10 og 11 ble utført med en endret prosedyre sammenlignet med de øvrige forsøkene. Som beskrevet i kapittel 3, ble forsøk 1-9 utført med prosedyrene i rekkefølgen konsolidering, metning, B-test og skjærforsøk. Under forsøk 10 og 11 ble dette endret til metning, konsolidering, B-test og skjærforsøk. Forsøk 10 ble så sammenlignet med forsøk 4 og 9, mens forsøk 11 ble sammenlignet med forsøk 8. Sammenligningene ble gjort mot forsøk med tilsvarende baktrykk, men hvor prosedyrene var utført i en annen rekkefølge.

Forsøk 4, 9 og 10 ble utført ved et baktrykk på 500 kPa og med varierende prosedyrer som beskrevet over. Figur 3.16 viser utviklingen av B-verdi under forsøk 4, 9 og 10. sammenligningen av disse forsøkene viser et tvetydig resultat med tanke på effekten av de endrede prosedyrene på graden av vannmetning. Forsøk 10, hvor prosedyren er endret, viser raskere utvikling av poretrykk ved en momentan belastning enn hva forsøk 4 gjør. Forsøk 10 viser derimot en lavere oppnådd B-verdi og en tregere oppbygning av poretrykk enn hva forsøk 9, utført identisk som forsøk 4, opplever. En fast konklusjon kan derfor ikke etableres basert på sammenligningen av disse forsøkene. Den lave B-verdien i forsøk 4 antas å stamme fra luft som ble oppdaget i poretrykkmåleren etter endt forsøk. Teorien tilsier at volumet av luft trolig var både komprimert og delvis oppløst i vannet innad i poretrykkssystemet, men basert på resultatene virker det likevel som et visst volum av luft fremdeles var til stede og dermed dempet poretrykkresponsen under forsøket.



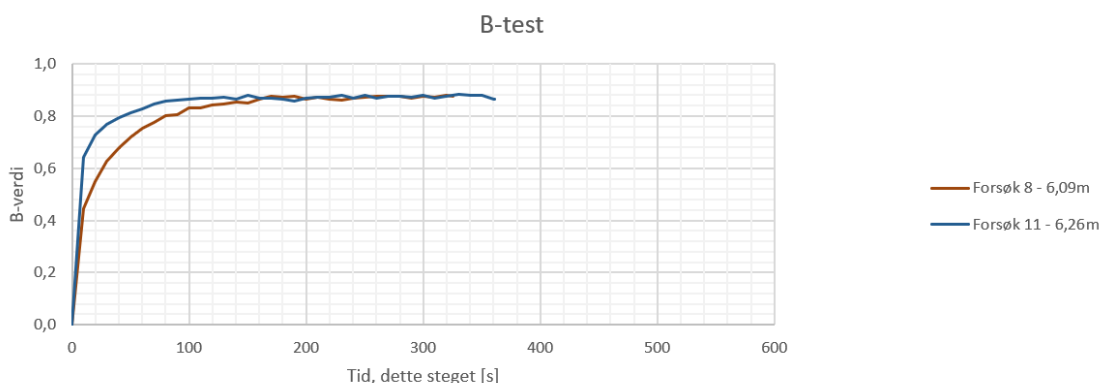
Gjenvisning av figur 3.16

Styrkeparametrene funnet under forsøk 4, 9 og 10 samsvarer relativt godt. Figur 3.13 viser spenningsstiene for forsøk 4, 9 og 10 sammenstilt i ett plott. Forsøk 4 og 10 utviser en relativt lik  $s_u$  funnet til henholdsvis 53 og 56 kPa, mens forsøk 9 utviser en noe høyere  $s_u$  på 62 kPa. Figur 3.13 viser også at alle forsøkene innfaller seg langs den samme bruddlinjen. Spenningsstien ved forsøk 4 viser en svakt mer kontrakterende oppførsel før brudd sammenlignet med forsøk 9 og 10. Det lille avviket kan skyldes en forskjell i in-situ dybde for leirene brukt i forsøk 9 og 10 på omtrent 37 cm, hvor forsøk 4 er fra den grunneste leira. Denne forskjellen i dybde kan medføre en liten endring i de mekaniske egenskapene til leira som gir seg utslag i spenningsstien under forsøket. Som nevnt i kapittel 2.3.3, viser leirer en økende tendens til å kontraktere jo bløtere leira er. Dette virker ikke å være årsaken til den økte kontraktansen da forsøk 5 og 6, fra samme dybde som forsøk 4, utviser den samme kontraktansen som forsøk 9 og 10. Figur 4.1 viser forsøk 4, 5, 6, 9 og 10 plottet i samme p'-q plott.



Figur 4.1: Forsøk 1, 5, 6, 9 og 10 i samme plott for å undersøke om den økte kontraktansen i forsøk 4 viser seg i forsøk 5 og 6 som er hentet fra samme dybde. Forsøk 4, 5 og 6 er utført på leire med en midlet dybde på 5,89 meter.

Forsøk 8 og 11 ble utført med et baktrykk på 400 kPa og med varierende prosedyrer som beskrevet over. Figur 3.20 viser utviklingen av B-verdiene under B-testen for forsøk 8 og 11. Ved sammenligning av oppnådd B-verdi for forsøkene vises en stabilisering av verdien rundt 0,9 for begge forsøk. Forsøk 11, hvor rekkefølgen m-k-b-s ble fulgt, viser en raskere økning av poretrykket ved den momentane spenningsendringen enn hva forsøk 8 utviser. Dette indikerer en bedre metning av poretrykksystemet ved forsøk 11 enn ved forsøk 8.



Gjenvisning av figur 3.20

Styrkeparametrene oppnådd under forsøk 8 og 11 viser tilnærmet like verdier og det samme gjelder forløpet på spenningsstien i  $p'$ - $q$  plottene og utviklingen i  $\varepsilon$ - $q$  plottene, se figur 3.17 og 3.18. Forsøk 8 utviser et unormalt stort volum utpresset porevann. Dette antas å skyldes en lekkasje i membranen og er nøyere diskutert i vedlegg C.

Endringen av rekkefølgen på prosedyrene ga ikke et entydig svar. Ved sammenligningen av forsøk 4, 9 og 10, havner forsøk 10 som ble utført med endret rekkefølge, mellom de to andre forsøkene hvor prosedyrene ble utført i den originale rekkefølgen. Ved sammenligning av forsøk 8 og 11 opplevde forsøk 11 en raskere økning i poretrykket enn forsøk 8. Forsøk 8 og 11 stabiliserte seg så på det samme nivået rundt en B-verdi på 0,9. For å kunne konkludere med at en metode gir bedre metning enn den andre, bør det utføres flere parallelle forsøk

hvor rekkefølgen på prosedyrene er ulik slik at konklusjonen kan trekkes på et bredere resultatgrunnlag.

### **Observert endring i hastighet og volum av utpresset porevann**

Det ble også observert en forskjell i hastigheten og det totale volumet av utpresset porevann mellom forsøk 9 og 10. Både hastigheten på utpressingen av porevannet og det totale volumet utpresset porevann viste tegn til å øke ved å utføre forsøkene i rekkefølgen m-k-b-s. Det kan ikke utelukkes at forskjellen skyldes en høyere grad av prøveforstyrrelse i forsøk 10 enn i forsøk 9. Dette virker mindre troverdig da ingen hendelser forekom under trimming og innbygging av forsøk 10, samtidig som forsøk 9 ble truffet av lastcellen som diskutert i vedlegg C. Forsøk 9 og 10 ble utført på leire hentet fra eksakt samme dybde og testet parallelt i laboratoriet. Leiren benyttet under forsøk 9 og 10 utviste også en endring i partikkeldensiteten og vanninnholdet i prøven sammenlignet med de øvrige dybdene, hvilket er grunnlaget for at forsøk 4 ikke er inkludert i denne vurderingen.

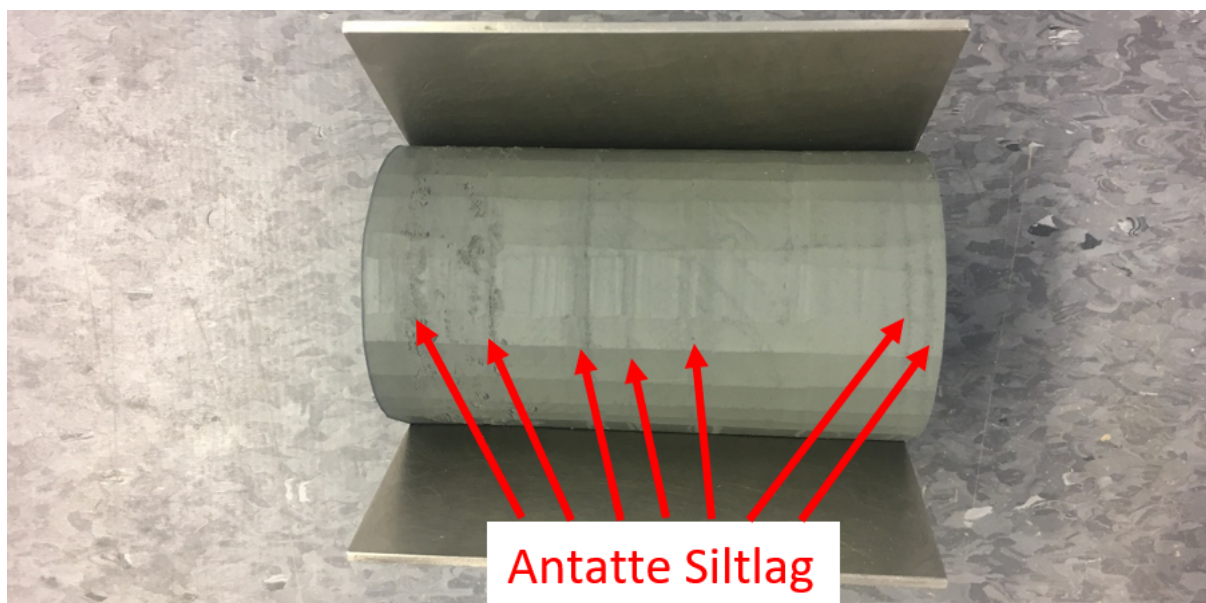
Økningen i utpresset porevann ved å utføre prosedyrene i rekkefølgen m-k-b-s ble ikke observert ved sammenligning av forsøk 8 og 11 da en antatt en lekkasje under forsøk 8 kamuflerer det egentlige forløpet og totale volumet av utpresset porevann i forsøket, se vedlegg C. For å kunne konkludere med en endring i hastighet og volum av utpresset porevann ved endret rekkefølge på prosedyrene må det også her utføres flere parallelle forsøk.

Dersom en effekt med økt hastighet og økt volum utpresset porevann kan fastsettes ved å utføre metningsfasen før konsolideringsfasen kan dette bety en redusert tidsbruk i laboratoriet.

### **4.2.3 Øvrige resultater**

Tabell 3.5 viser vanninnholdet i leiren brukt under forsøkene i denne oppgaven. Forsøkene viser et relativt jevnt vanninnhold fra 5,65 meters dybde ned til 6,15 meters dybde. Under dette, i forsøkene med en midlet dybde på 6,26 meter, kommer det frem en reduksjon i vanninnholdet. Ved å midle vanninnholdet for forsøk 1 til 8 og forsøk 9 til 11 og deretter sammenligne, finnes en reduksjon på 8,8% i vanninnholdet i leira for forsøk 9 til 11 sammenlignet med forsøk 1 til 8. Denne reduksjonen i vanninnhold kan skyldes lagdelingen i grunnen. Leira rundt 6,26 meters dybde kan være noe tettere pakket enn leira over. Leira vil da ha et lavere volum av porer, og dermed mindre plass hvor vann kan holdes i leira. Ved å sammenligne den tørre vekten funnet i forsøk 9, 10 og 11 med de øvrige forsøkene, se tabell 3.5, vises en klar forskjell. I forsøk 1 til 8 er det en gjennomsnittlig tørr vekt på 286,7 gram mot en gjennomsnittlig tørr vekt på 322,3 gram for forsøk 9 til 11. Dette underbygger mistanken om en noe tettere leire rundt 6,26 meters dybde.

Ved forsøkene utført i 6,26 meters dybde ble det oppdaget flere grovere lag med korn, antatt silt. Dette kan delvis ses på bilder lagt ved under presentasjonen av hvert individuelle forsøk i vedlegg A. De synlige lagene i forsøk 11 er markert i figur 4.2. De grovere lagene kan trolig forklare hvordan massene i denne dybden viser tegn på en mer kompakt struktur enn de overliggende massene. Grovere masser har en høyere permeabilitet enn finere masser som leire, og har trolig drenert massene i denne dybden, og på den måten bidratt til å skape en mer kompakt jordmasse enn hva som finnes i den overliggende massen.

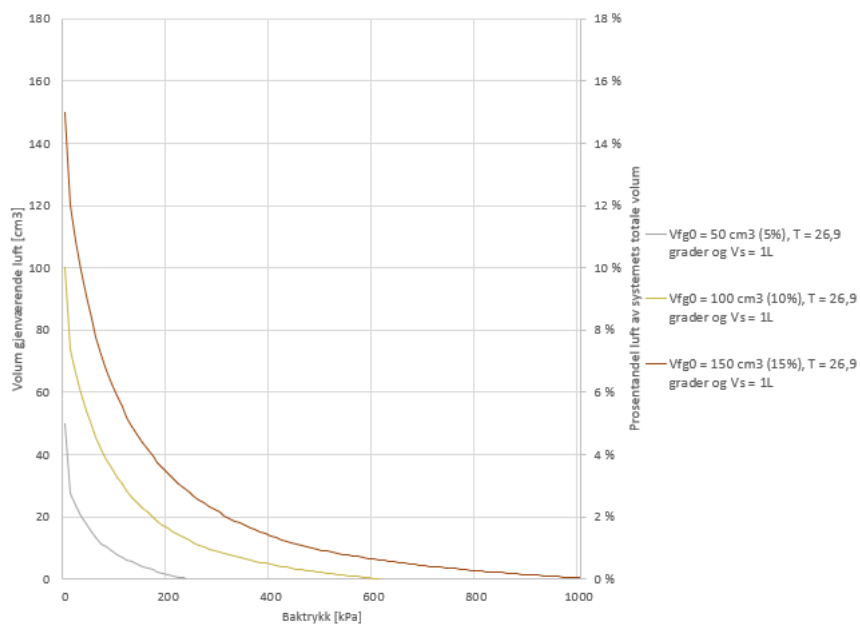


Figur 4.2: Antatte siltlag i prøven benyttet under treaksialforsøk 11. Leiren har en midlet dybde på 6,26 meter. Den tørre vekten til forsøket ble funnet til 322,23 gram og den midlede tørre vekten av forsøkene utført på denne dybden ble på 322,3 gram. Dette er 35,4 gram mer enn den midlede tørre vekten for forsøk 1-8. Vanninnholdet i prøven ble funnet til 38,71% og det midlede vanninnholdet ved 6,26 meters dybde er 38,9%. Dette er 8,8% lavere enn det midlede vanninnholdet for forsøk 1-8.

#### 4.2.4 Teoretiske endringer av luftvolum i et system utsatt for endringer i temperatur og trykk

Figur 3.25 viser resultatene av beregninger med likning 2.39 for et system med konstant temperatur lik 26,9°C utsatt for et varierende trykk. Som figuren viser opplever en eksponentiell reduksjon for det gjenværende volumet av luft ved en jevn trykkøkning. Dette er som forventet i henhold til Boyles lov. Som brattheten til de ulike kurvene viser, opplever systemene med høye initielle volumer av luft en større reduksjon av luft ved lave trykk sammenlignet med systemene med lavere initielle volum av luft. Kurvene flater ut med økende trykk og med mindre enn 2% luft i systemet øker det nødvendige trykket for å løse opp en prosent luft betraktelig. For å løse opp all luft i systemet, og dermed skape et vannmettet system, viste beregningene en økning i nødvendig trykk med økende initielt volum luft. Ved sammenligning av systemer med henholdsvis 5%, 10% og 15% volum initiell luft, som vist i figur 4.3, blir det også tydelig at den nødvendige trykkøkningen for å skape et vannmettet system øker per enhet ekstra initiell luft i systemet.

Figur 3.26 viser resultatene av beregninger med likning 2.39 der beregningene ble utført ved varierende trykk og varierende temperatur, presentert ved to initielle volumer med luft i systemet. Som for beregningene utført kun med trykkendringer, viser resultatene her en eksponentiell reduksjon med økende trykk. Ved lave trykk utviste resultatene små eller ingen forskjeller i volumet av luft i gassform for de to temperaturessene undersøkt. Forskjellen viste seg å være økende ved økende påført trykk i systemet som kunne forventes basert på Dalmolin et.al [30] sine resultater. Resultatene presentert i figur 3.26 viser også en tendens til økende effekt av temperatur reduksjonen på det oppløste volumet av luft ved økende initielt volum av luft i systemet. Et luftfritt system kan dermed oppnås ved lavere trykk der temperaturen i systemet også er lavere.



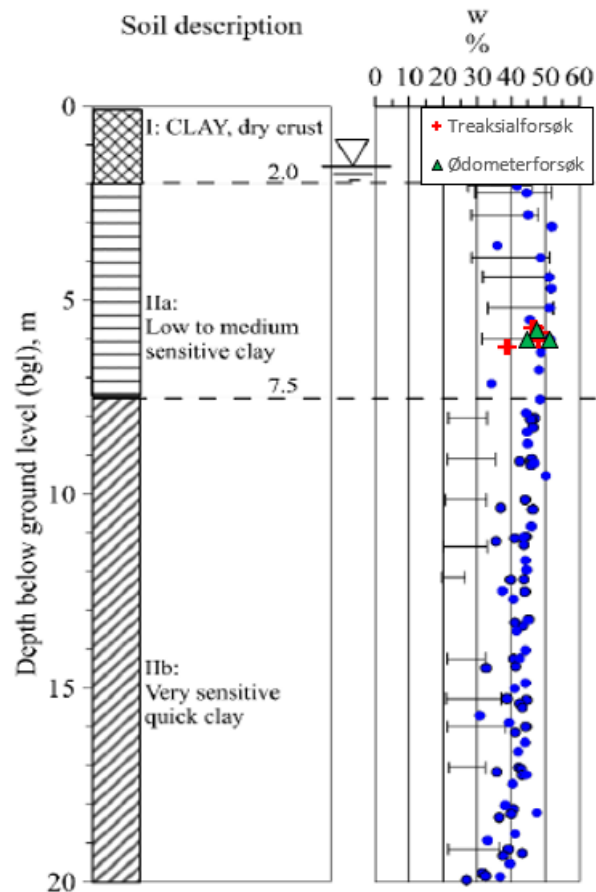
Figur 4.3: Sammenligning av nødvendig trykk for fullstendig vannmetning av et system med henholdsvis 5%, 10% og 15% initielt volum luft. Nødvendig trykk for å oppnå 100% vannmetning er henholdsvis 240 kPa, 620 kPa og 1040 kPa for de viste prosentandelene initiell luft. Forskjellen i trykk for å oppnå 100% vannmetning av systemet er 380 kPa mellom 5% og 10% initiell luft i systemet. Mellom 10% og 15% initiell luft i systemet er den tilsvarende trykkøkningen 420 kPa.

### 4.3 Forsøkernes relevans

Her vil forsøksresultatene fra de utførte forsøkene vurderes opp mot resultatene i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

#### 4.3.1 Vanninnhold

Figur 4.4 sammenligner vanninnholdet til leira brukt under treaksial- og ødometerforsøkene utført i denne oppgaven med vanninnholdet funnet i [2]. På en generell basis samsvarer vanninnholdet funnet i denne oppgaven godt med resultatene i [2]. Avviket i 6,26 meters dybde er ikke vist i [2], men dette kan være et mindre lag med endrede egenskaper som ikke ble oppdaget. Avviket kan også skyldes feilkalkulasjoner i denne oppgaven, men dette virker ikke å være tilfellet da avviket i vanninnhold viste seg gjeldende for alle tre forsøk utført i denne dybden.



Figur 4.4: Sammenligning av vanninnholdet for prøvene benyttet til treksial- og ødometerforsøkene i denne oppgaven med vanninnholdet funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra [2] er markert som blå sirkler, og figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.13 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

### 4.3.2 Spenningshistorikk

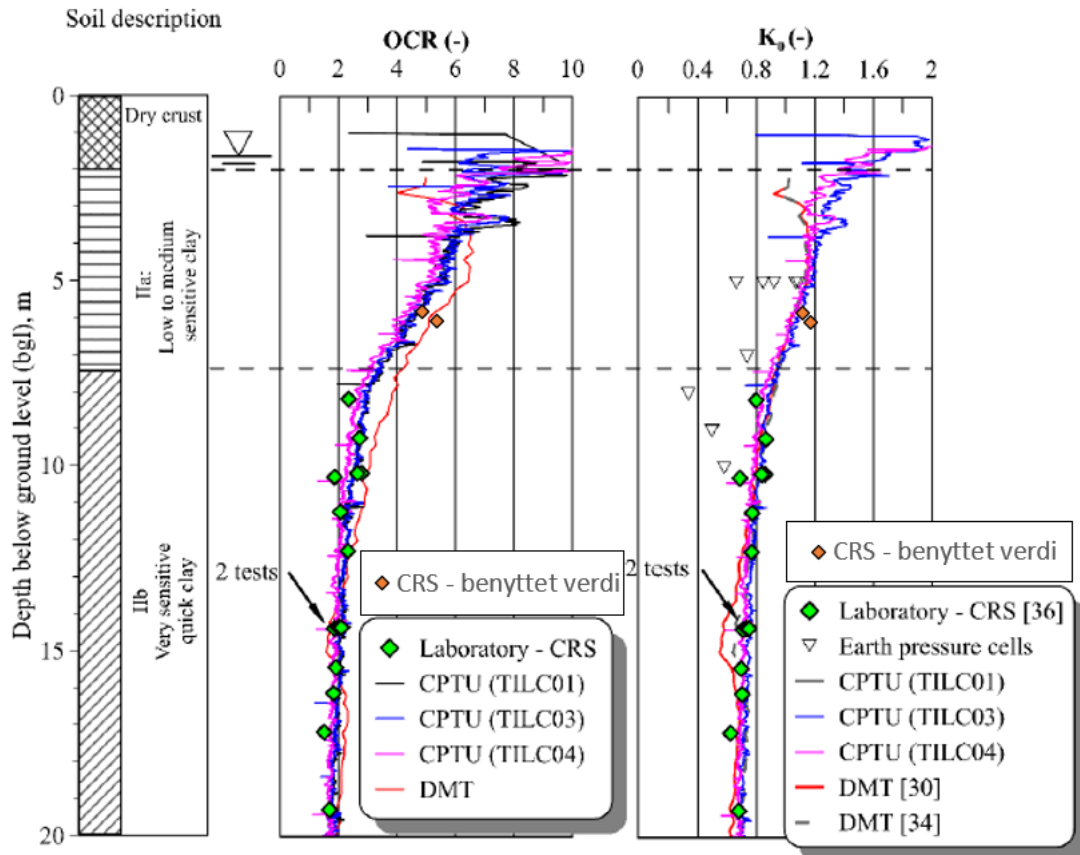
Figur 4.5 sammenligner verdiene for OCR og  $K_0$  funnet i denne oppgaven med verdiene funnet i [2]. Figuren viser OCR og  $K_0$  funnet i ødometerforsøk 1 og 3 ved dybdene til de respektive leirene ødometerforsøkene ble utført på. Resultatene fra ødometerforsøk 2 er ikke presentert da de ikke var tolkbare som følge av en kraftig forstyrrelse for prøven under innbyggingsfasen. Forstyrrelsen er beskrevet nærmere i vedlegg C.

Resultatene fra ødometerforsøk 1 viser godt samsvar med CPTU resultatene både når det gjelder OCR og  $K_0$ . Ødometerforsøkene utført i [2] for det sensitive og kvikke laget mellom 7,5 og 20 meters dybde samsvarer godt med CPTU resultatene. Relevansen til forsøkene i denne oppgaven vil derfor vurderes med utgangspunkt i resultatene fra CPTU sonderingene. Forsøk 1 kan på det grunnlaget antas å gjenspeile spenningshistorikken i bakken med en god nøyaktighet.

Resultatene fra ødometerforsøk 3 avviker noe fra CPTU resultatene både for OCR og  $K_0$ . Dette er et resultat av at prekonsolideringsspenningen ved dette ødometerforsøket ble vurdert for høy. Poretrykkutviklingen fra ødometerforsøk 1 var trolig ikke tilsvarende den eksakte poretrykkutviklingen i ødometerforsøk 3, noe om vil ha resultert i en ukorrekt effektivspenning ved  $p'_c$ . Dersom det faktiske poretrykket i ødometerforsøk 3 var høyere enn det benyttede fra ødometerforsøk 1, vil den faktiske effektivspenningen i ødometerforsøk 3 være lavere, og



OCR og  $K_0$  vil samsvare bedre med CPTU sonderingene i [2]. Samtidig ville bruk av korrekt underhydrostatisk poretrykk, og ikke et antatt hydrostatisk poretrykk, resulterte i en høyere in-situ vertikalspenning som ville senket verdien av OCR og  $K_0$ . Det må på dette grunnlaget derfor antas at resultatene i ødometerforsøk 3 ikke klarer å gjenspeile de faktiske forholdene i bakken.

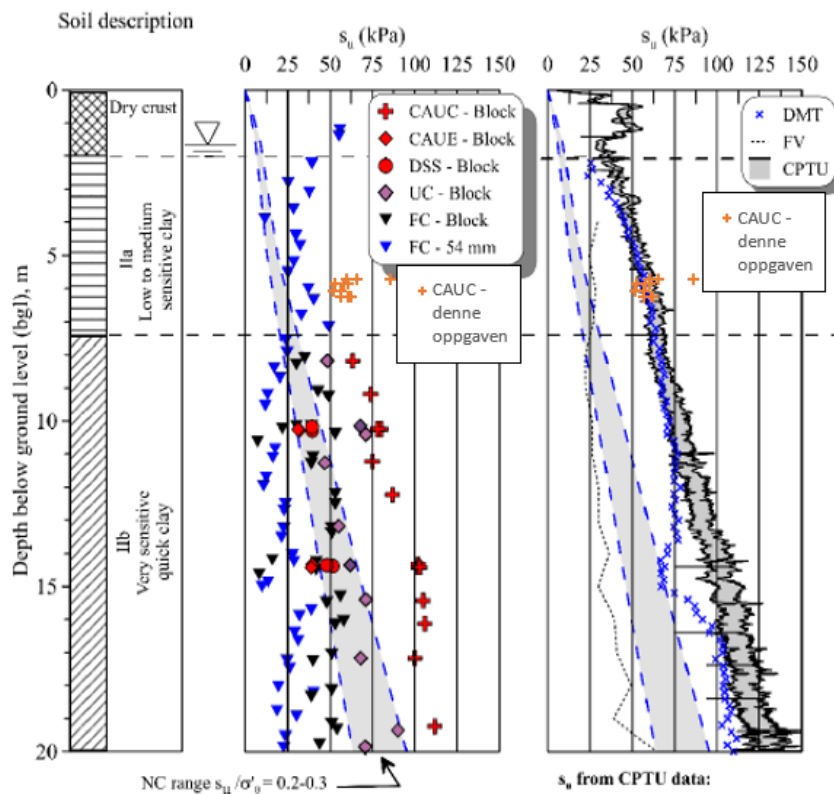


Figur 4.5: Sammenligning mellom OCR og  $K_0$  funnet ved CRS forsøk i denne oppgaven med verdiene for OCR og  $K_0$  i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Kun OCR funnet i ødometerforsøk 1 og 3 er fremstilt i denne figuren da det var disse verdiene som ble benyttet under forsøkene. Verdiene for OCR og  $K_0$  er her vist for dybden til ødometerforsøk 1 og 3. Verdiene for OCR og  $K_0$  i treaksialforsøkene vil være tilnærmet like som for ødometerforsøkene. Å plote verdiene for alle treaksialforsøkene ville skapt et lite rot av data og ble derfor ikke gjort. Figuren med resultatene fra NGTS er hentet fra s.25 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

### 4.3.3 Stykkeparametre

Figur 4.6 sammenligner de oppnådde resultatene for denne oppgaven med både skjærstyrke oppnådd under laboratorietesting som vist til venstre i figuren, og skjærstyrke oppnådd ved feltundersøkelser som vist til høyre. Som nevnt under presentasjonen av resultatene i [2], samsvarte skjærstyrkene funnet ved CAUC forsøk, CPTU og DMT sonderinger meget godt i det sensitive og kvikke laget mellom 7,5 og 20 meters dybde. Resultatene i denne oppgaven viser også veldig godt samsvar med resultatene fra CPTU og DMT sonderinger, hvilket kan ses til høyre i figur 4.6, og forsøkene antas derfor å gjenspeile forholdene på Tiller-Flotten på en god måte. Som forventet har CAUC forsøkene en noe høyere skjærstyrke enn konusforsøkene utført på 54mm sylinderprøver, hvilket er de eneste laboratorieundersøkelsene utført på leire i det lite til middels sensitive leirlaget mellom 2

og 7,5 meters dybde.



Figur 4.6: Skjærstyrken funnet under de utførte forsøkene sammenlignet med skjærstyrkeprofilene presentert i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Forsøk 2 avviker fra de øvrige resultatene i denne oppgaven og har en skjærstyrke på rundt 85 kPa. Figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.37 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

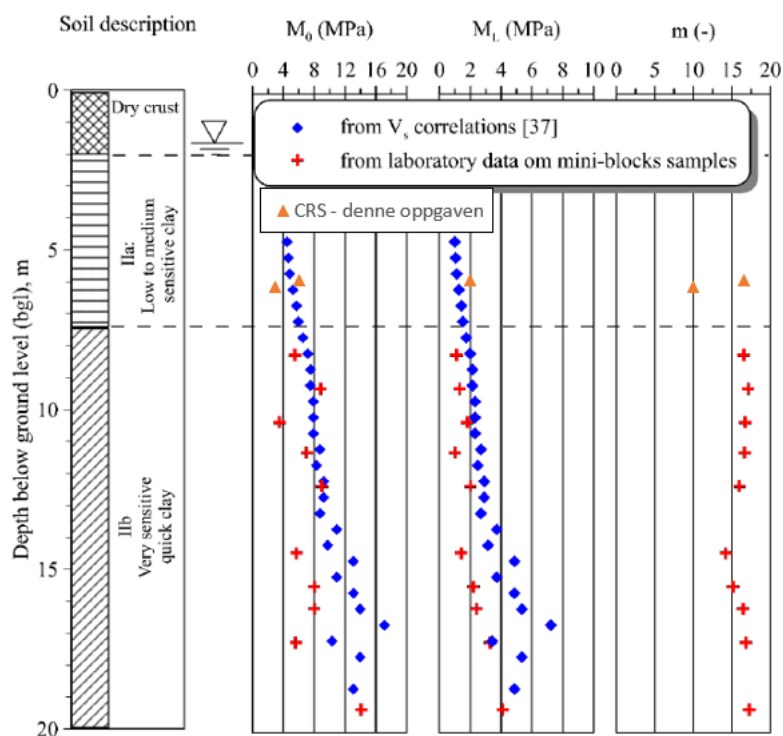
De drenerte styrkeparametrene ble funnet ved en sammenstilling av alle de utførte forsøkene i  $p'$ - $q$  og NTNU plott. Attraksjonen ble funnet lik 0 kPa og friksjonsvinkelen ved en stabil tilstand under store deformasjoner ble funnet til 33 °. [2] konkluderte med en attraksjon på 5 kPa og en friksjonsvinkel på 29-32 °. De drenerte styrkeparametrene i [2] er kun funnet for det sensitive, kvikke leirlaget fra 7,5 til 20 meters dybde. Det vil derfor være naturlig å forvente ulike resultater ved sammenligning med parametre funnet i det middels til lite sensitive laget mellom 2 og 7,5 meters dybde som er relevant i denne oppgaven. Friksjonsvinkelen funnet i denne oppgaven er dog ikke langt unna og ligger så vidt over den øvre terskelverdien funnet i [2]. Mangelen på attraksjon er vanskeligere å forklare da leire er klassifisert som en kohesjons- eller attraksjonsjordart. Dette innebærer at leire stort sett alltid har et negativt avvik i fra y-aksen. Jo stivere leiren blir, jo høyere kan verdiene for attraksjon og friksjon forventes å være. Som figur 4.6 viser, ser man en reduksjon i leiras udrenerte skjærstyrke og dermed stivhet ved resultatene funnet i CAUC forsøk i denne oppgaven sammenlignet med den udrenerte skjærstyrken funnet i [2]. En lavere attraksjon kan derfor også forventes, se tabell 2.2, men en manglende attraksjon er uvanlig for leirer. Denne mangelen på attraksjon skyldes trolig en feilaktig plassert tolkningslinje i figur 3.1. Tolkningslinjen er ikke endret da den virker å representere de utførte forsøkene godt på en generell basis.

På tross av den manglende attraksjonen stemmer både de drenerte og spesielt de udrenerte styrkeparametrene funnet i denne oppgaven godt overens med forsøkene utført i [2]. Forsøkene anses derfor å ha god relevans.

#### 4.3.4 Setningsparametre

Figur 4.7 og 4.8 viser setningsparametrene funnet i denne oppgaven sammenlignet med setningsparametrene funnet i [2]. I den relevante dybden mellom 5,65 og 6,35 meter er det kun funnet resultater ved bruk av korrelasjon med skjærbølgehastigheter i [2] da ødometerforsøk kun ble utført i det sensitive og kvikke laget fra 7,5 meters dybde og nedover. Forsøk 2 ble, som nevnt tidligere i kapittel 3.2, kraftig forstyrret under innbyggingen. Resultatene fra dette forsøket kan dermed ikke forventes å gi et korrekt bilde av forholdene i jorden og må derfor benyttes med den ytterste forsiktighet. Resultatene fra forsøk 2 kan i figur 4.7 ses som den laveste verdien av  $M_0$  og det laveste modultallet funnet i denne oppgaven.  $M_L$  er ikke vist for forsøk 2 da verdien funnet ved tolkning i denne oppgaven anses som meget usikker, se figur 3.22. I figur 4.8 kan forsøk 2 ses som den øvre verdien for  $C_v$  funnet i denne oppgaven.

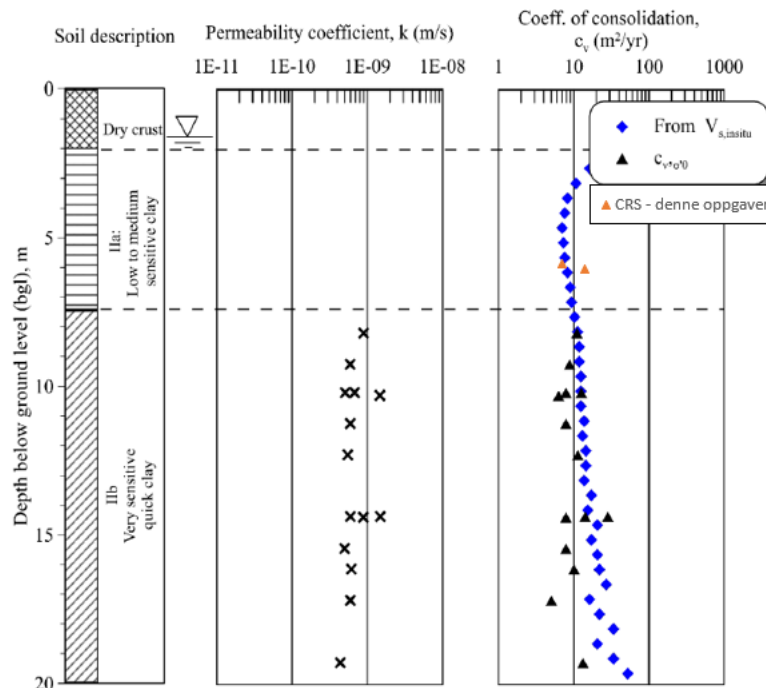
Ødometerforsøkene utført i [2] viser en tendens til å gi noe lavere verdier enn hva som er funnet ved korrelasjon mellom skjærbølgehastigheter og setningsparametrene  $M_0$ ,  $M_L$  og  $C_v$  funnet i samme rapport. Ødometerforsøkene utført i denne oppgaven kan derfor forventes å skulle gi tilsvarende lavere verdi sammenlignet med skjærbølgekorrelasjonene i [2].



Figur 4.7: Sammenligning av setningsparametrene  $M_0$ ,  $M_L$  og  $m$  funnet ved CRS forsøk i denne oppgaven med verdiene funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Kun resultatene fra forsøk 1 og 2 er presentert da disse setningsparametrene ikke var mulige å tyde i forsøk 3.  $M_L$  er kun vist for forsøk 1 da denne verdien var svært usikker ved forsøk 2. Forsøk 2 var godt forstyrret ved innbygging, som beskrevet i presentasjonen av ødometer resultatene. Parametrene fra Forsøk 2 må derfor benyttes med forsiktighet og vil ikke beskrive forholdene i leira korrekt. Resultatene fra forsøk 2 kan ses som den laveste verdien for  $M_0$  og det laveste modultallet funnet i denne oppgaven. Figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.31 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

Ødometerforsøk 1 avviker fra skjærbølgekorrelasjonene i figur 4.7 med omtrent 1 MPa. Det samme avviket gjel-

der for  $M_L$ . I begge tilfellene utviser ødometerforsøk 1 en høyere verdi enn den funnet i [2], men forskjellen er minimal. For begge parametrene er dette høyere verdier enn hva som kunne forventes basert på [2]. Modultallet  $m$  funnet i ødometerforsøk 1 viser en verdi som er tilnærmet lik gjennomsnittsverdien for  $m$  funnet i [2]. For konsolideringskoeffisienten utviser ødometerforsøk 1 en stor grad av likhet sammenliknet med resultatene funnet i [2]. På dette grunnlaget vurderes ødometerforsøk 1 til å gjenspeile de faktiske setningsegenskapene til jordmassen ganske godt.



Figur 4.8: Sammenligning av konsolideringskoeffisienten funnet ved forsøk i denne oppgaven mot verdiene funnet i NGTS rapport 20160154-20-R [2]. Resultatene fra denne studien er markert med oransje farge. Det ble ikke utført permeabilitetsforsøk på leira i denne oppgaven, og det er derfor ikke noe grunnlag for sammenligning av denne parameteren. Kun resultatene fra forsøk 1 og 2 er presentert da resultatene fra forsøk 3 var umulige å tyde, se vedlegg B. Forsøk 2 ble sterkt forstyrret under innbyggingen, som beskrevet i kapittel 3.2, og kan derfor ikke forventes å gjenspeile de faktiske forhold i bakken. Forsøk 2 kan ses som den høyeste oppnådde konsolideringskoeffisienten i denne oppgaven. Figuren med resultatene fra NGTS prosjektet er hentet fra s.32 i NGTS rapport 20160154-20-R [2].

#### 4.4 Fremtidig arbeid på området

For få forsøk ble utført med ulik rekkefølge på prosedyrene til at det kunne konkluderes med en positiv effekt ved endringer i prosedyrerekkefølgene. Det anbefales derfor å utføre flere forsøk med varierende rekkefølge på prosedyrene og ved forskjellige trykk for å få frem den eventuelle effekten dette har på metningsgraden. Det anbefales å utføre parallelle forsøk på blokkprøver hvor prosedyrene kjøres forskjellige innad i det parallelle forsøket slik at antallet variabler reduseres. For å kunne kartlegge effektene tilstrekkelig godt vil det anbefales å kjøre et uttall parallelle forsøk hvor prosedyrene endres på samme måte. Ved endringer i rekkefølgen av prosedyrene ble det også oppdaget en tendens til et høyere volum av utpresset porevann der metningsfasen ble utført i forkant av konsolideringsfasen. Dette er en effekt som bør studeres videre, parallelt med effekten på metningsgraden og som kan innebære en redusert tidsbruk i laboratoriet ved utførelsen av treaksialforsøk.

Det vil også være av interesse å utføre tilsvarende forsøk ved lavere temperaturer for å utforske og bekrefte eller avkrefte den observerte teoretiske effekten av å løse opp luft i systemer med lavere temperatur. Å studere denne effekten er en tidkrevende prosess da alt utstyr som benyttes under forsøket må kjøles ned på forhånd. Da forsøkene kom sent igang og med et begrenset antall prøver tilgjengelige ble denne effekten ikke prioritert i denne oppgaven.

Ved fremtidige forsøk vil det også anbefales å bytte ut det luftfrie vannet mellom forsøkene. Dette vil være tidkrevende, men ved å gjøre dette elimineres en ytterligere variabel i forsøkene og sammenlignbarheten på tvers av forsøkene økes.



## Kapittel 5

# Konklusjon

Det har i denne oppgaven blitt fokusert på effektene av ulike prosedyrer på den oppnådde graden av metning målt ved en B-test under treaksialforsøk på leire. Dette har blitt studert praktisk via laboratorieforsøk og via et teoretisk studie. Til utførelse av treaksialforsøkene ble det hentet opp leire ved bruk av en miniblokkprøvetaker med 160mm i diameter ved NGTS sitt prøvetakingsområde på Tiller-Flotten. Prøvene ble trimmet ut av blokkene i to høyder med tre prøver i hver høyde. Prøvene ble trimmet til en høyde på 100mm og en diameter på 54mm. Forsøkene samsvar med de kjente egenskapene på Tiller-Flotten området ble vurdert ved å sammenligne de oppnådde resultatene med kjente resultater fra NGTS prosjektet. Det teoretiske studiet benyttet Boyles lov og Henrys lov til å studere de teoretiske effektene av temperatur- og trykkendringer i et fastsatt system på volumet av gjenværende luft i systemet.

På grunn av en global pandemi våren 2020 kunne ikke det tiltenkte forsøksprogrammet utføres og nødvendige miniblokkprøver kunne ikke hentes opp. Det ble derfor utført et begrenset antall treaksialforsøk hvor enkelte bar preg av å være pilotforsøk med større og mindre feil. Ved normale forhold ville slike forsøk blitt forkastet og nye forsøk ville blitt utført hvor skader og uregelmessigheter som oppsto under håndtering og feil i utstyret hadde vært rettet opp. Tiden tillot ikke dette og resultatgrunnlaget er derfor tynt.

I henhold til teorien, og som forventet, ble det funnet en økende grad av vannmetning med økende baktrykk. En tilstrekkelig metning ble oppnådd ved 500 til 600 kPa baktrykk og dette nivået av baktrykk anses som nødvendig for å oppnå en god grad av metning på leiren fra Tiller-Flotten området. Ved sammenligning med de teoretiske resultatene tyder dette på at det initielt kan ha vært opptil 10% luft i prøven og de ulike komponentene av poretrykksystemet. Den teoretiske studien viser at det nødvendige trykket for å løse opp luft i vann øker betydelig med økende initielt volum av luft i systemet. Videre viser den teoretiske studien at dersom det initielle volumet av luft i systemet dobles, må trykket økes med mer enn det dobbelte for å løse opp luften fullstendig i vann.

Effekten på metningsgraden ved endringer i rekkefølgen på prosedyrene ga ikke grunnlag for å trekke en entydig konklusjon. Det ble observert en tendens til raskere poretrykkendring der metningsfasen ble utført i forkant

av konsolideringen, men resultatene fra forskjellige forsøk var tvetydige. Det ble også oppdaget en tendens til en raskere utpressing av porevann og utpressing av et høyere volum porevann der metningsfasen ble utført før konsolideringsfasen. Resultatgrunnlaget ble desverre ikke bredt nok til at det kunne trekkes en entydig konklusjon. Det kan på bakgrunn av manglende grunnlag heller ikke avvises at de synlige tendensene stammer fra ulikheter i jordmassen mellom de ulike nivåene leirene ble hentet fra. Det må derfor utføres flere forsøk på området slik at begge tendensene over kan bekreftes eller avkreftes på bakgrunn av et solid resultatgrunnlag fra et uttall forsøk.

Den teoretiske studien tok også for seg variasjoner i oppløsningen av luft for identiske systemer ved forskjellige temperaturer. Det ble her konkludert med at en lavere temperatur senker den nødvendige spenningen for å oppnå fullstendig vannmetning av systemet, særlig ved høyere initielle volum av luft. Konklusjonen gjelder kun for det teoretiske grunnlaget og ble ikke testet ved treaksialforsøk i denne oppgaven. For å bekrefte eller avkrefte denne effekten ved treaksialforsøk må det derfor utføres flere forsøk.



# Bibliografi

- [1] NGI, *NGTS - Nasjonale Geoforsøksfelt*, 2020. adresse: [https://www.ngi.no/Prosjekter/NGTS - Nasjonale-Geoforsoksfelt](https://www.ngi.no/Prosjekter/NGTS-Nasjonale-Geoforsoksfelt) (sjekket 02.05.2020).
- [2] J.-S. L'Heureux, A. Lindgård og A. Emdal, «The Tiller–Flotten research site: Geotechnical characterization of a very sensitive clay deposit», NGTS, 20160154-20-R, tekn. rapp., des. 2019.
- [3] Kartverket, *Norgeskart*, 2020. adresse: <https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=3&lat=7344721.25&lon=677921.54> (sjekket 03.05.2020).
- [4] NGU, *Løsmasser - Nasjonal løsmassedatabase*, 2020. adresse: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (sjekket 03.05.2020).
- [5] A. Gylland, M. Long, A. Emdal og R. Sandven, «Characterisation and engineering properties of Tiller clay», *Engineering Geology*, årg. 164, s. 86–100, 2013, ISSN: 0013-7952.
- [6] R. Sandven et al., «Tba 4110 Geotechnics, Field and Laboratory Investigations», *NTNU Geotechnical Division, Trondheim*, 2015.
- [7] E Oset et al., «Valg av karakteristisk Cua–profil basert på felt–og laboratorieundersøkelser», 2014.
- [8] Norsk Geoteknisk Forening, «Veiledning for prøvetaking», *Melding Nr*, årg. 11, 1997.
- [9] M. Bozozuk, «Effect of sampling, size, and storage on test results for marine clay», i *Sampling of soil and rock*. ASTM International, 1971.
- [10] W. Eden, «Sampler trials in overconsolidated sensitive clay», i *Sampling of soil and rock*. ASTM International, 1971.
- [11] T. Lunne, T. Berre og S. Strandvik, «Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay», i *Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics* CAPES-Fundacao Coordenacao do Aperfeicoamento de Pessoal de Nivel Superior; CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico a Tecnológico; FAPERJ-Fundacao de Ampora a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro; FINEP-Financiadora de Estudos e Projetos, 1997, ISBN: 9054108851.
- [12] Statens Vegvesen, «Laboratorieundersøkelser, Håndbok R210», *Oslo: Statens vegvesen*, s. 158–168, 2014.
- [13] «Geotekniske felt- og laboratorieundersøkelser - Laboratorieprøving av jord - Del 9: Konsolidert treaksial trykkprøving av mett jord», i *NS-EN ISO 17892-9*, 2018.

- [14] P. La Rochelle, S. Leroueil, B. Trak, L. Blais-Leroux og F. Tavenas, «Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests», i *Advanced triaxial testing of soil and rock*. ASTM International, 1988.
- [15] R. C. Hansen, M. A. Sjørusen, N. El Hadj, A. Sinitsyn, A. Instanes og K. I. V. Kvisvik, «Laboratory procedures and standards for the NGTS project», NGTS, 20160154-02-R, tekn. rapp., des. 2019.
- [16] J.-S. L'Heureux, Z. Ozkul, S. Lacasse, M. D'Ignazzio og T. Lunne, «A revised look at the coefficient of earth pressure at rest for Norwegian Clays», 2017.
- [17] O. Lepkovski, «Innflyttelse av raske trykkøkninger på resultater av treksforsøk», Thesis, 2019.
- [18] S. Poirier, D. DeGroot og T. Sheahan, «Measurement of suction in a marine clay as an indicator of sample disturbance», i *Site characterization and modeling*. 2005, s. 1–10.
- [19] K. H. Andersen, T. Lunne, T. J. Kvalstad og C. F. Forsberg, «Deep water geotechnical engineering», i *Proc. 24th Nat. Conf. of Mexican Soc. of Soil Mechanics*, 2008, s. 1–57.
- [20] Staten Vegvesen Vegdirektoratet, *Geoteknikk i vegbygging: veiledning [Håndbok V220]*. Statens Vegvesen, 2014.
- [21] S. Nordal, «TBA4116 Geotechnical Engineering Advanced Course», *Lecture notes, Insitutt for bygg- og miljøteknikk, NTNU*, 2019.
- [22] T. Lunne, T. Berre og S. Strandvik, «Sample disturbance effects in deep water soil investigations», i *Off-shore Site Investigation and Foundation Behaviour'New Frontiers: Proceedings of an International Conference*, Society of Underwater Technology, ISBN: 0906940338.
- [23] M. M. Landon, D. J. DeGroot og T. C. Sheahan, «Nondestructive sample quality assessment of a soft clay using shear wave velocity», *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, årg. 133, nr. 4, s. 424–432, 2007, ISSN: 1090-0241.
- [24] T. Okumura, «The variation of mechanical properties of clay samples depending on its degree of disturbance», i *Proc. Specialty Session on Quality in Soil Sampling, Proc. 4th Asian Reg. Conf. ISSMFE*, bd. 1, 1991, s. 73–81.
- [25] M. Jamiolkowski, R. Lancellotta og D. Lo Presti, «Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays», *Pre-failure deformation of geomaterials*, årg. 2, s. 817–836, 1995.
- [26] H. Tanaka, P. SHARMA, T. Tsuchida og M. Tanaka, «Comparative study on sample quality using several types of samplers», *Soils and foundations*, årg. 36, nr. 2, s. 57–68, 1996, ISSN: 1341-7452.
- [27] S. Donohue og M. Long, «Suction measurements as indicators of sample quality in soft clay», *Geotechnical Testing Journal*, årg. 32, nr. 3, s. 1–11, 2009, ISSN: 0149-6115.
- [28] K. Karlsrud og F. G. Hernandez-Martinez, «Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples», *Canadian Geotechnical Journal*, årg. 50, nr. 12, s. 1273–1293, 2013, ISSN: 0008-3674.

- [29] W. Henry, «III. Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, nr. 93, s. 29–274, 1803, ISSN: 0261-0523.
- [30] I. Dalmolin, E. Skovroinski, A. Biasi, M. Corazza, C. Dariva og J. V. Oliveira, «Solubility of carbon dioxide in binary and ternary mixtures with ethanol and water», *Fluid Phase Equilibria*, årg. 245, nr. 2, s. 193–200, 2006, ISSN: 0378-3812.
- [31] R. Battino og H. L. Clever, «The Solubility of Gases in Liquids», *Chemical Reviews*, årg. 66, nr. 4, s. 395–463, 1966, ISSN: 0009-2665. DOI: 10.1021/cr60242a003.
- [32] R. Sander, «Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent», *Atmospheric Chemistry and Physics*, årg. 15, s. 4399–4981, 2015.
- [33] R. F. Weiss, «Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas», *Marine chemistry*, årg. 2, nr. 3, s. 203–215, 1974.
- [34] R. F. Weiss, «The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater», i *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Elsevier, bd. 17, 1970, s. 721–735.
- [35] A. Laugier og J. Garai, «Derivation of the ideal gas law», *Journal of Chemical Education*, årg. 84, nr. 11, s. 1832–1833, 2007, ISSN: 0021-9584.
- [36] B. Pedersen, *kinetisk gassteori*, 2018. adresse: [https://snl.no/kinetisk\\_gassteori](https://snl.no/kinetisk_gassteori) (sjekket 20.04.2020).
- [37] H. Fjellvåg og M. Ystenes, *ideal gass*, 2019. adresse: [https://snl.no/ideal\\_gass](https://snl.no/ideal_gass) (sjekket 20.04.2020).
- [38] «Gassfarer og gassikkerhet», Praxair, Report, apr. 2017. adresse: [https://mitt.uib.no/files/1226523/download?download\\_frd=1](https://mitt.uib.no/files/1226523/download?download_frd=1).
- [39] E. ToolBox, «Oxygen-Density and Specific Weight.», 2018. adresse: [https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-02-density-specific-weight-temperature-pressure-d\\_2082.html](https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-02-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2082.html) (sjekket 12.05.2020).
- [40] E. ToolBox, «Nitrogen-Density and Specific Weight.», 2018. adresse: [https://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-N2-density-specific-weight-temperature-pressure-d\\_2039.html](https://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-N2-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2039.html) (sjekket 12.05.2020).
- [41] E. ToolBox, «Argon-Density and Specific Weight.», 2018. adresse: [https://www.engineeringtoolbox.com/argon-density-specific-weight-temperature-pressure-d\\_2089.html](https://www.engineeringtoolbox.com/argon-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2089.html) (sjekket 12.05.2020).



# Vedlegg

<b>B - Treksialforsøk</b>	<b>A-1</b>
<b>A - Ødometerforsøk</b>	<b>B-1</b>
<b>C - Viktige forbehold rundt forsøkene</b>	<b>C-1</b>
<b>D - Teoretiske beregninger av gjenværende volum luft</b>	<b>D-1</b>



**Tillegg A**

**Treaksialforsøk**

Forsøk	Dybde [m]	Baktrykk [kPa]	Prosedyre	Parallelle forsøk	Apparat	Kommentar
1	5,74	0	k-m-b-s	-	Høyre kjeller	Feil med poretrykkmåler
2	5,74	1000	k-m-b-s	1	Høyre kjeller	Feil med poretrykkmåler
3	5,74	11	k-m-b-s	1	Venstre kjeller	Vertikal sprekk i prøve og problemer med komputer
4	5,89	500	k-m-b-s	-	Ny lab	Luft funnet i poretrykkmåler
5	5,89	1000	k-m-b-s	2	Venstre kjeller	-
6	5,89	305	k-m-b-s	2	Ny lab	-
7	6,08	600	k-m-b-s	3	Venstre kjeller	-
8	6,08	403	k-m-b-s	3	Ny lab	Mulig lekkasje i membran
9	6,26	500	k-m-b-s	4	Venstre kjeller	Lastcelle traff prøve under innbygging
10	6,26	500	m-k-b-s	4	Ny lab	-
11	6,26	400	m-k-b-s	-	Ny lab	-

Oversikt over teaksialforsøkene.

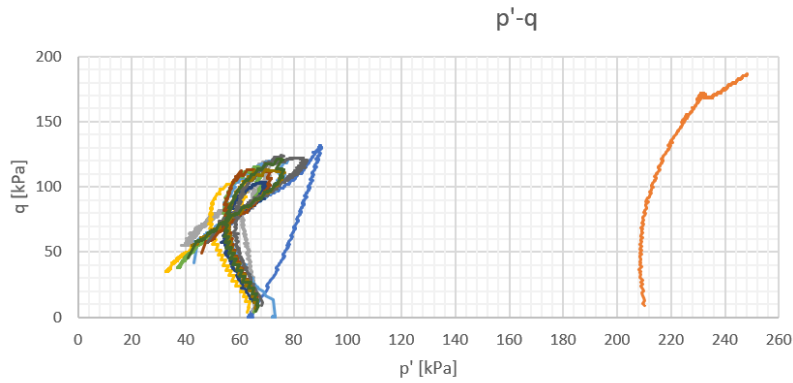


## Spenningsforhold under treksialforsøk

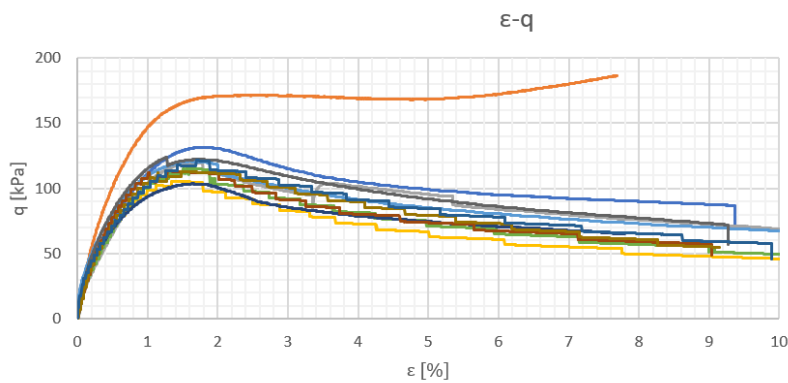
Forsøk	Dybde [m]	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	$p'_c$ [kPa]	OCR	$K_0$	$\sigma'_m$ [kPa]
1-3	5,74	60,68	300	4,94	1,12	65,6
4-6	5,89	61,73	300	4,86	1,11	66,3
7-8	6,09	63,06	340	5,39	1,17	70,2
9-11	6,26	64,32	340	5,29	1,16	71,2

Spenningsforhold under treksialforsøkene.

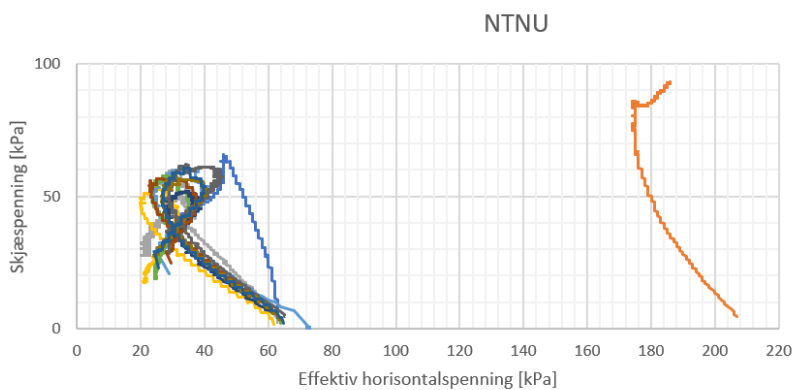
# Sammenstilling av treksialforsøk



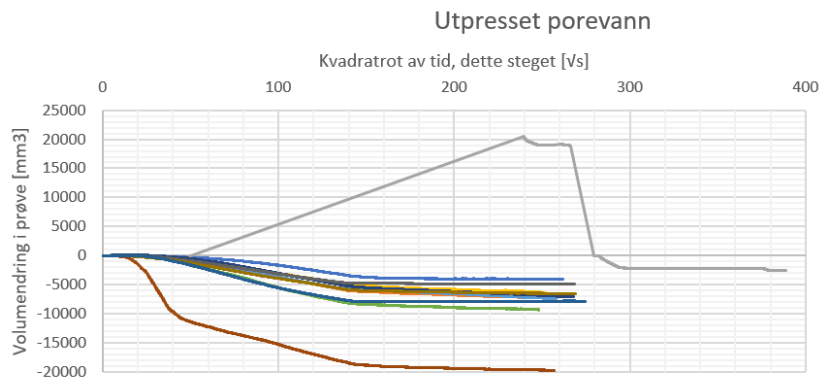
- Forsøk 1 - 5,74m
- Forsøk 2 - 5,74m
- Forsøk 3 - 5,74m
- Forsøk 4 - 5,89m
- Forsøk 5 - 5,89m
- Forsøk 6 - 5,89m
- Forsøk 7 - 6,09m
- Forsøk 8 - 6,09m
- Forsøk 9 - 6,26m
- Forsøk 10 - 6,26m
- Forsøk 11 - 6,26m



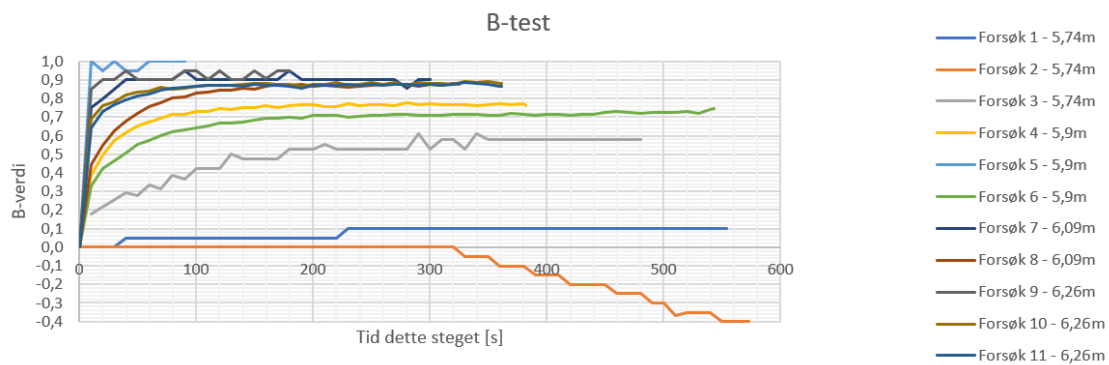
- Forsøk 1 - 5,74m
- Forsøk 2 - 5,74m
- Forsøk 3 - 5,74m
- Forsøk 4 - 5,9m
- Forsøk 5 - 5,9m
- Forsøk 6 - 5,9m
- Forsøk 7 - 6,09m
- Forsøk 8 - 6,09m
- Forsøk 9 - 6,26m
- Forsøk 10 - 6,26m
- Forsøk 11 - 6,26m



- Forsøk 1 - 5,74m
- Forsøk 2 - 5,74m
- Forsøk 3 - 5,74, m
- Forsøk 4 - 5,89m
- Forsøk 5 - 5,89m
- Forsøk 6 - 5,89m
- Forsøk 7 - 6,09m
- Forsøk 8 - 6,09m
- Forsøk 9 - 6,26m
- Forsøk 10 - 6,26m
- Forsøk 11 - 6,26

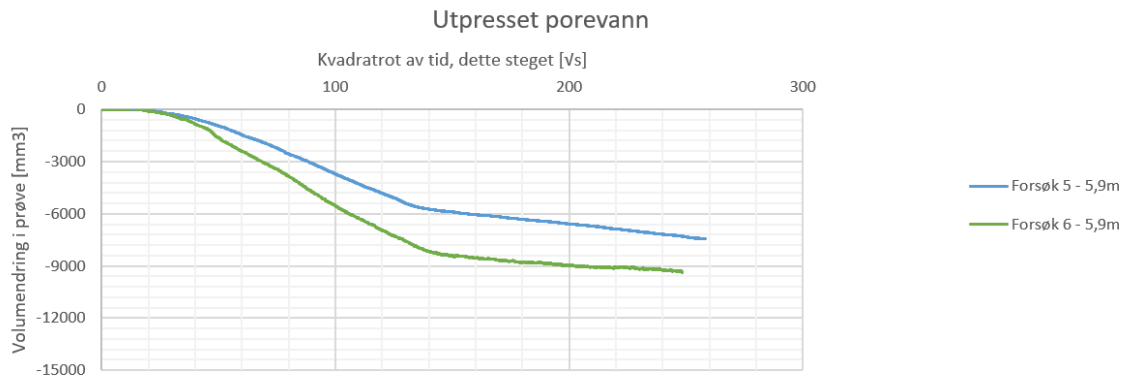
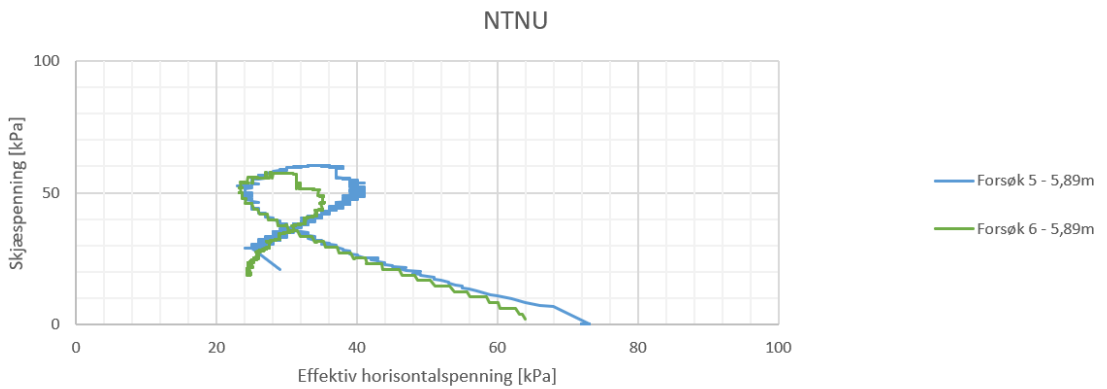
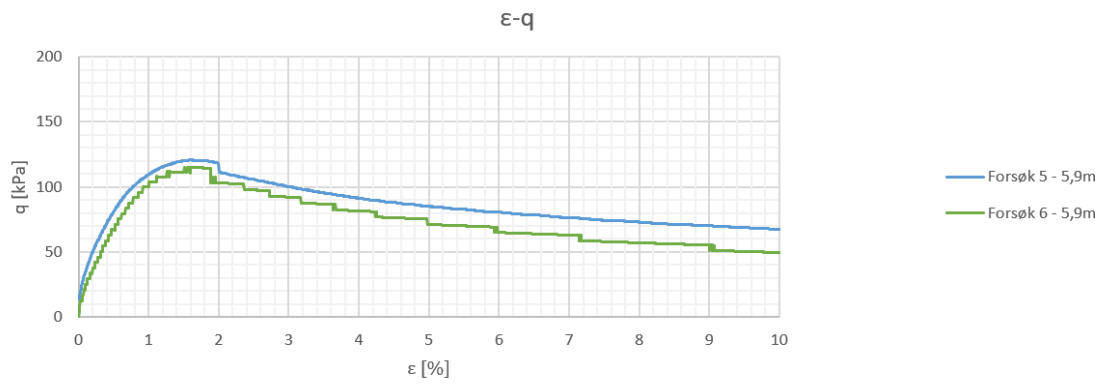
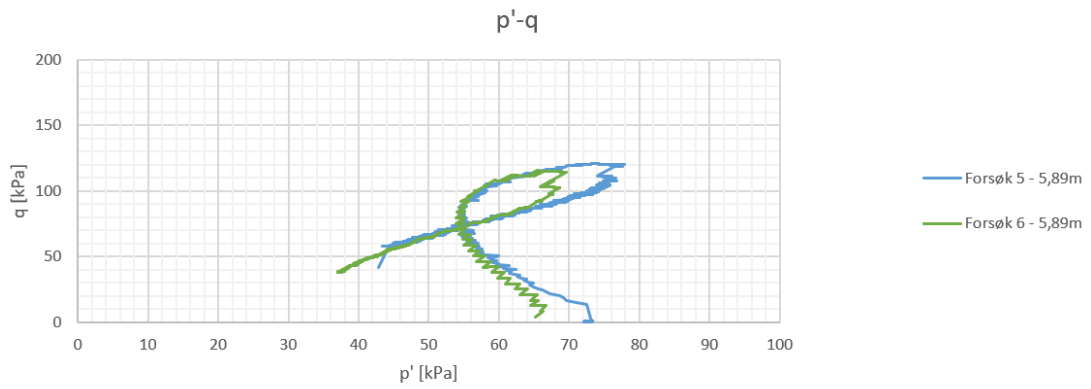


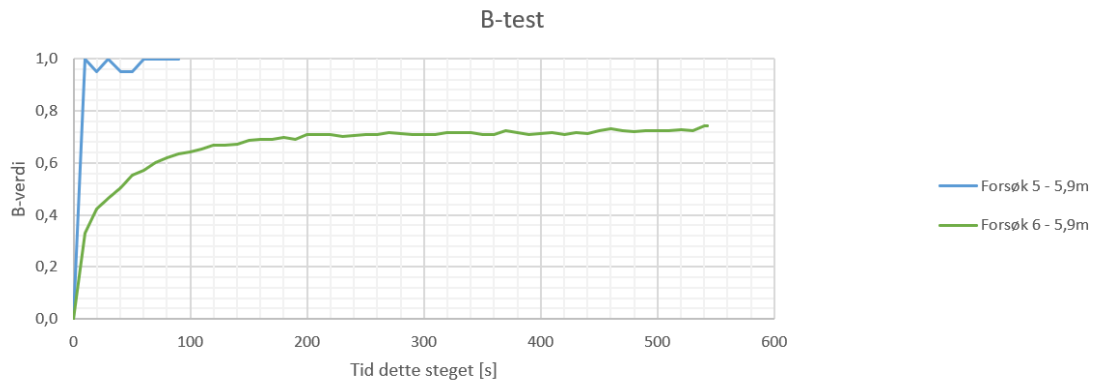
- Forsøk 1 - 5,74m
- Forsøk 2 - 5,74m
- Forsøk 3 - 5,74m
- Forsøk 4 - 5,9m
- Forsøk 5 - 5,9m
- Forsøk 6 - 5,9m
- Forsøk 7 - 6,09m
- Forsøk 8 - 6,09m
- Forsøk 9 - 6,26m
- Forsøk 10 - 6,26m
- Forsøk 11 - 6,26m



Figurene viser sammenstilling av forsøksresultatene fra denne studien i p'-q plott,  $\epsilon$ -q plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdiene ved B-tester.

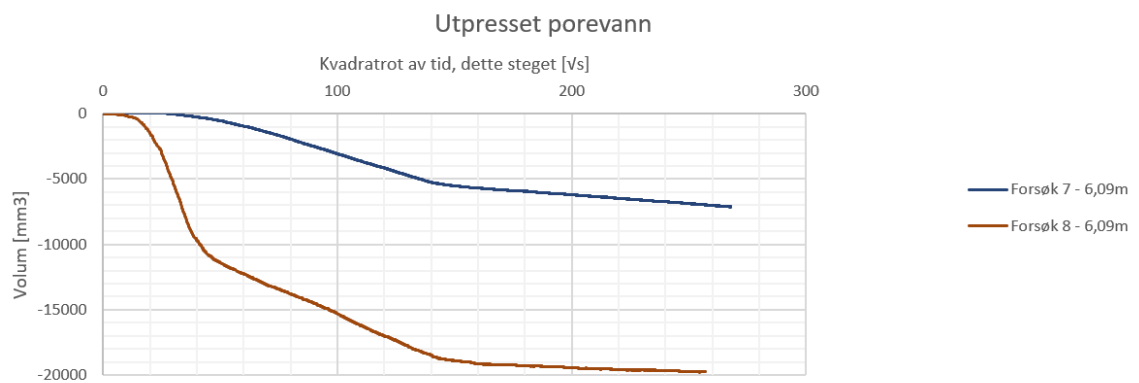
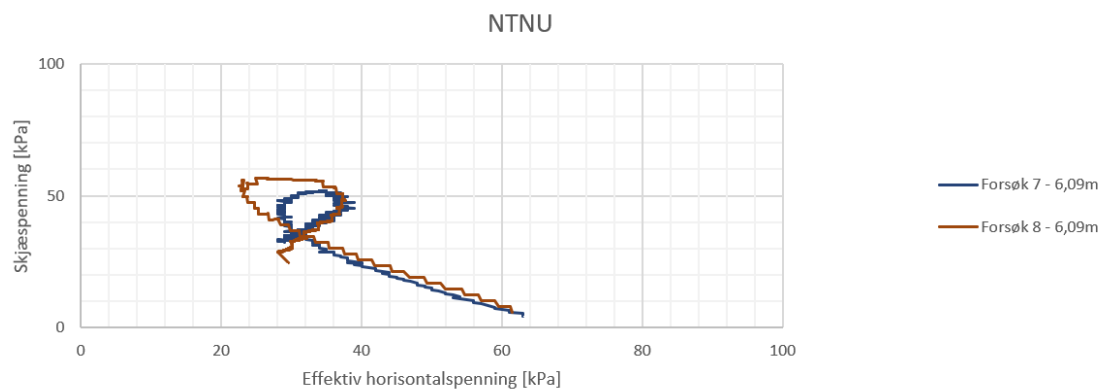
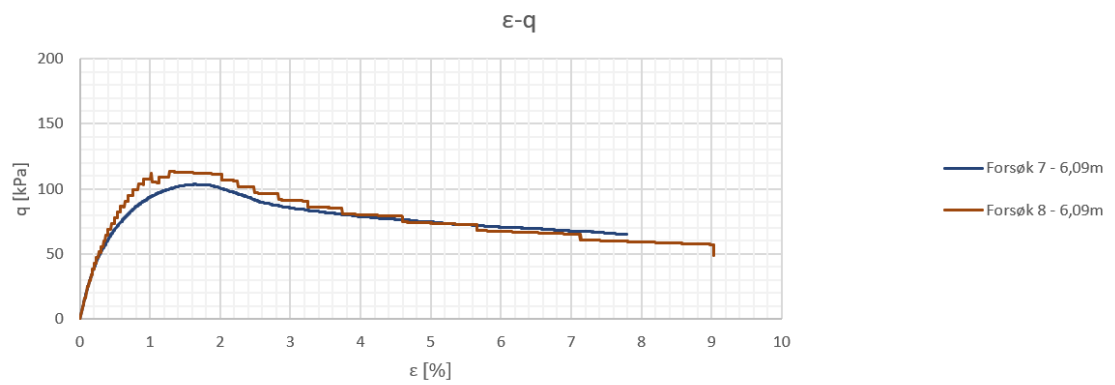
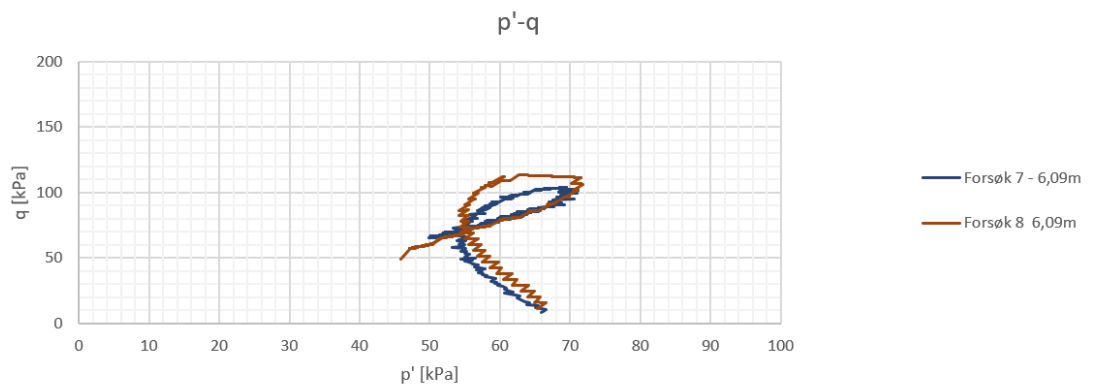
# Treaksialforsøk 5 og 6

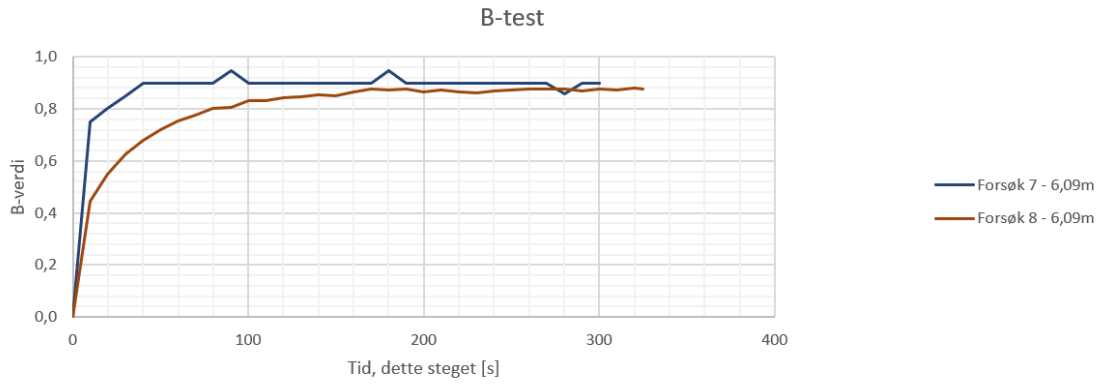




Sammenligning av forsøk 5 og forsøk 6 i p'-q plott,  $\epsilon$ -q plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdiene ved B-tester. Forsøk 5 og 6 ble utført parallele på leire med en midlet dybde på 5,89 meter.

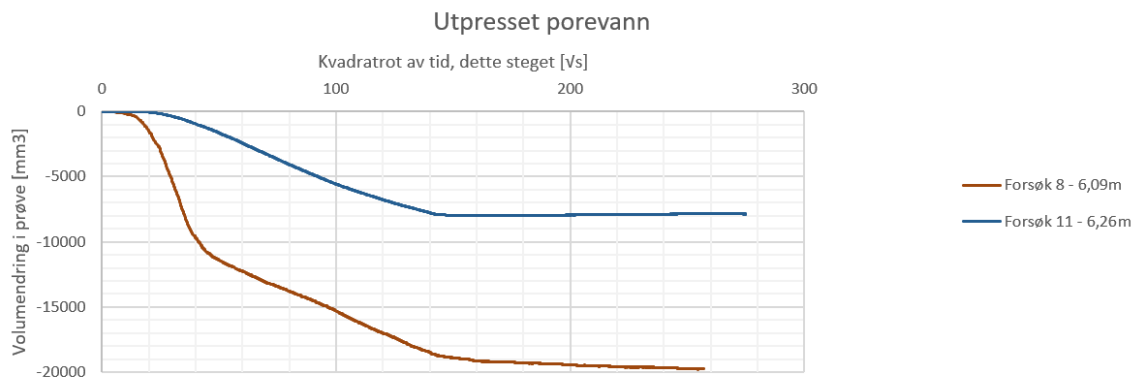
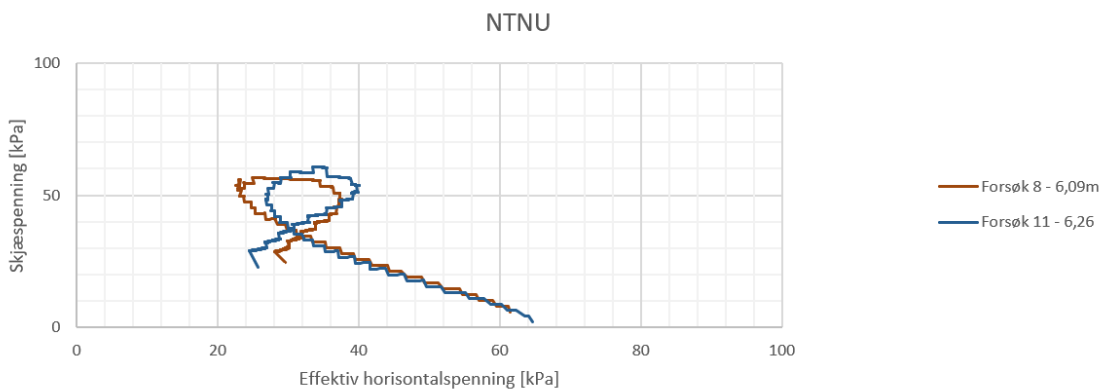
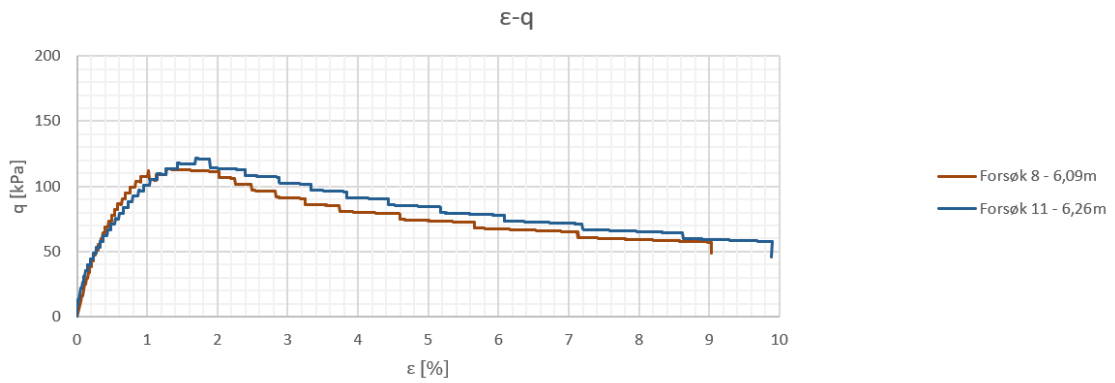
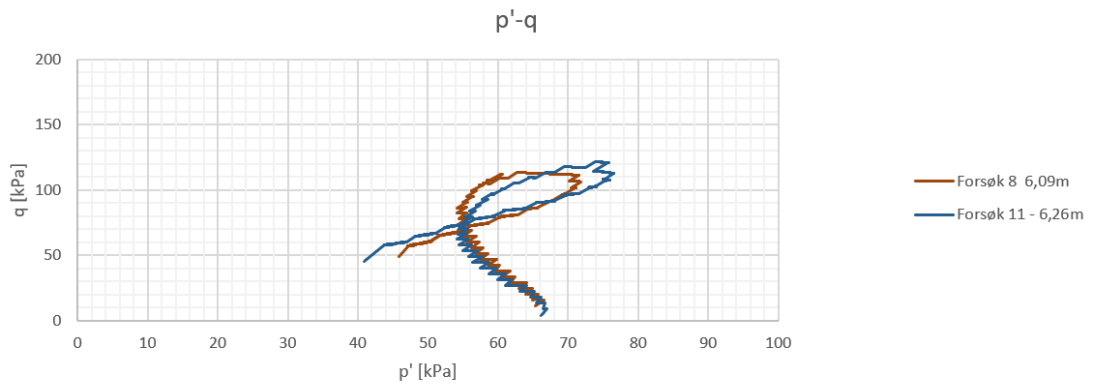
# Treaksialforsøk 7 og 8



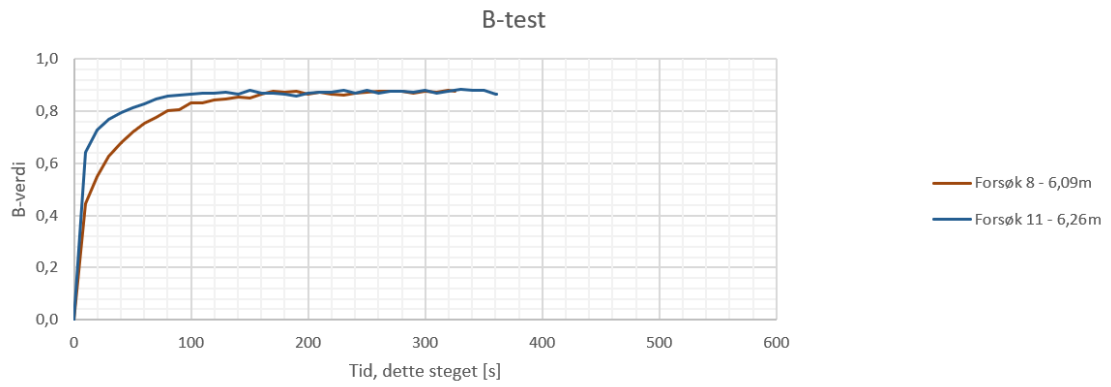


Sammenligning av forsøk 7 og forsøk 8 i p'-q plott,  $\epsilon$ -q plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdiene ved B-tester. Forsøk 7 og 8 ble utført parallellt på leire med en midlet dybde på 6,09 meter.

# Treaksialforsøk 8 og 11

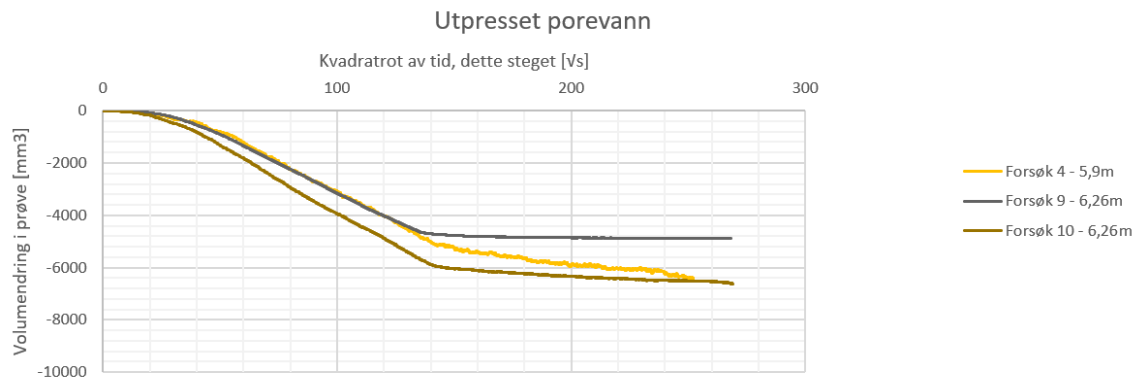
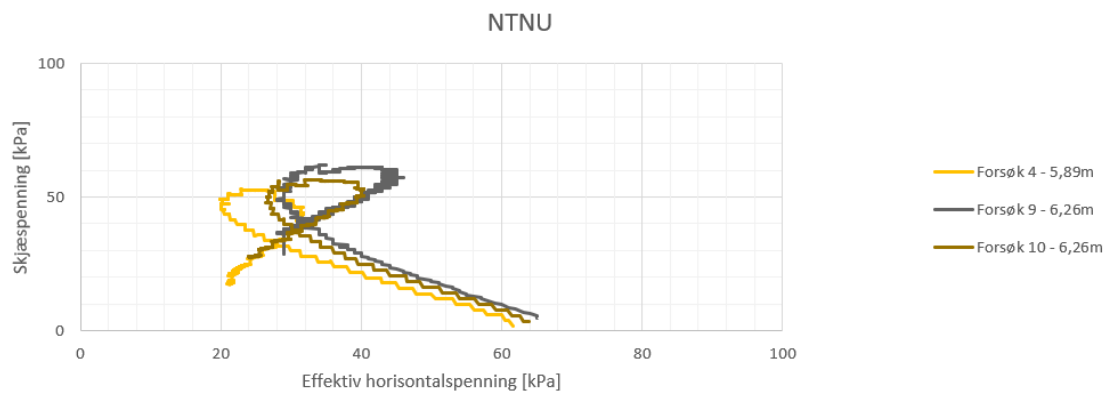
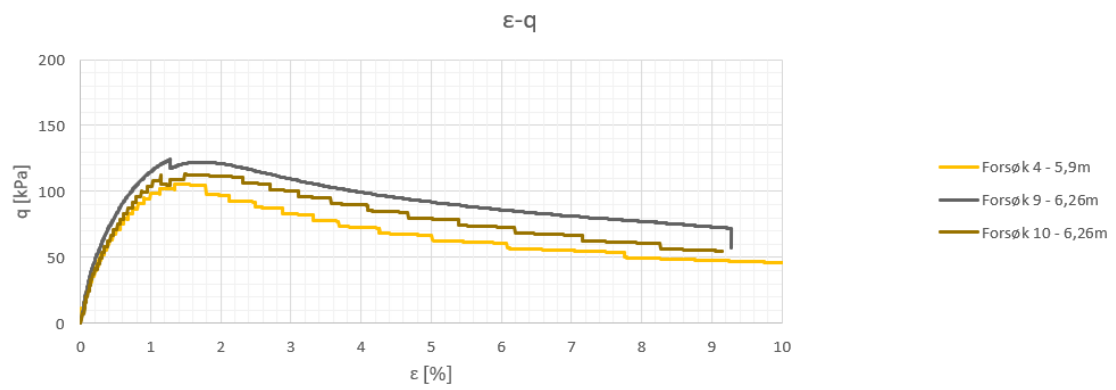
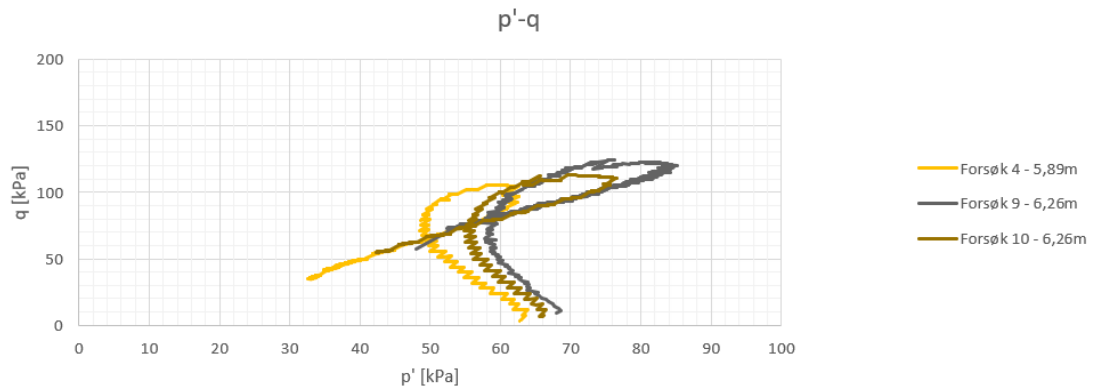


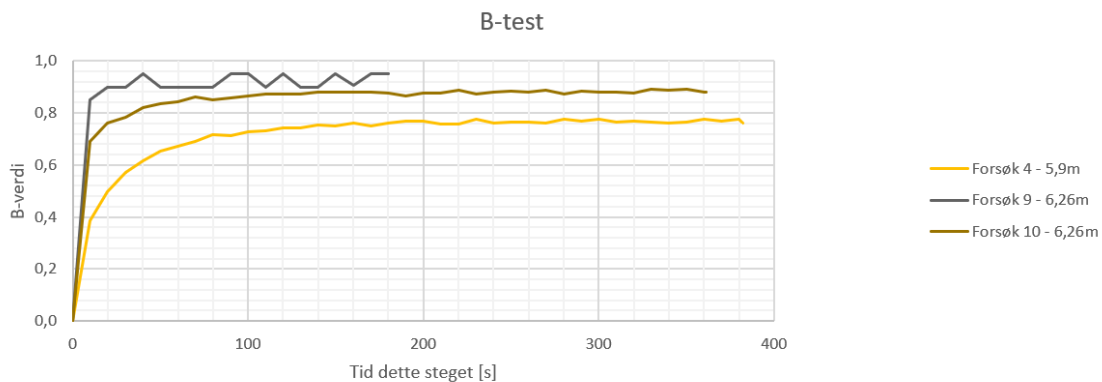




Sammenligning av forsøk 8 og forsøk 11 i  $p'$ -q plott,  $\epsilon$ -q plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdiene ved B-tester. Forsøk 8 og 11 ble ikke utført som parallelle forsøk. Forsøk 8 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,09 meter, mens forsøk 11 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,26 meter.

# Treaksialforsøk 4, 9 og 10

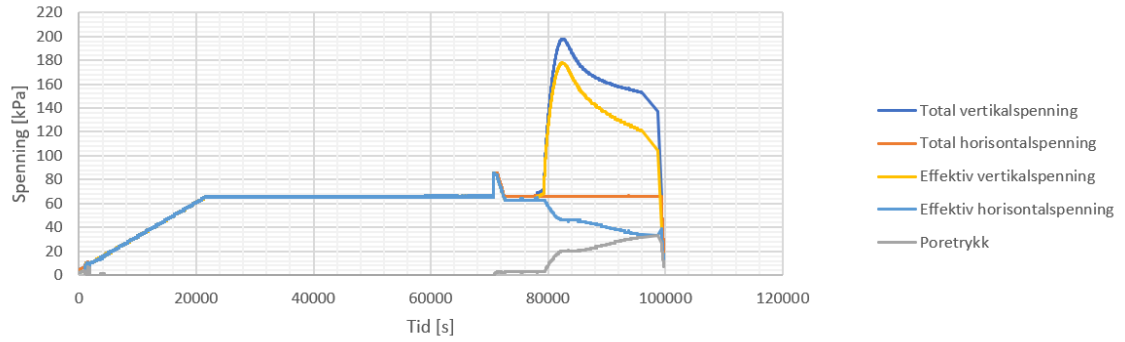




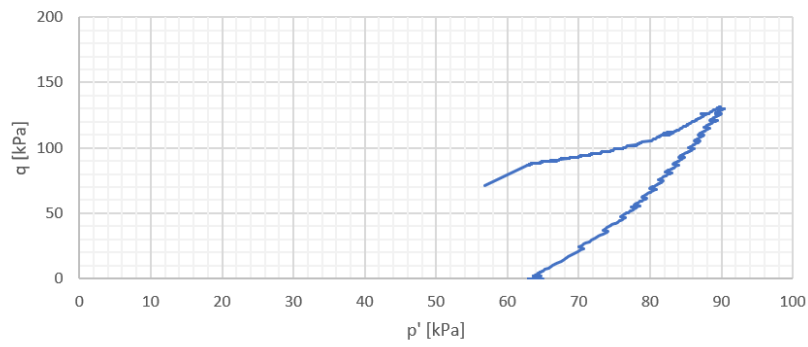
Sammenligning av forsøk 4, 9 og 10 i  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdiene ved B-tester. Kun forsøk 9 og 10 ble utført som parallelle forsøk. Forsøk 4 ble utført som et enkelt forsøk på leire med en midlet dybde på 5,89 meter. Forsøk 9 og 10 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,26 meter.

# Treaksialforsøk 1 - 5,74 meters dybde

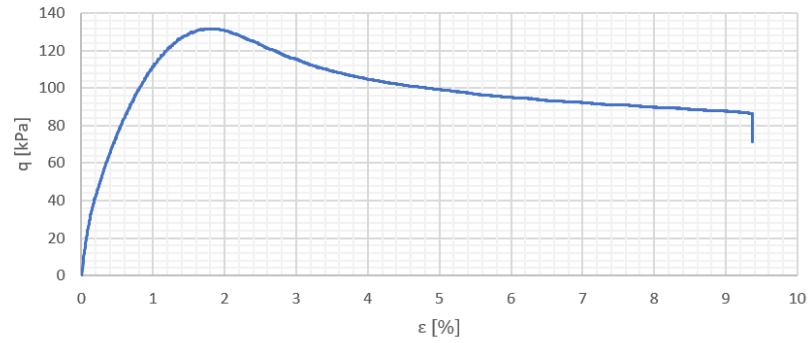
Spenningsforløp



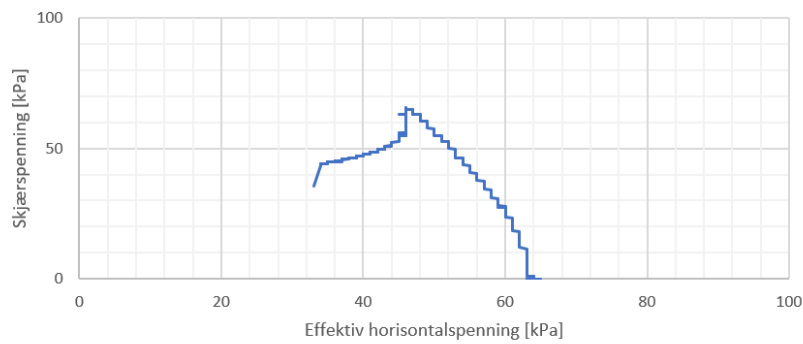
$p'-q$

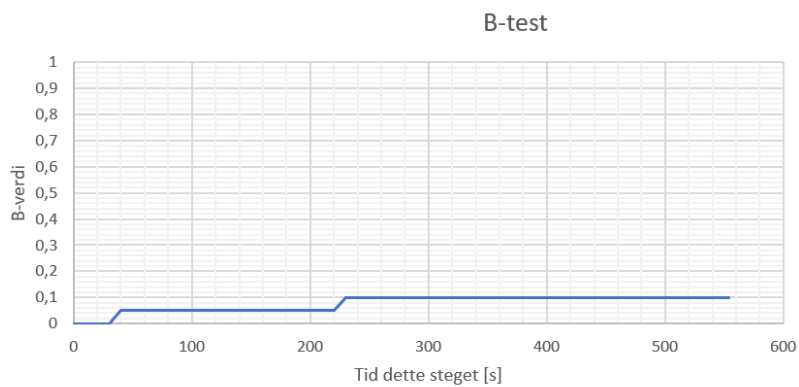
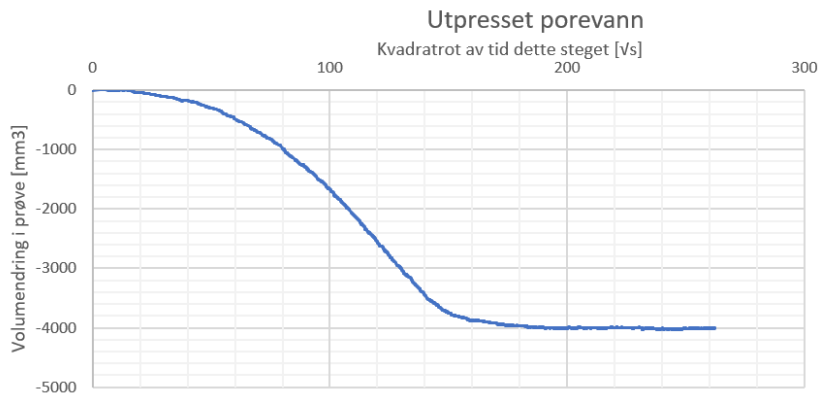


$\epsilon-q$



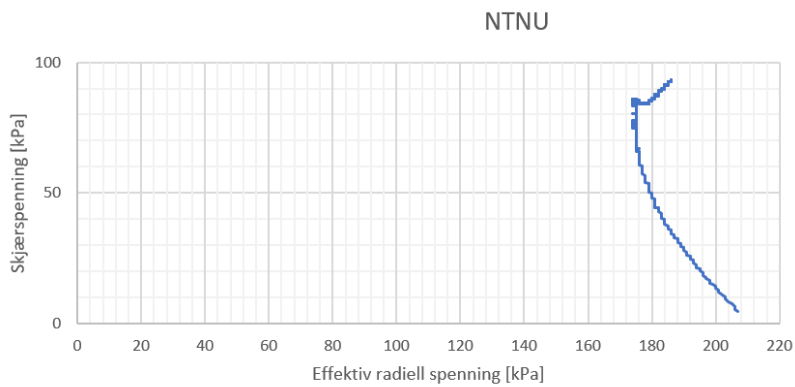
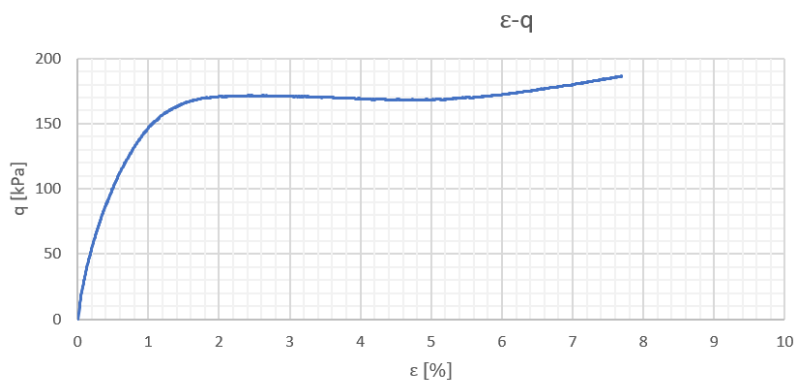
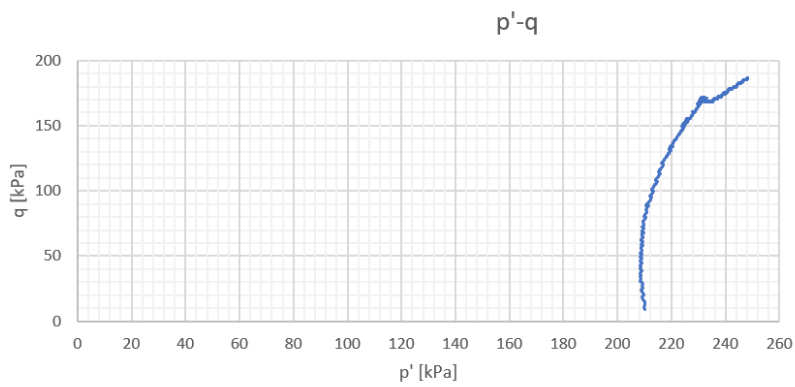
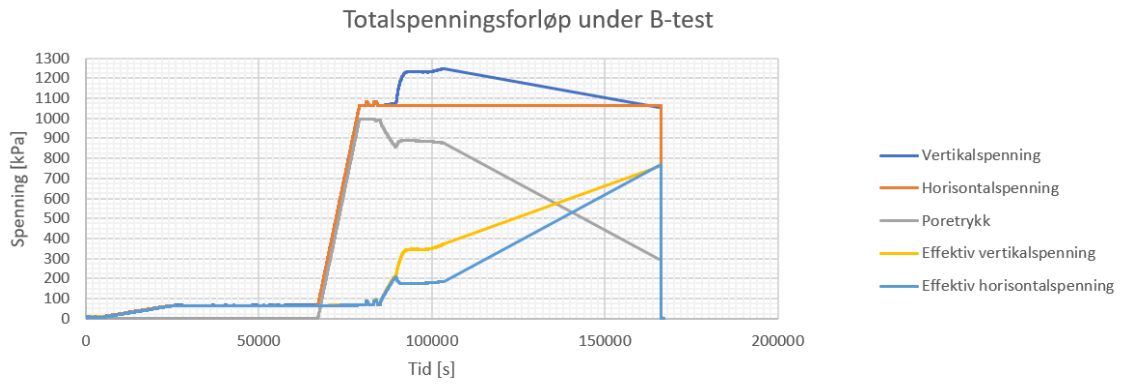
NTNU

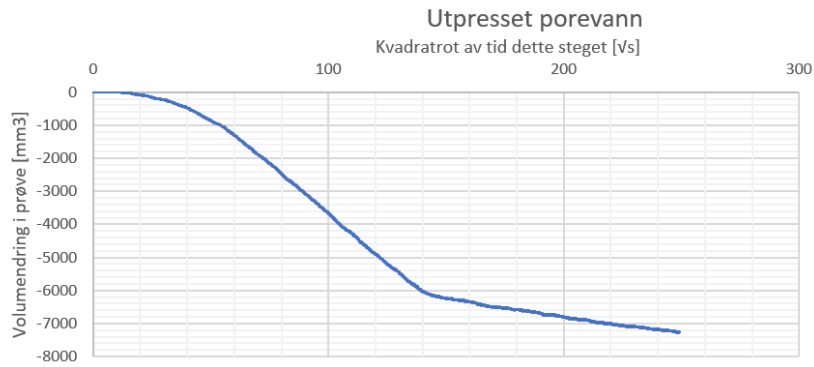




Treaksialforsøk 1 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\varepsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Forsøk 1 ble utført på leire med en midlet dybde på 5,74 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 300 kPa i ødometerforsøk 1 og den effektive middelspenningen ble funnet til 65,6 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 0 kPa. Treaksialapparatet viste seg å ha en ødelagt poretrykkmåler da uforholdsmessig lave poretrykk ble registrert. Resultatene er derfor ikke benyttet for å vurdere effektene av trykk og endret prosedyrerekkefølge..

## Treaksialforsøk 2 - 5,74 meters dybde

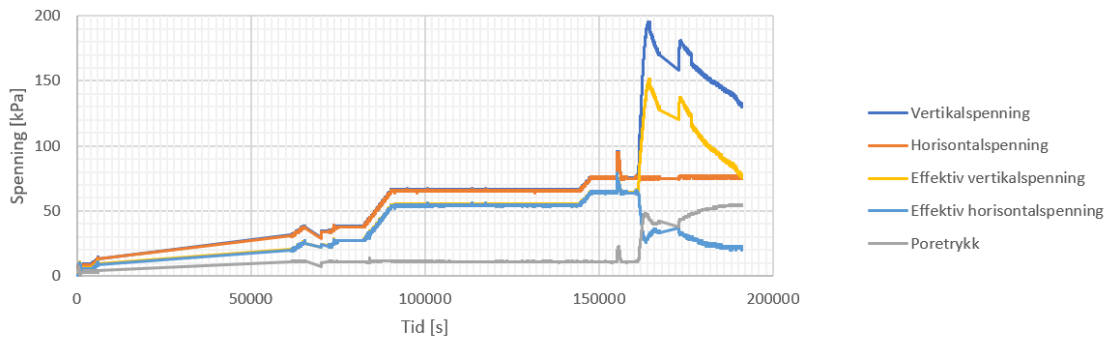




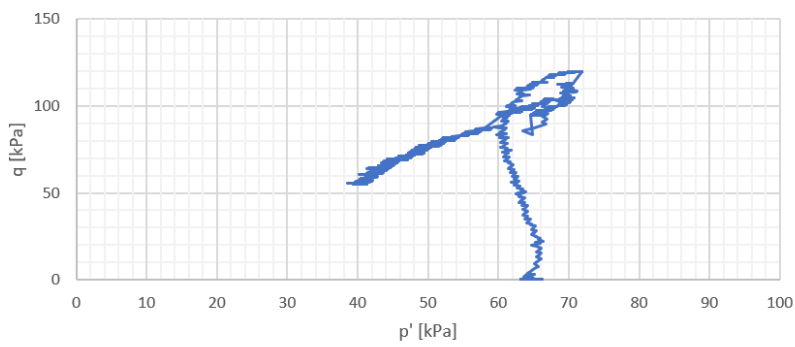
Treksialforsøk 2 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdien ved B-test. Forsøk 2 ble utført på leire med en midlet dybde på 5,74 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 300 kPa i ødometerforsøk 1 og den effektive middelspenningen ble funnet til 65,6 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 1000 kPa. Treksialapparatet viste seg å ha en ødelagt poretrykkmåler da uforholdsmessig lave poretrykk ble registrert. Resultatene er derfor ikke benyttet for å vurdere effektene av trykk og endret prosedyrerekkefølge..

# Treaksialforsøk 3 - 5,74 meters dybde

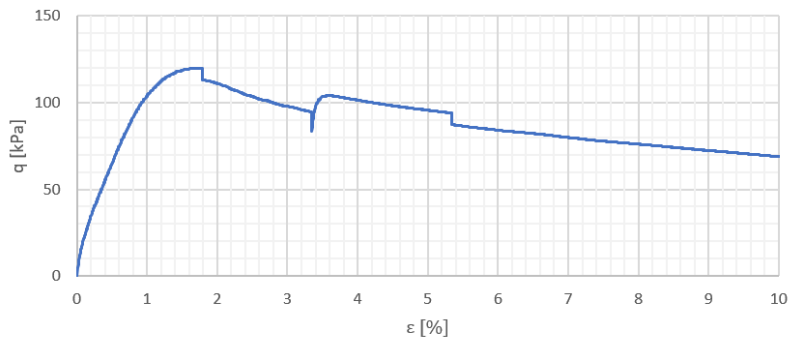
## Spenningsforløp



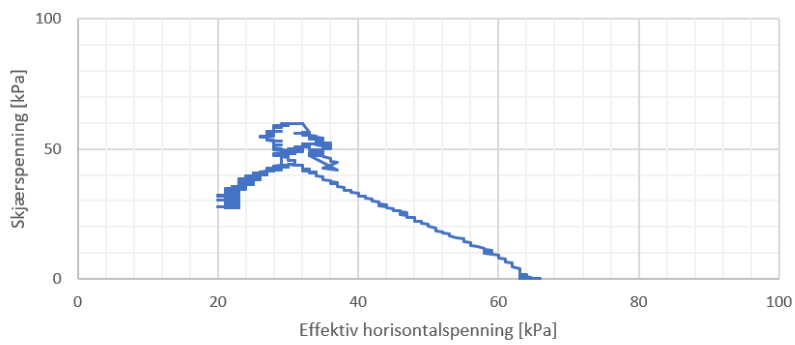
## p-q



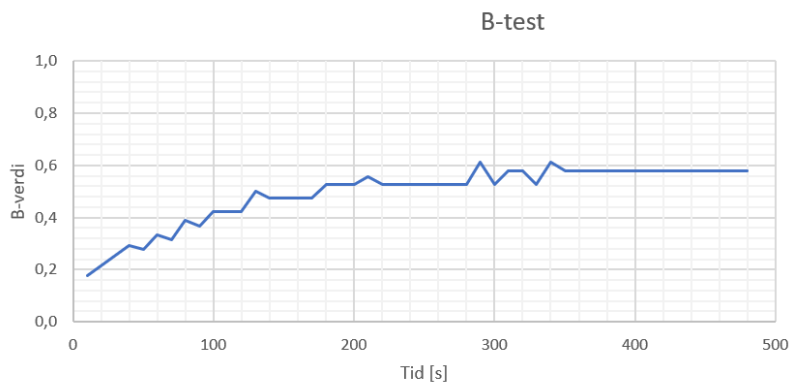
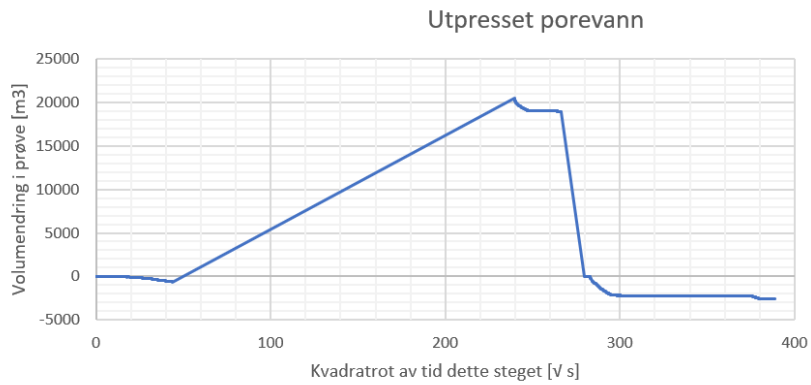
## ε-q



## NTNU



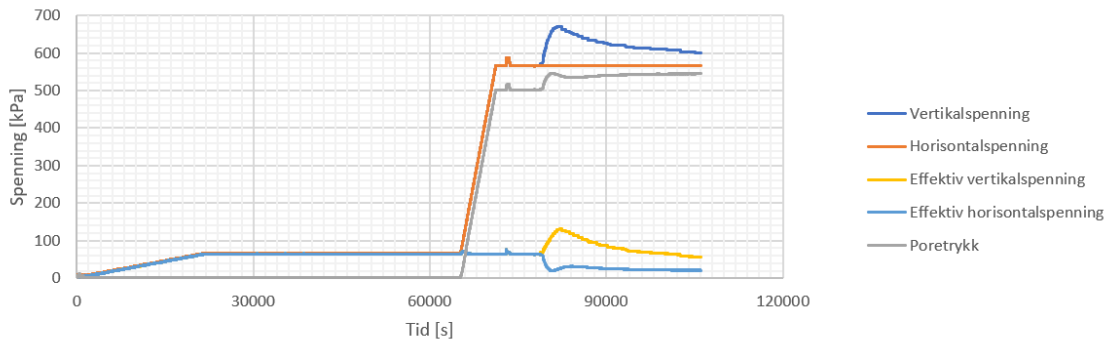




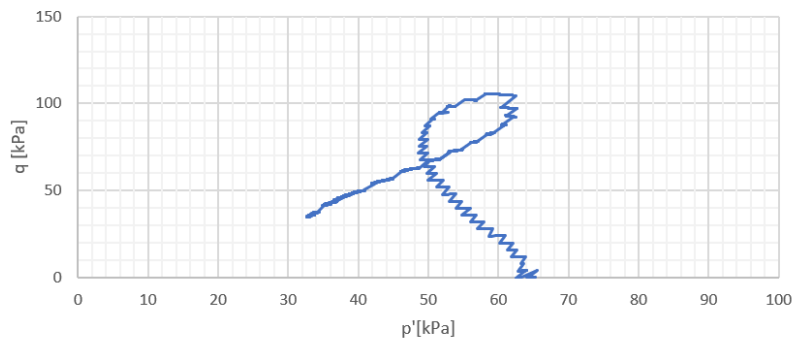
Treksialforsøk 3 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 3 ble utført på leire med en midlet dybde på 5,74 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 300 kPa i ødometerforsøk 1 og den effektive middelspenningen ble funnet til 65,6 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 11 kPa. Treksialapparatet frøs flere ganger under forsøket og kontrollen over forsøket ble derfor tapt. Resultatene er derfor ikke benyttet for å vurdere effektene av trykk og endret prosedyrerekkefølge.

# Treaksialforsøk 4 - 5,89 meters dybde

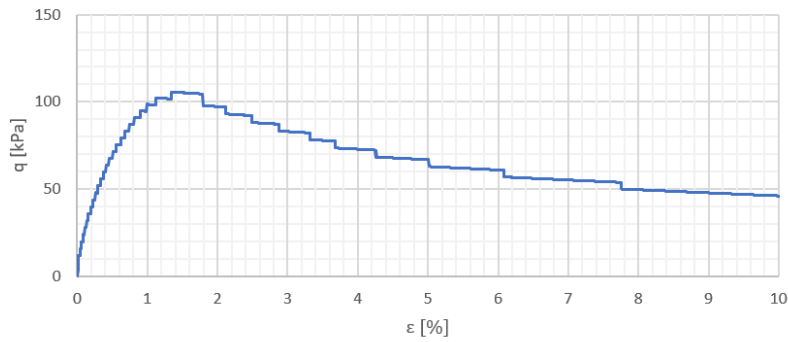
Spenningsforløp



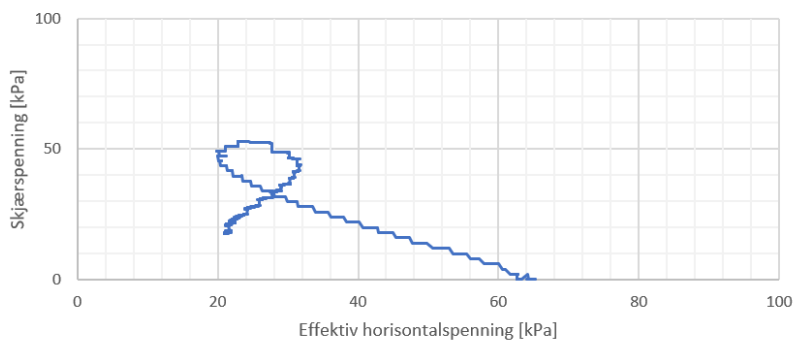
$p'-q$

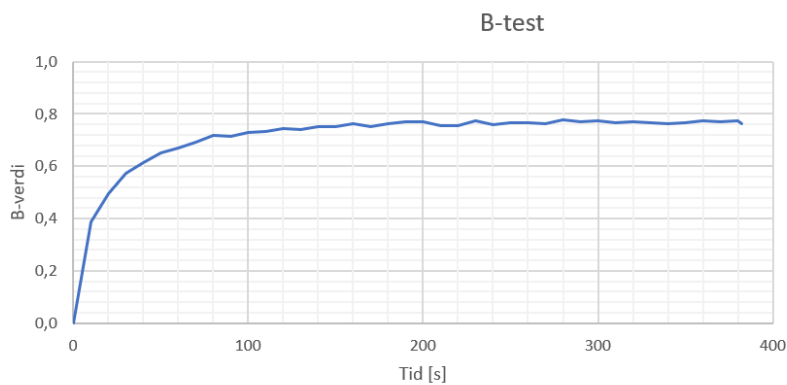
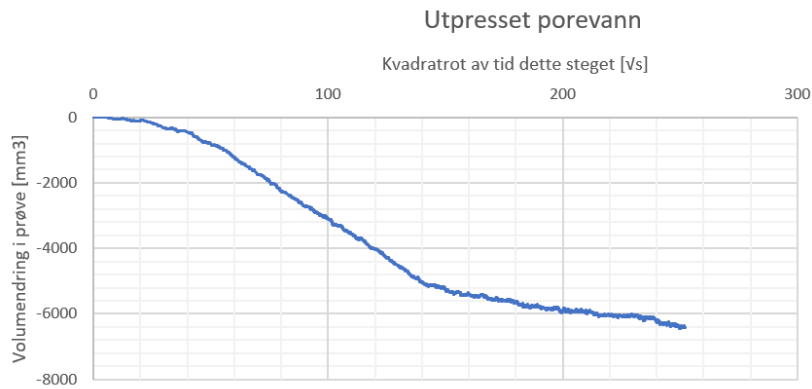


$\epsilon-q$



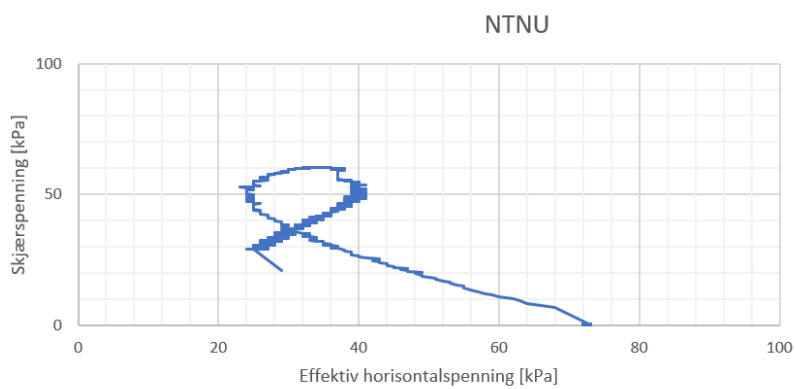
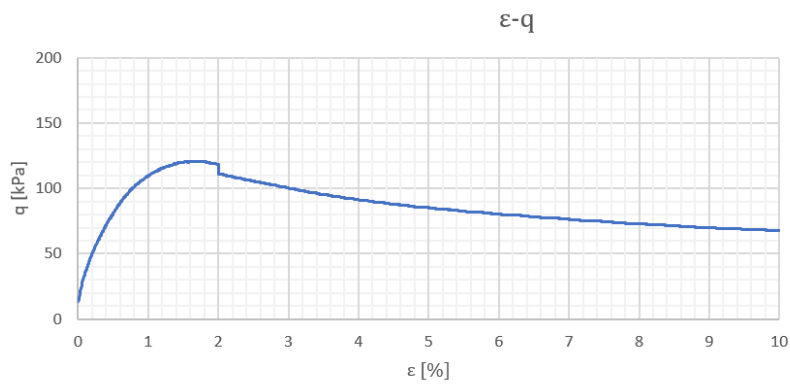
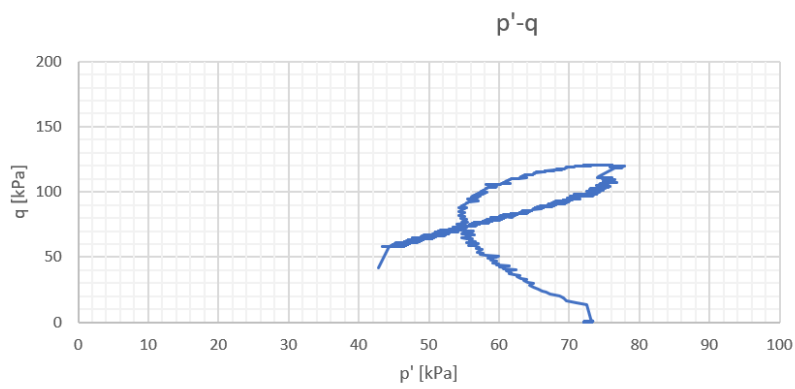
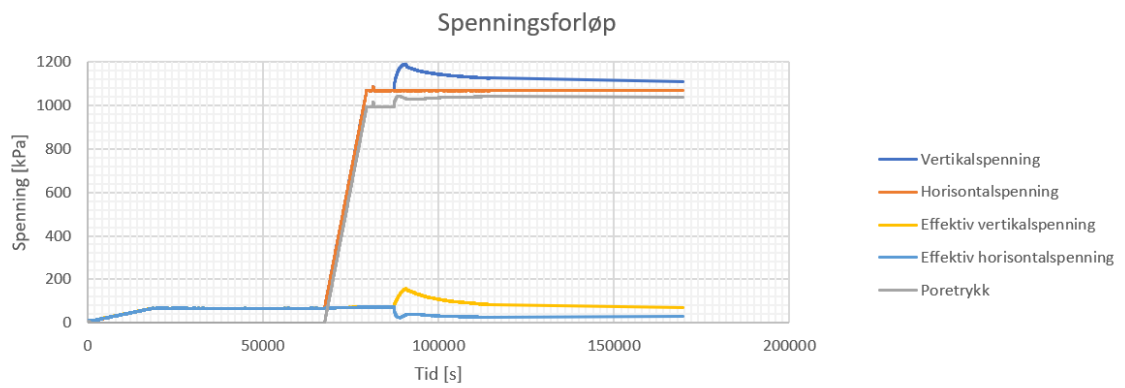
NTNU

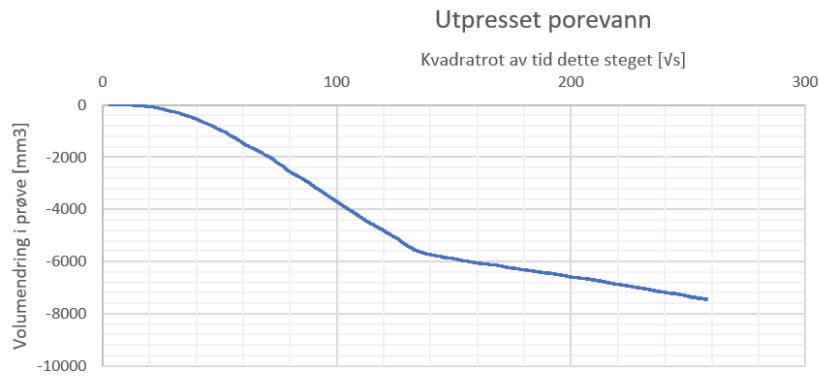




Treaksialforsøk 4 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 4 ble utført på leire med en midlet dybde på 5,89 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 300 kPa i ødometerforsøk 1 og den effektive middelspenningen ble funnet til 66,3 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 500 kPa. Det ble oppdaget en ansamling luft i poretrykkmåleren etter utført forsøk. Dette har trolig dempet det målte poretrykket i forsøket sammenlignet med det faktisk opp-tredende. Ingen øvrige problemer ble oppdaget og forsøksresultatene viser seg å samsvare relativt godt med de øvrige resultatene. Forsøket ble derfor benyttet.

# Treaksialforsøk 5 - 5,89 meters dybde

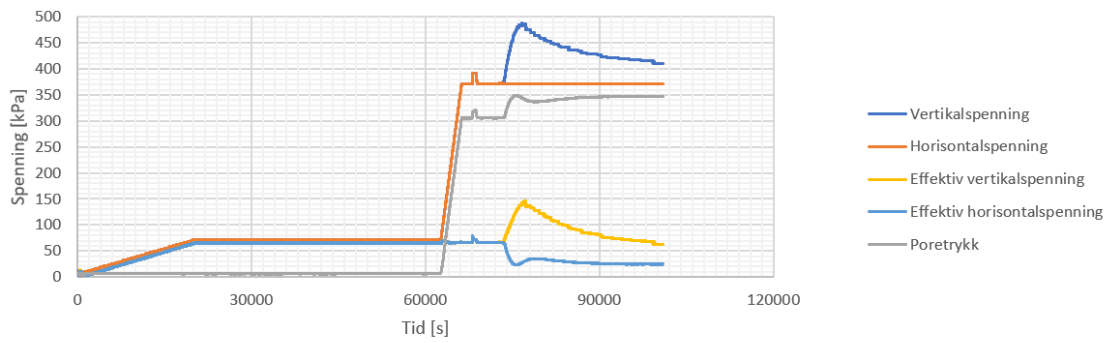




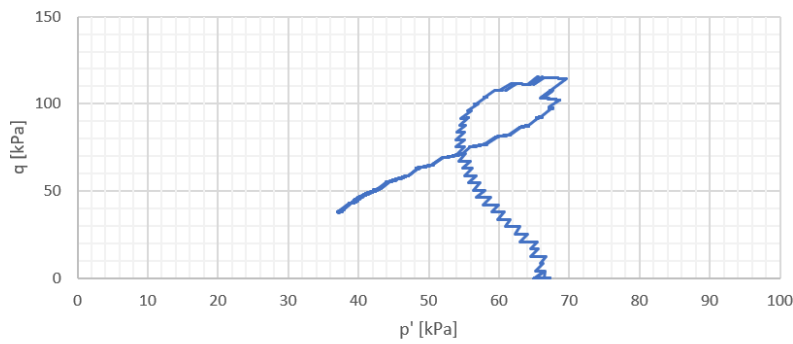
Treaksialforsøk 5 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 5 ble utført på leire med en midlet dybde på 5,89 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 300 kPa i ødometerforsøk 1 og den effektive middelspenningen ble funnet til 66,3 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 1000 kPa.

# Treaksialforsøk 6 - 5,89 meters dybde

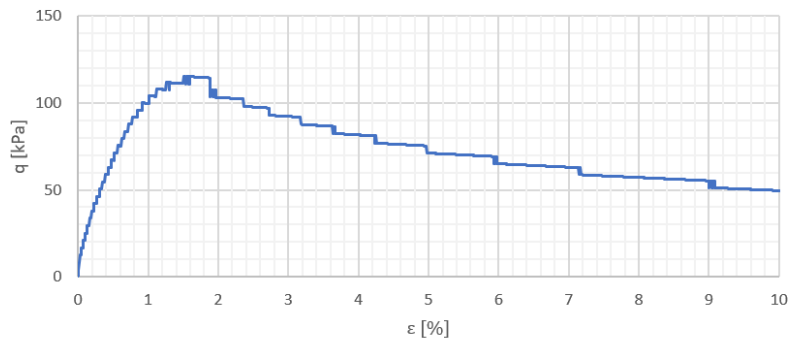
Spenningsforløp



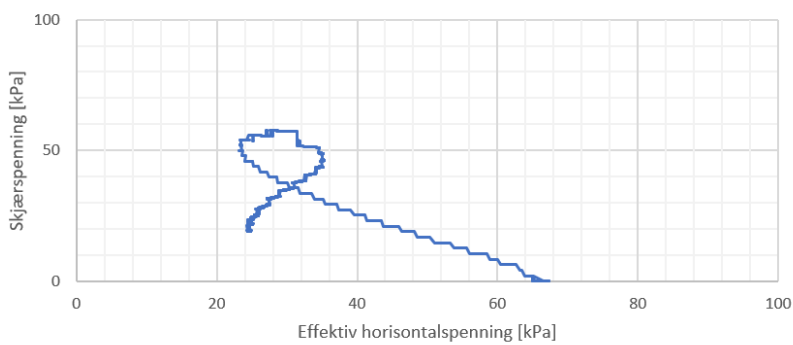
$p'-q$

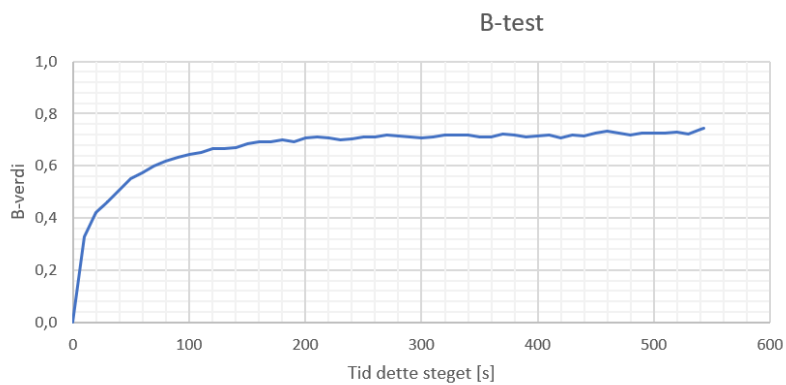
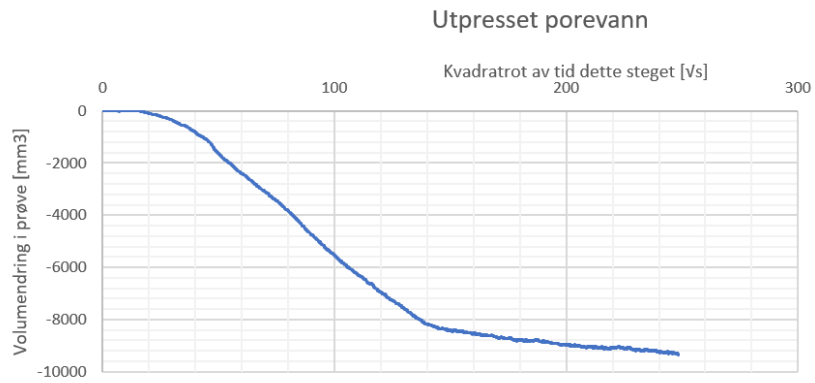


$\epsilon-q$



NTNU

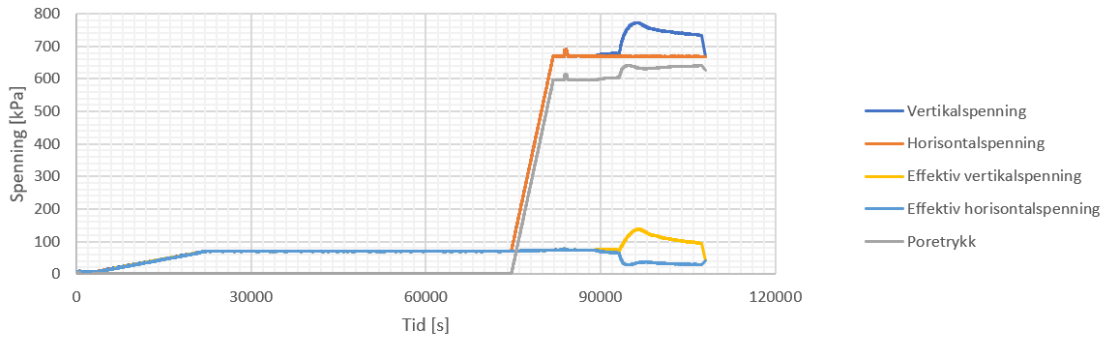




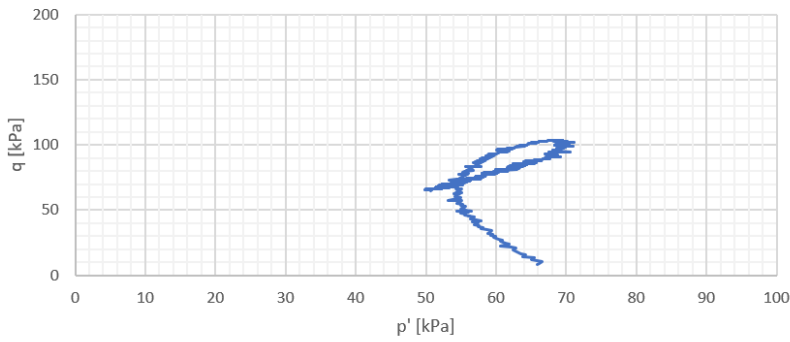
Treaksialforsøk 6 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratroten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 6 ble utført på leire med en midlet dybde på 5,89 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 300 kPa i ødometerforsøk 1 og den effektive middelspenningen ble funnet til 66,3 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 305 kPa.

# Treaksialforsøk 7 - 6,09 meters dybde

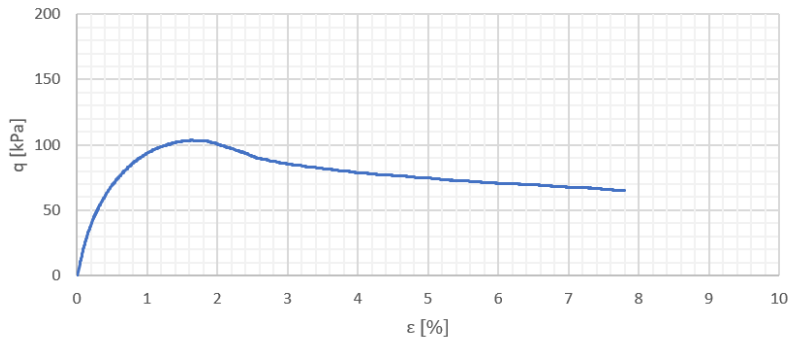
Spenningsforløp



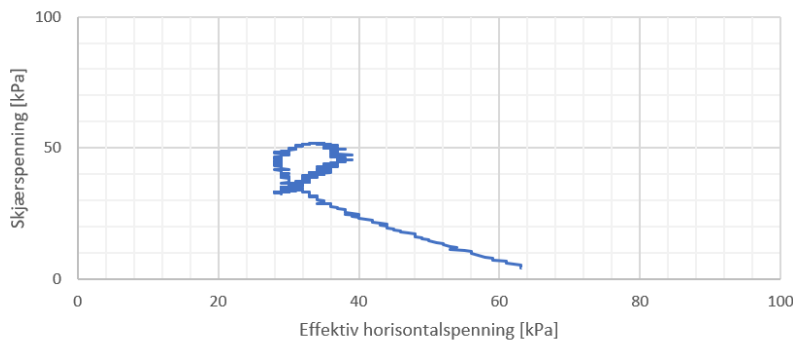
$p'-q$



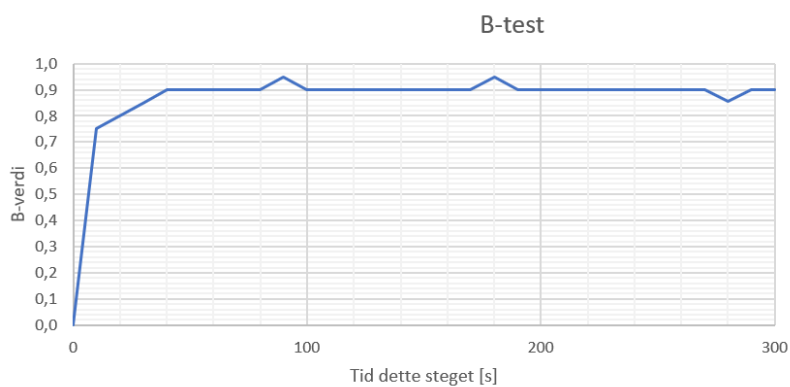
$\epsilon-q$



NTNU



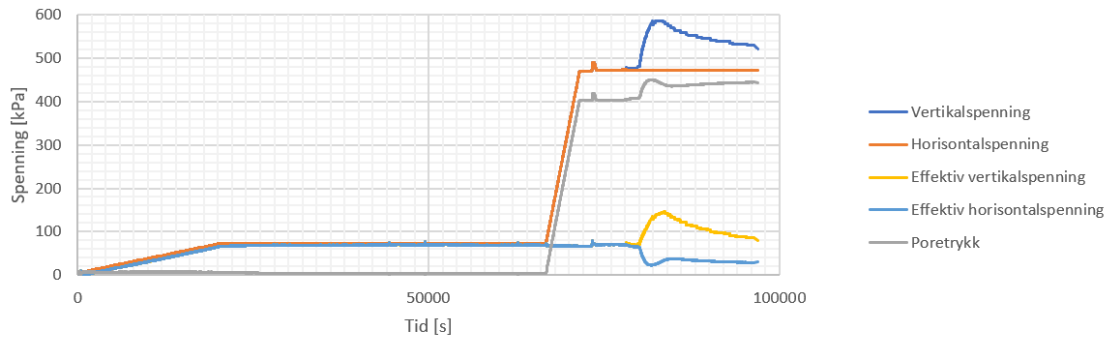




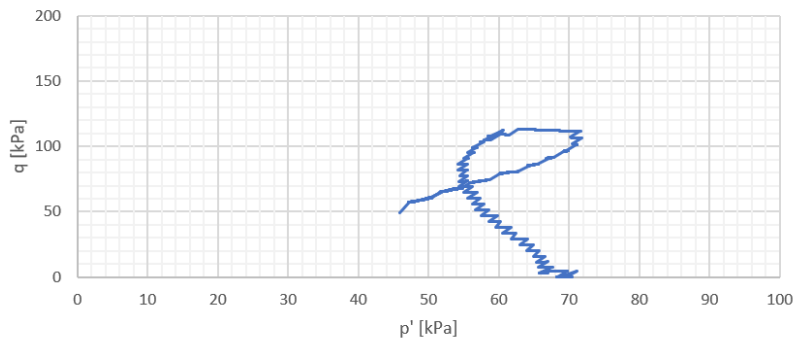
Treksialforsøk 7 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 7 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,09 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 340 kPa i ødometerforsøk 3 og den effektive middelspenningen ble funnet til 70,2 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 600 kPa.

# Treaksialforsøk 8 - 6,09 meters dybde

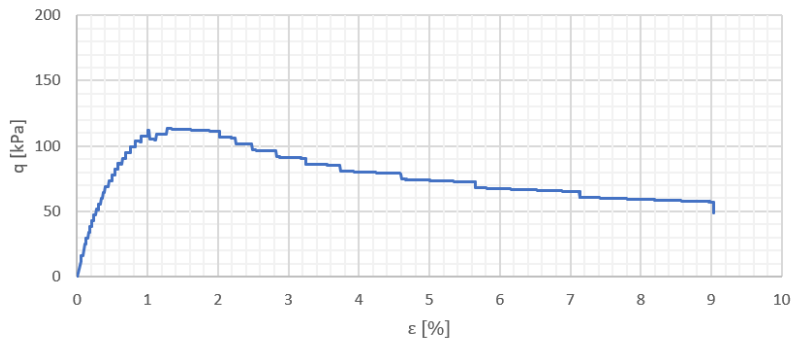
Spenningsforløp



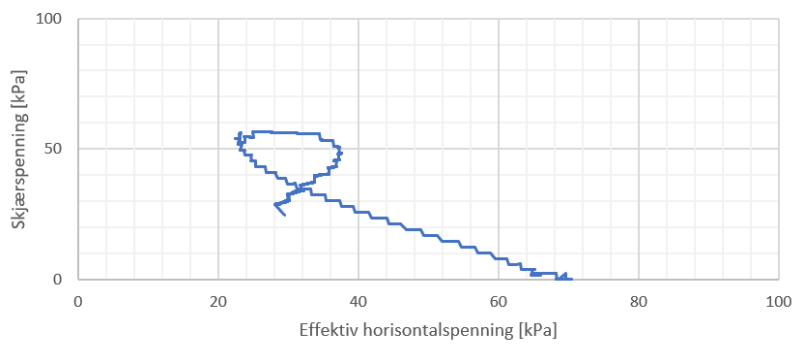
$p'-q$

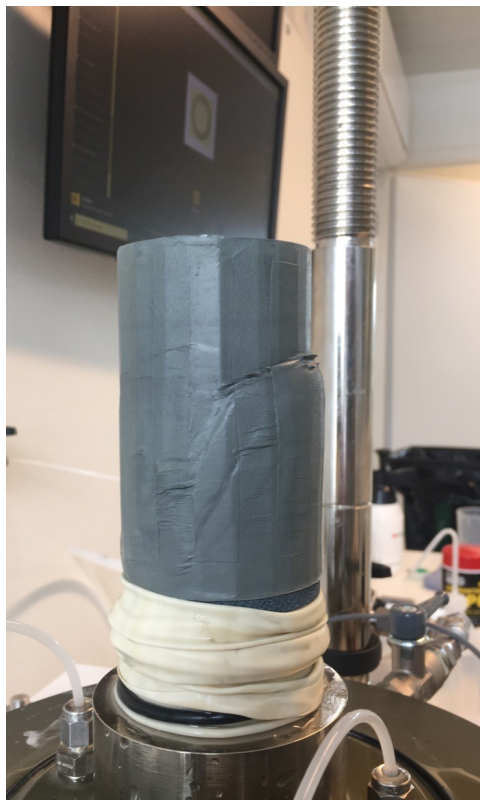
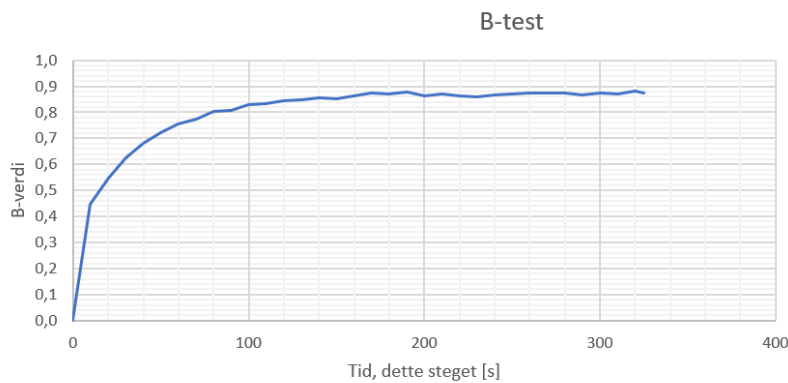
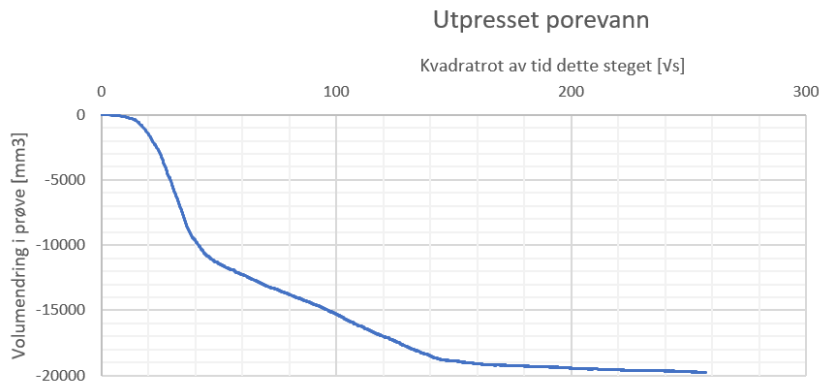


$\epsilon-q$



NTNU

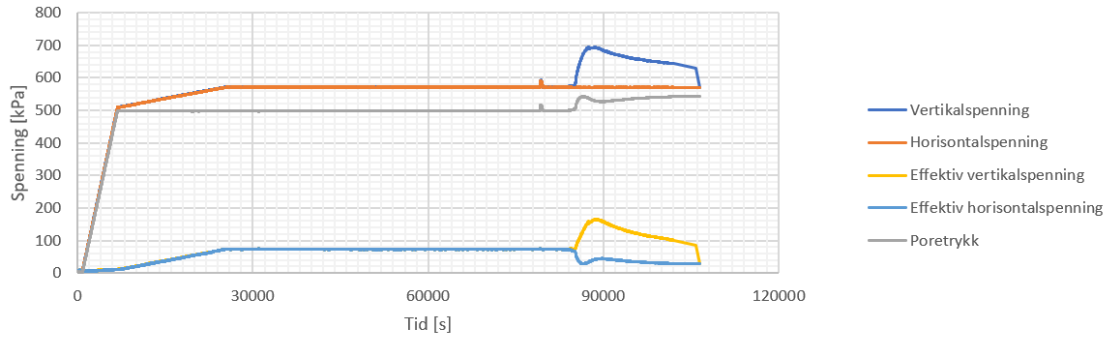




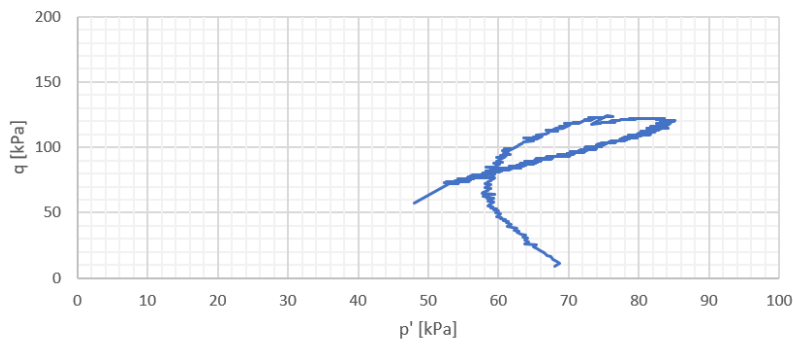
Treaksialforsøk 8 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 8 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,09 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 340 kPa i ødometerforsøk 3 og den effektive middelspenningen ble funnet til 70,2 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 403 kPa.

# Treaksialforsøk 9 - 6,26 meters dybde

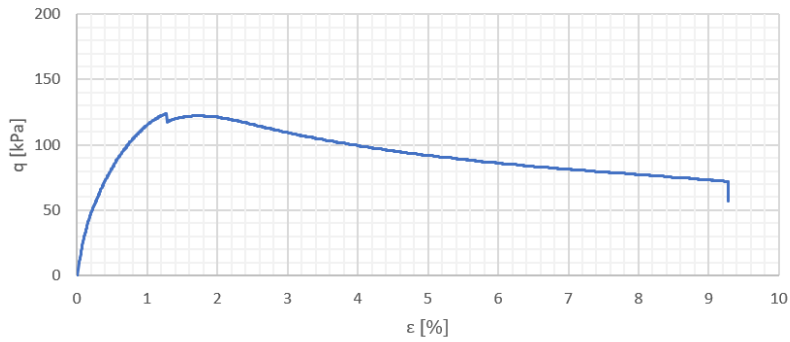
Spenningsforløp



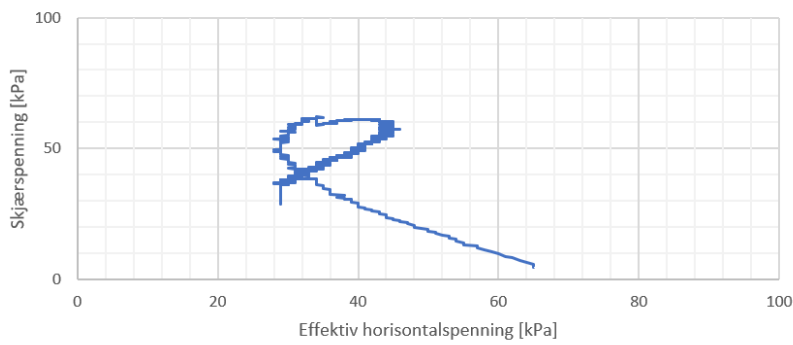
$p'-q$

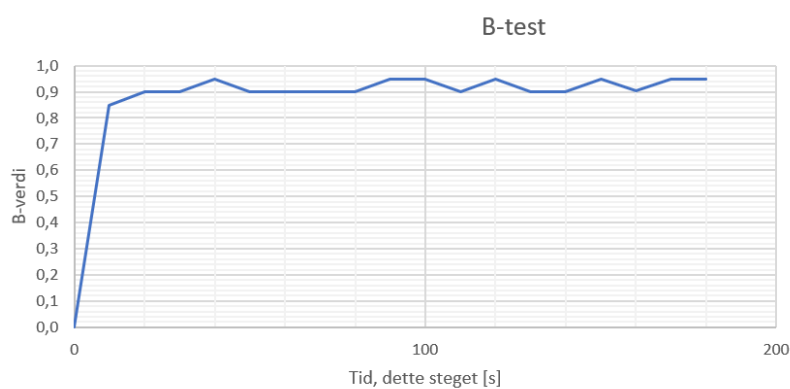
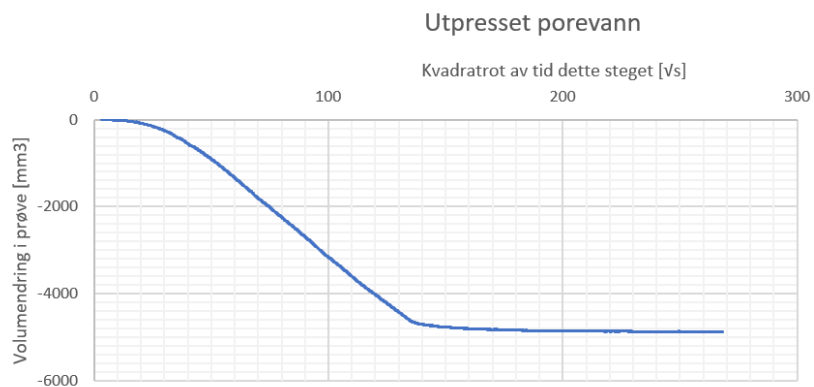


$\epsilon-q$



NTNU

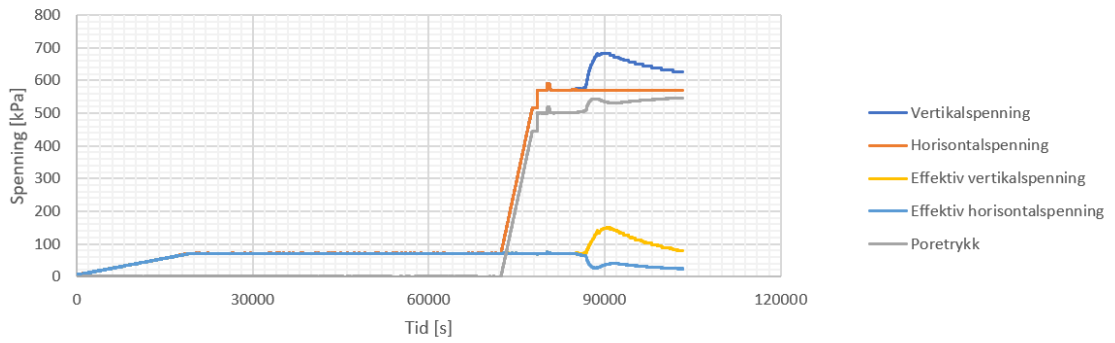




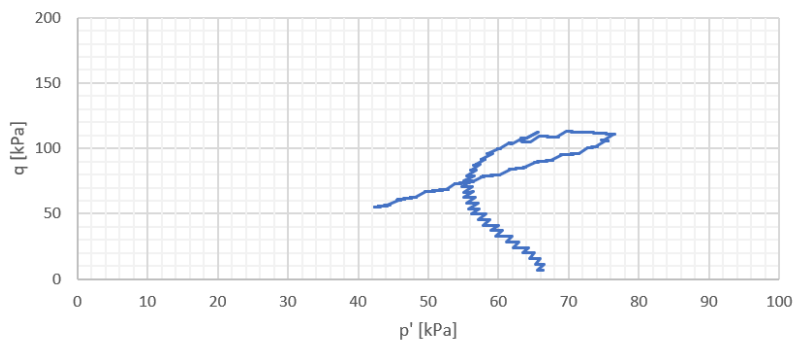
Treaksialforsøk 9 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 9 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,26 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 340 kPa i ødometerforsøk 3 og den effektive middelspenningen ble funnet til 71,2 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen k-m-b-s og med et baktrykk på 500 kPa.

# Treaksialforsøk 10 - 6,26 meters dybde

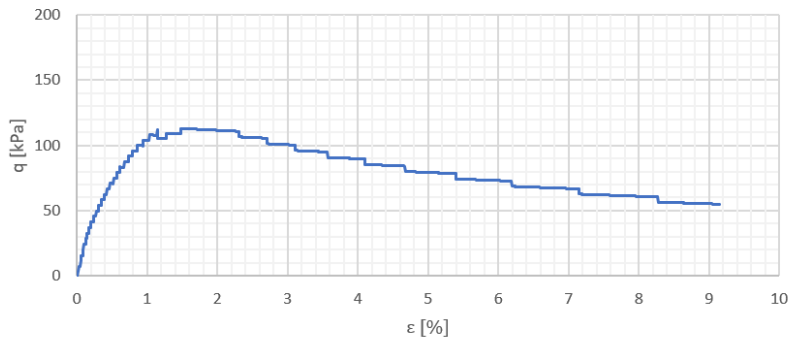
Spenningsforløp



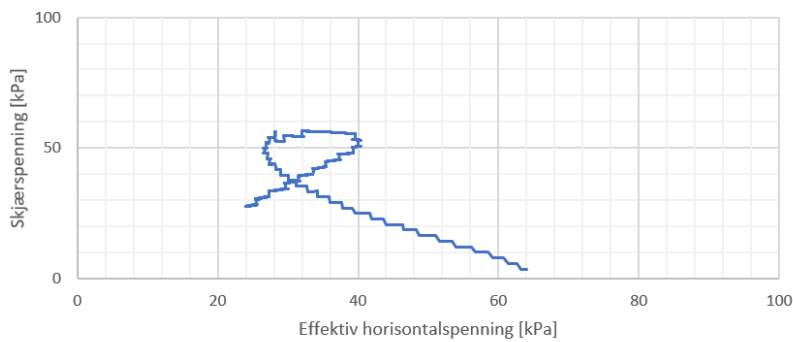
$p'-q$

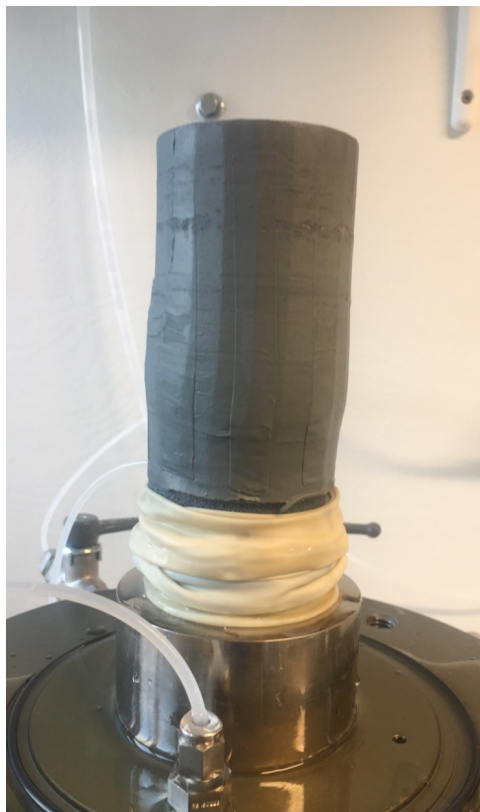
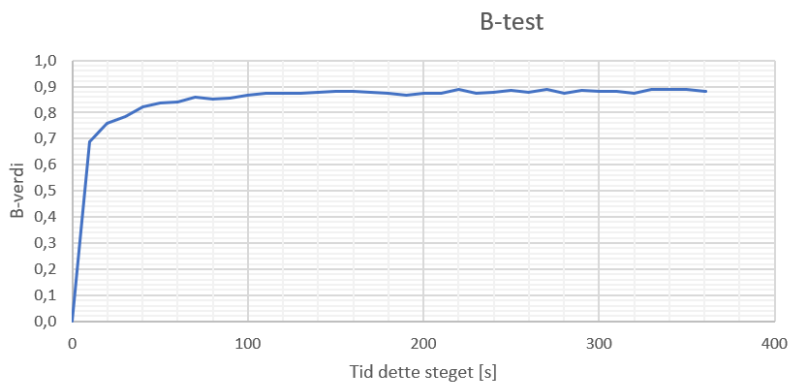
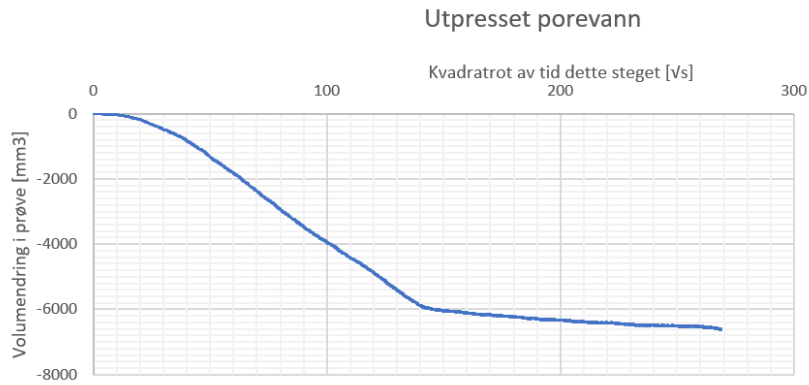


$\epsilon-q$



NTNU

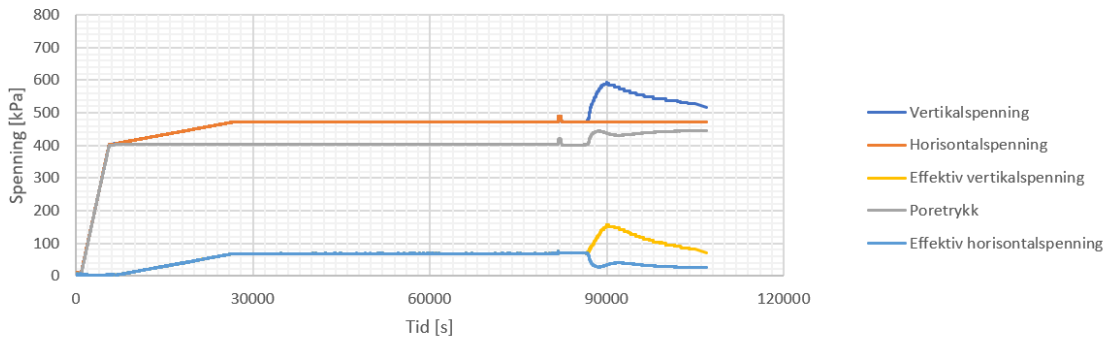




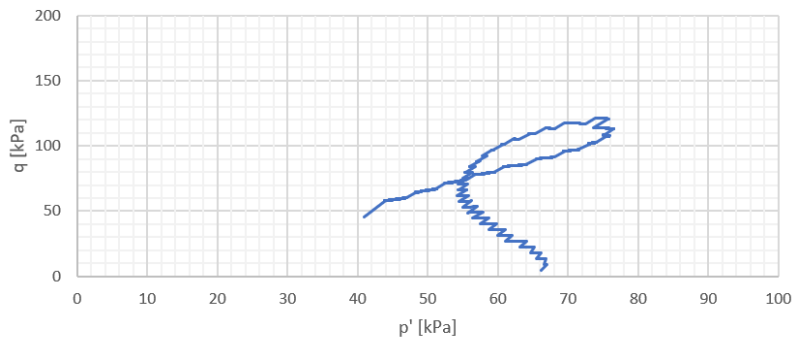
Treksialforsøk 10 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 10 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,26 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 340 kPa i ødometerforsøk 3 og den effektive middelspenningen ble funnet til 71,2 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen m-k-b-s og med et baktrykk på 500 kPa.

# Treaksialforsøk 11 - 6,26 meters dybde

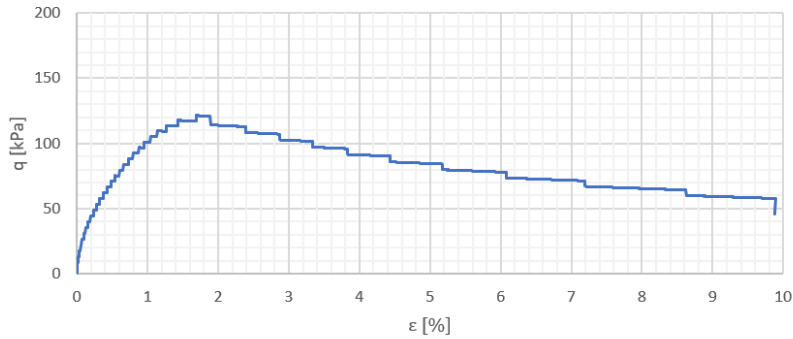
Spenningsforløp



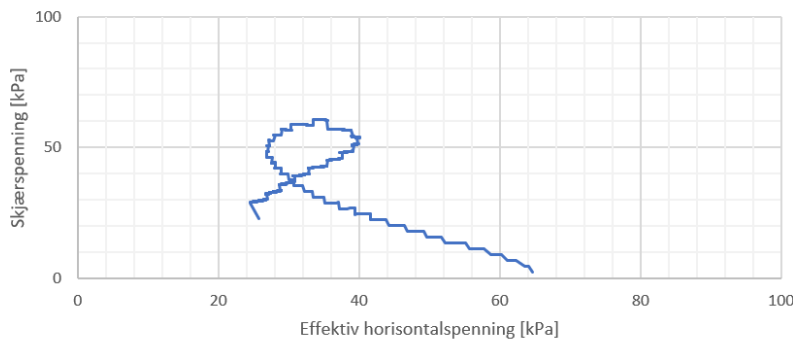
$p'-q$



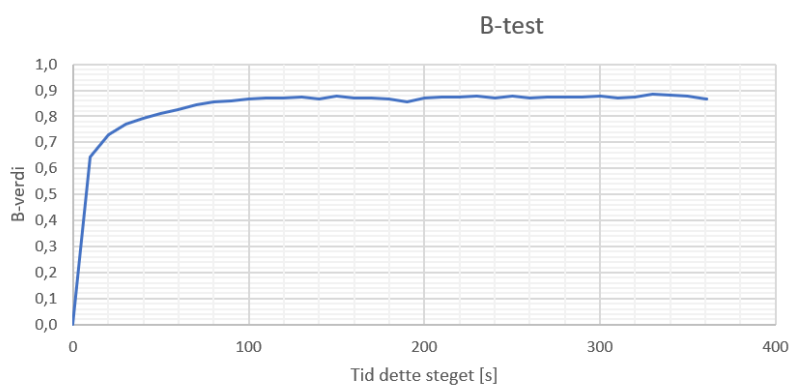
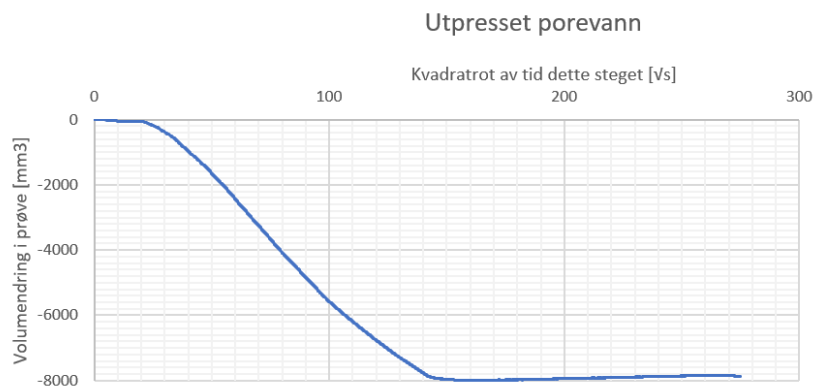
$\epsilon-q$



NTNU







Treksialforsøk 11 presentert ved spenningsforløp,  $p'$ - $q$  plott,  $\epsilon$ - $q$  plott, NTNU plott, volum utpresset porevann med kvadratrotten av tiden og B-verdien ved B-test. Et bilde tatt av leiren for å vise bruddet er vist. Forsøk 11 ble utført på leire med en midlet dybde på 6,26 meter. Prekonsolideringsspenningen ble funnet til 340 kPa i ødometerforsøk 3 og den effektive middelspenningen ble funnet til 71,2 kPa. Forsøket ble utført med prosedyrene i rekkefølgen m-k-b-s og med et baktrykk på 400 kPa.

## Vanninnhold

Forsøk	Krybbe [g]	Krybbe + prøve [g]	Skål [g]	Skål + tørr prøve [g]	Våt vekt [g]	Tørr vekt [g]	Vann [g]	Vanninnhold [%]
1	544,44	972,78	227,32	519,6	428,34	292,28	136,06	46,55
2	544,42	972,08	227,34	519,35	427,66	292,01	135,65	46,45
3	544,45	969,57	227,34	515,72	425,12	288,38	136,74	47,42
4	545,11	970,7	264,99	552,63	425,59	287,64	137,95	47,96
5	544,42	972,4	227,73	515,02	427,98	287,29	140,69	48,97
6	545,38	-	210,62	492,26	-	281,64	-	-
7	544,46	957,01	227,73	505,96	412,55	278,23	134,32	48,28
8	545,41	969,91	277,45	563,55	424,5	286,1	138,4	48,37
9	544,44	992,38	227,31	550,24	447,94	322,93	125,01	38,71
10	545,68	994,34	277,43	599,25	448,66	321,82	126,84	39,41
11	545,67	992,64	277,45	599,68	446,97	322,23	124,74	38,71

Oversikt over vanninnholdet for treaksialforsøkene.

## Prøveforstyrrelse

Forsøk	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	Kvalitet	$\epsilon_{vol}$	$\Delta e/e_0$	Kvalitet
1	4003	Godt	0,0175	0,0196	Veldig god til utmerket
2	7262	Akseptabelt	0,0317	0,0356	Dårlig
3	-	-	-	-	-
4	6422	Akseptabelt	0,0280	0,0315	God til brukbar
5	7449	Akseptabelt	0,0325	0,0365	Dårlig
6	9359	Akseptabelt	0,0409	0,0458	Dårlig
7	7132	Akseptabelt	0,0311	0,0349	God til brukbar
8	19746	Dårlig	0,0862	0,0967	Veldig dårlig
9	4880	Godt	0,0213	0,0239	God til brukbar
10	6617	Akseptabelt	0,0289	0,0324	God til brukbar
11	7867	Akseptabelt	0,0344	0,0655	Dårlig

Prøveforstyrrelse for treaksialforsøkene. Opprinnelig volum for forsøkene er 229022,1 mm<sup>3</sup>.

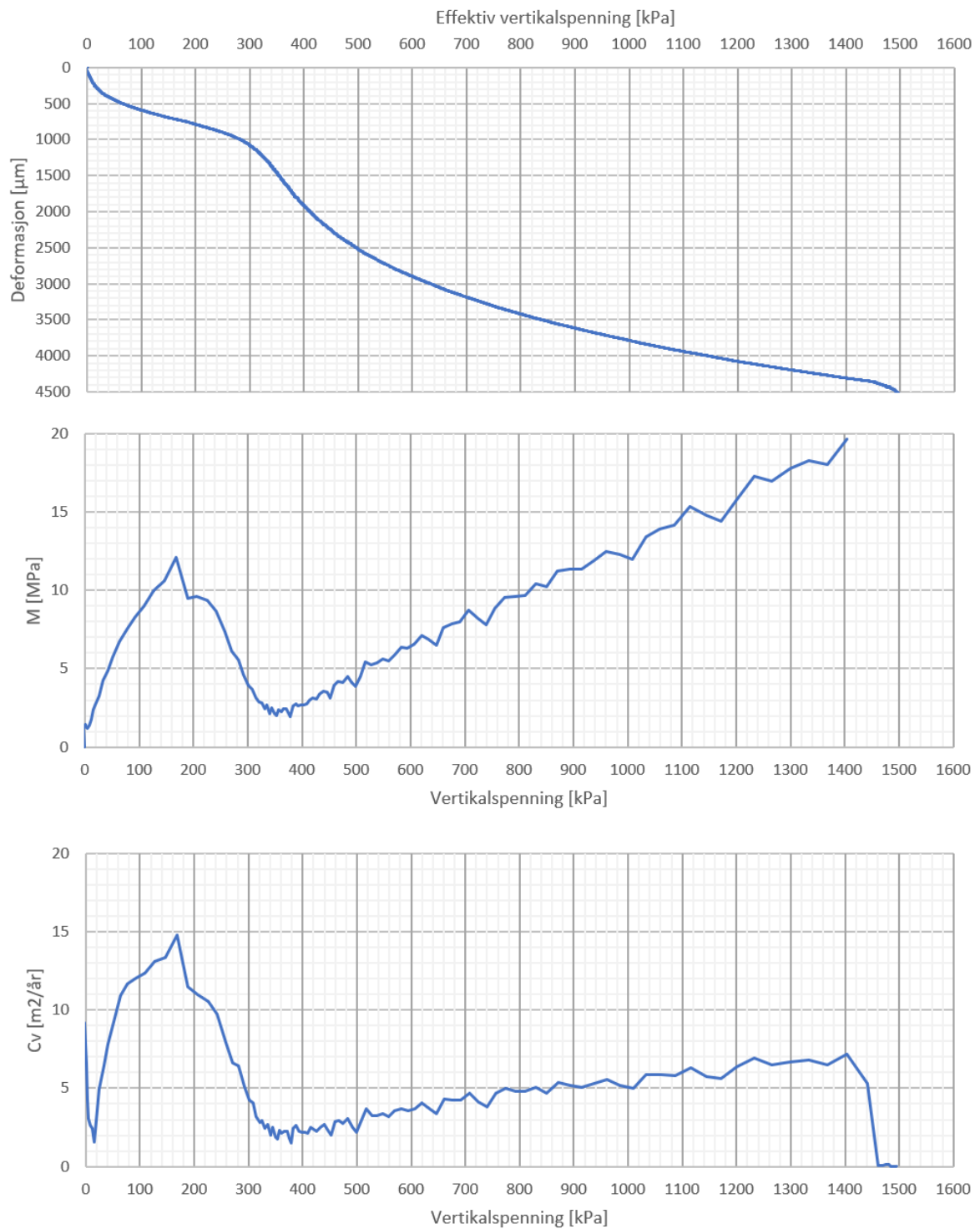
## **Tillegg B**

### **Ødometerforsøk**

Forsøk	Dybde [m]	Apparat	Kommentar
1	5,83	Høyre, grunnkurslab	-
2	6,05	Høyre, grunnkurslab	Forstyrret under innbygging
3	6,08	Venstre, grunnkurslab	Feil med poretryksmåler

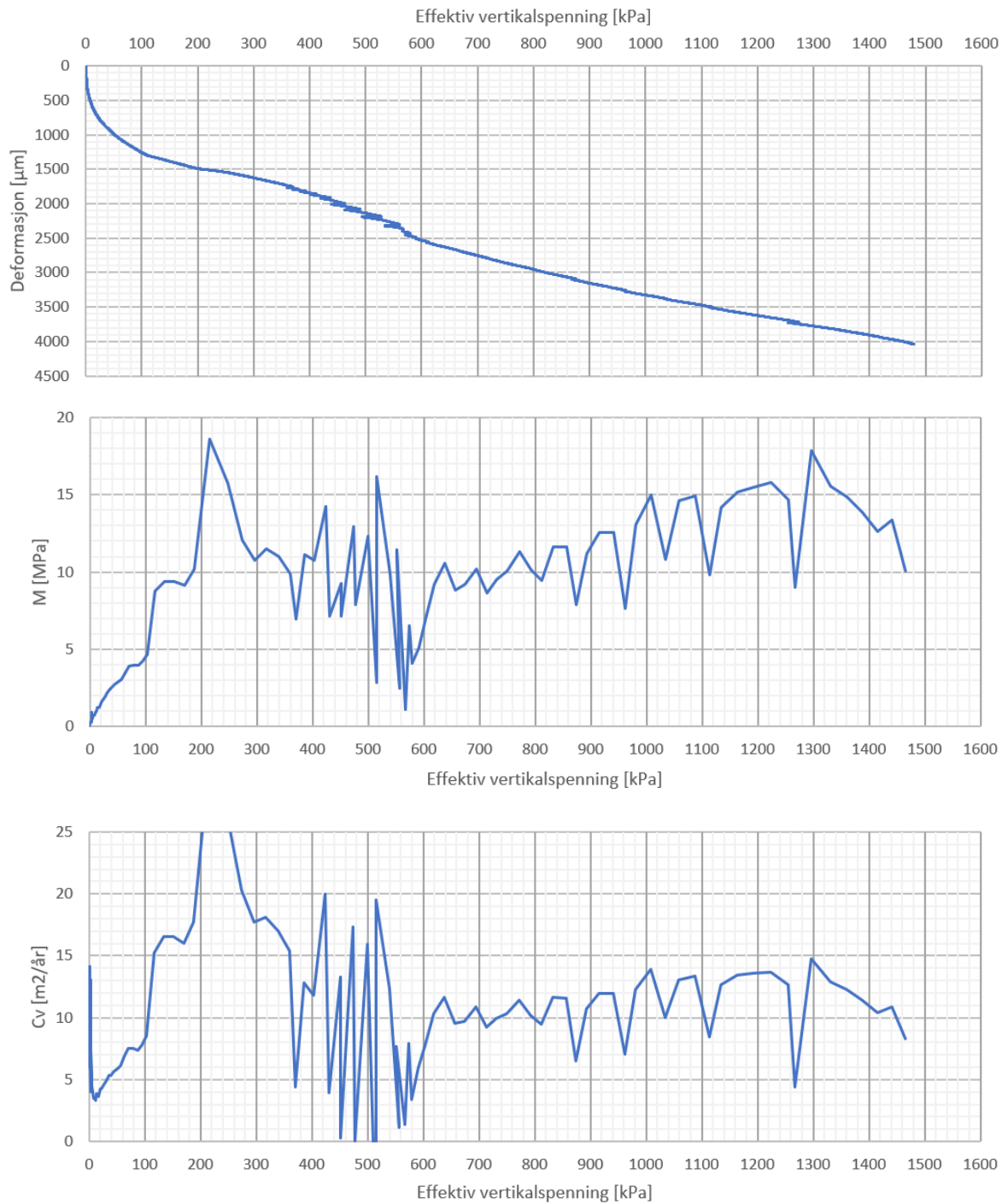
Oversikt over ødometerforsøkene.

## Ødometerforsøk 1 - 5,83 meters dybde



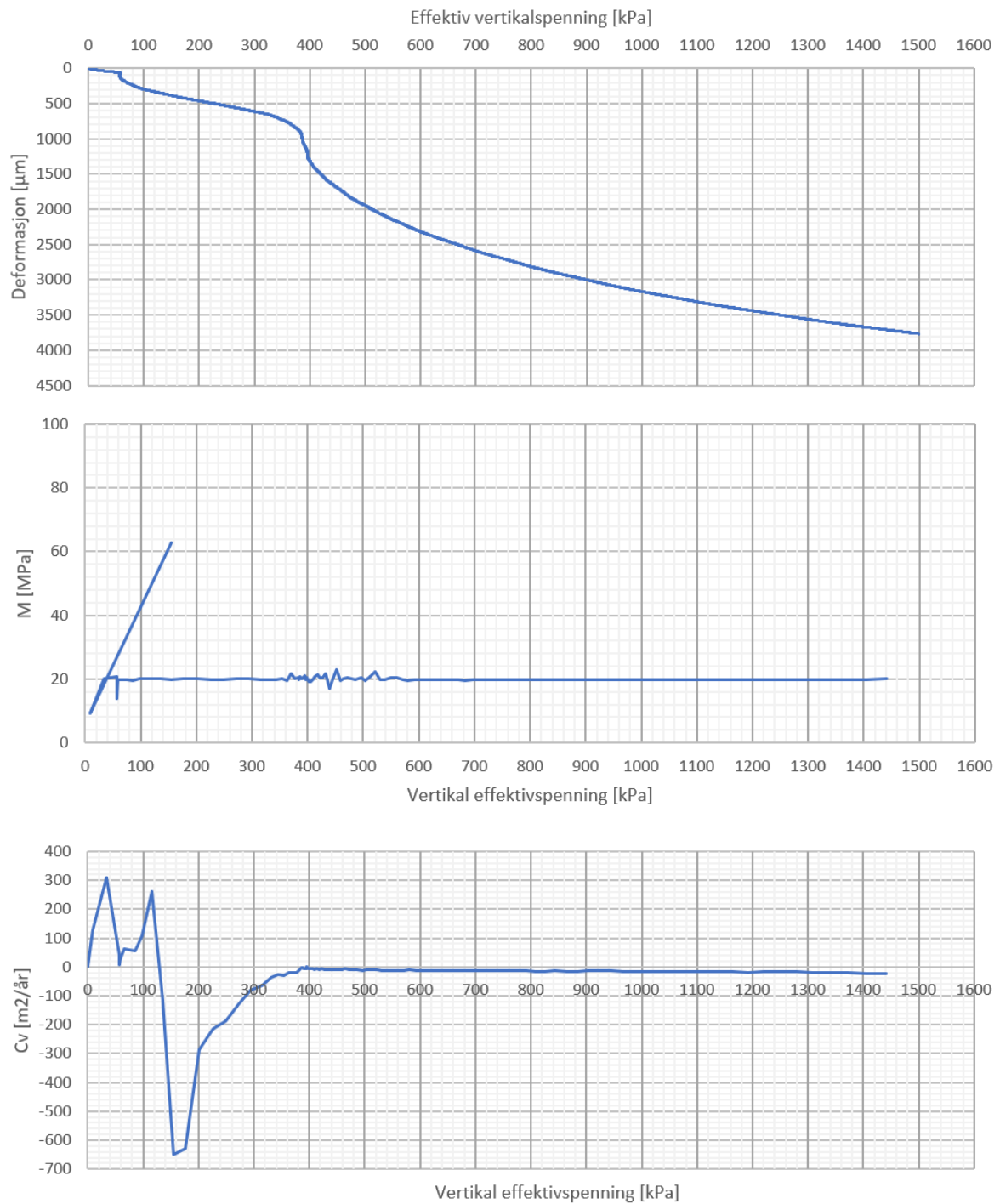
Resultater fra det første ødometerforsøket. Øverst er effektiv vertikalspenning,  $\sigma'_v$ , plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er  $\sigma'_v$  plottet mot tangentmodulen,  $M$ . Nederst er  $\sigma'_v$  plottet mot konsolideringskoeffisienten,  $C_v$ .

## Ødometerforsøk 2 - 6,05 meters dybde



Resultater fra det andre ødometerforsøket. Øverst er effektiv vertikalspenning,  $\sigma'_v$ , plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er  $\sigma'_v$ , plottet mot tangentmodulen,  $M$ . Nederst er  $\sigma'_v$ , plottet mot konsolideringskoeffisienten,  $C_v$ .

## Ødometerforsøk 3 - 6,08 meters dybde



Resultater fra det tredje ødometerforsøket. Øverst er effektiv vertikalspenning,  $\sigma'_v$ , plottet mot vertikaldeformasjonen. I midten er  $\sigma'_v$  plottet mot tangentmodulen,  $M$ . Nederst er  $\sigma'_v$  plottet mot konsolideringskoeffisienten,  $C_v$ . Poretrykkmåleren viste seg å være defekt for apparatet brukt til dette forsøket.

## Vanninnhold

Forsøk	Ring [g]	Ring + prøve [g]	Skål [g]	Skål + prøve [g]	Våt vekt [g]	Tørr vekt [g]	Vann [g]	w [%]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1	39,28	110,98	133,18	181,7	71,70	48,52	23,18	47,77	17,58	2,88
2	39,21	110,26	277,40	324,18	71,05	46,78	24,27	51,88	17,43	2,97
3	39,31	111,8	214,13	264,03	72,49	49,91	22,58	45,24	17,78	2,87

Oversikt over vanninnholdet og tilhørende enhetsvekt og partikkeldensitet for ødometerforsøkene.

## Prøveforstyrrelse

Forsøk	Metode etter Lunne et.al [11]			Korrigert for falske deformasjoner		
	Vertikal deformasjon [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta e/e_0$	Kvalitet	Vertikal deformasjon [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta e/e_0$	Kvalitet
1	488,38	0,042	Dårlig	208,38	0,018	Veldig god til utmerket
2	1066,68	0,089	Veldig dårlig	416,68	0,035	God til brukbar
3	172,68	0,015	Veldig god til utmerket	262,68	0,023	God til brukbar

Oversikt over prøveforstyrrelsen i ødometerforsøkene.



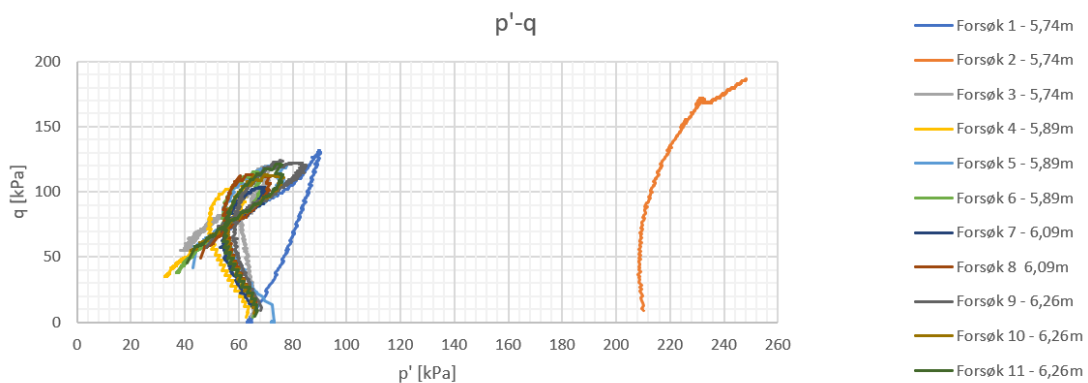
## **Tillegg C**

### **Viktige forbehold rundt forsøkene**

# Treksialforsøk

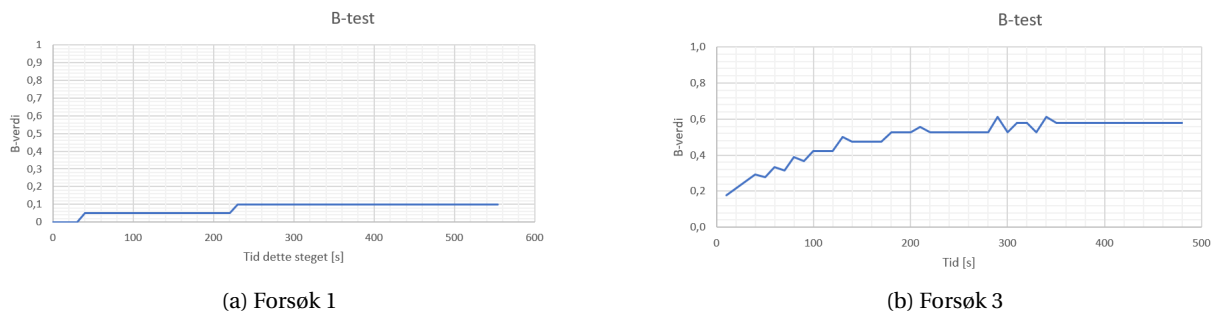
## Forsøk 1 og 2

Forsøk 1 og 2 møtte problemer med måling av poretrykk og resulterende feil B-verdi. Feilaktige poretrykk-målinger vil resultere i feilaktige effektivspenninger og påfølgende feilaktig middelspenning,  $p'$ , for forsøkene. Spenningsstiene i både  $p'$ - $q$  og NTNU plottene vil derfor avvike fra det man kan forvente og være misledende. Dette kan ses i figur C.1. Som nevnt i kapittel 2.3.3 kan dilatansen enkelt kunne vurderes ut ifra  $p'$ - $q$  plot da  $D=0$  tilsvarer en vertikal linje fra forsøket start og opp til bruddlinjen. Som figur C.1 viser, har de resterende treksialforsøkene en kontrakterende oppførsel opp mot bruddlinjen. De viser også en dilaterende oppførsel etter bruddlinjen er krysset, fram til forsøket når sin peakverdi og bruddet oppstår i leira. Fra bruddet viser forsøkene så en kontrakterende oppførsel igjen. Forsøk 1 og 2 viser derimot en dilaterende oppførsel fra start. Forsøk 1 kontrakterer etter brudd og faller inn langs den samme linjen som de andre forsøkene. Forsøk 2 fortsetter derimot å dilatere også etter bruddmekanismen har inntruffet i leira og innfinner seg langs en annen bruddlinje.

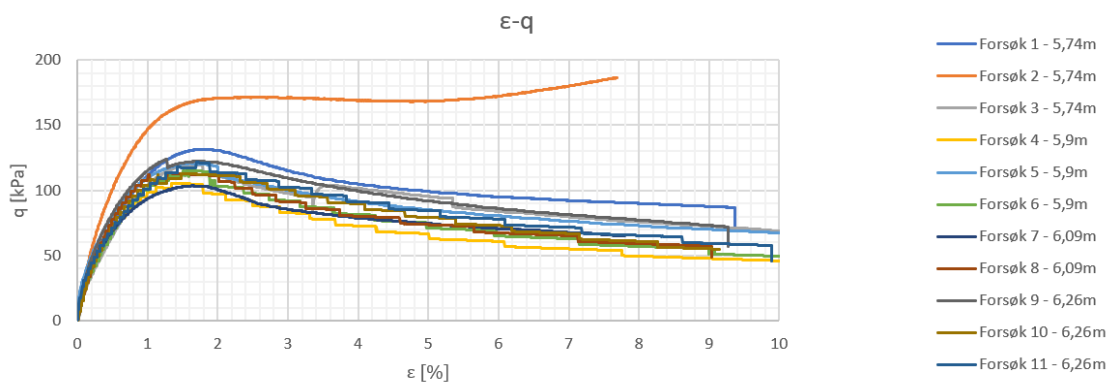


Figur C.1: Sammenstilling av alle de utførte treksialforsøkene. Forsøk 1 og 2 utviser en avvikende, dilaterende spenningssti i starten sammenlignet med de andre forsøkene. Forsøk 2 dilaterer også etter brudd.

En spenningssti som avviker fra normalen kan skyldes andre årsaker enn en feilaktig poretrykkmåler. Store prøveforstyrrelser er kanskje den vanligste årsaken til avvikende spenningsstier. Dette skyldes, som tidligere nevnt, forstyrrelser i materialet og påfølgende endrede egenskaper. Denne forklaringen kan dog ikke brukes for forsøk 1 som utviser prøve kvaliteten veldig god til utmerket samtidig som kurven i  $\epsilon - q$  plottet viser et forventet forløp, se figur C.3. Ved sammenligning med B-testen utført for forsøk 3, se figur C.2, hvor det var lignende spenningsforhold er det tydelig en feil i poretrykksystemet som gir utslag i feilaktige målte B-verdier for forsøk 1.



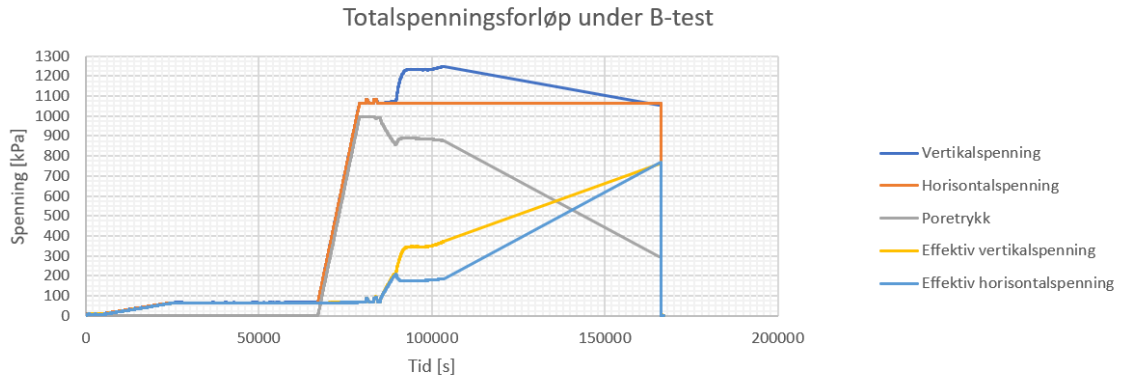
Figur C.2: Sammenligning av de oppnådde B-verdiene for forsøk 1 og 3. Forsøkene ble begge kjørt med baktrykk nær 0 kPa. Forsøk 3 utviser en 6 ganger så høy B-verdi som forsøk 1.



Figur C.3: Tøyning plottet mot deviatorspenningen for alle de utførte treaksialforsøkene. Forsøk 2 viser en høyere bruddspenning og en dilaterende oppførsel etter brudd.

Den avvikende spenningsstien i starten av forsøk 2 skyldes trolig en blanding av feilmåling av poretrykk og prøveforstyrrelse. Figur C.4 viser en kraftig nedgang i poretrykket fra slutten av B-testen til slutten av skjærforsøket. Dette forklarer den kraftige forskyvningen av spenningsstien langs  $p'$ -aksen som kan ses i figur C.4. Den dårlige prøveforstyrrelsen er delvis indikert av prøvekvantiteten basert på volum utpresset porevann under konsolideringsfasen, se tabell 3.6, hvor den scoret akseptabelt ved vurdering av volum utpresset porevann og dårlig ved vurdering basert på endring i porevann. Den største indikasjonen på prøveforstyrrelse finnes i den avvikende formen på  $\epsilon - q$  kurven i figur C.3. Formen på denne kurven påvirkes ikke av det målte poretrykket i prøven, se likning 2.9. Den avvikende formen kan derfor tyde på en kraftig mekanisk forstyrrelse av prøven tiltross for at andre forsøk har utvist en større grad av prøveforstyrrelse basert på endringene under konsolideringsfasen.

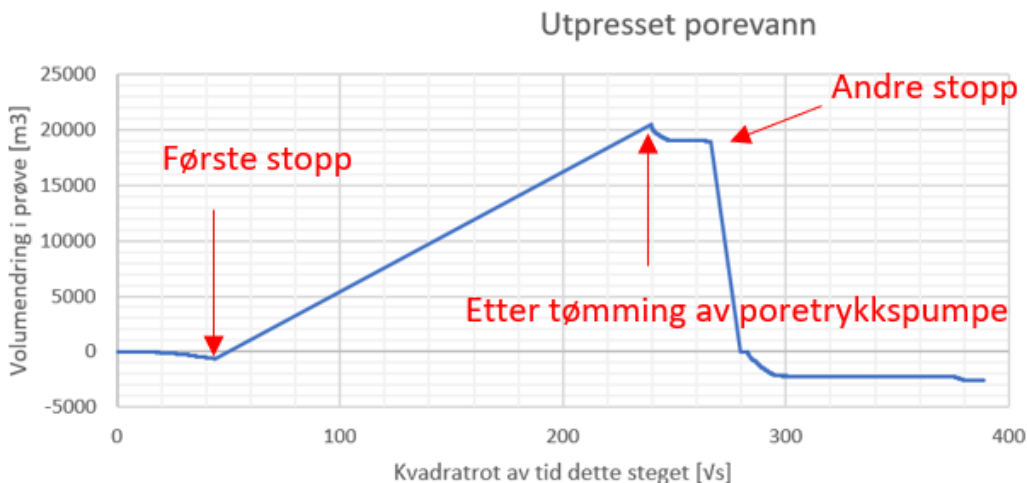
Den dilaterende oppførselen etter brudd er vanskelig å beskrive eksakt på skrivende tidspunkt, men forfatteren tolker dette til å skyldes dårlig prøvekvantitet, som nevnt over, blandet med den manglende poretrykkmålingen.



Figur C.4: Spenningsforløpet under treaksialforsøk 2. Fra slutten av B-testen synker generelt sett poretrykk mot slutten av forsøket. Det vises en liten poretrykksøkning ved starten av skjærforsøket før det synker igjen. Forsøk 2 ble utført på leire hentet opp fra 5,74 meters dybde med en antatt  $\sigma'_{v0}$  på 60,68 kPa, beregnet  $K_0$  på 1,12 og en middelspenning under konsolidering lik 65,5 kPa. Skjærspenning ved brudd ble tolket til 85,55 kPa ved 2,08% tøyning og forsøket har fått prøve kvaliteten dårlig etter Lunne et.al 1997 [11]. Leira hadde et vanninnhold på 46,45%.

### Forsøk 3

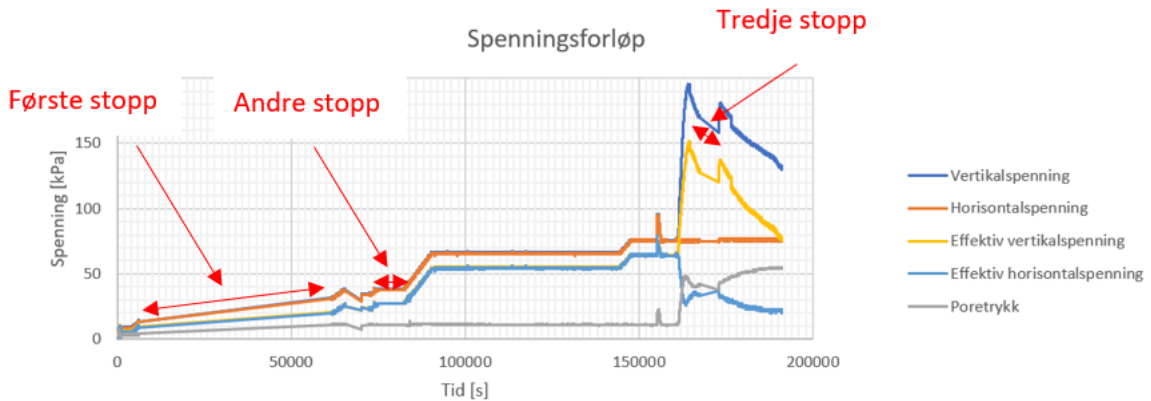
Under forsøk 3 oppsto et problem hvor komputeren som styrte forsøket frøs og stoppet loggingen av forsøket. Dette forekom 3 ganger under forsøket som vist i figur C.6. Under den første og lengste stoppen fyltes også poretrykkspumpa opp. Denne måtte tømmes og da programvaren ikke hadde loggført volumet av utpresset porevann over en lengre periode, gikk det faktiske volumet av utpresset porevann tapt. Den andre stoppen under konsolideringsfasen var kortere, men også her skjules et lite volum utpresset porevann. Volumendringen i prøven under konsolideringsfasen er derfor ukjent som kan ses i figur C.5.



Figur C.5: Illustrasjon av den registrerte volumendringen i poretrykkpumpa som følge av de to stoppene som forekom under konsolideringsfasen av forsøk 3 og volumendringen i poretrykkpumpa etter at denne ble tømt.

Opphøringen av logging under de 3 stoppene medførte også at endringer i høyde og tverrsnittsareal gikk tapt. Ved gjenoppstart av forsøk er det ikke mulig å laste inn data fra tidligere forsøk. Høyde og areal ble derfor stilt

tilbake til opprinnelige verdier på henholdsvis 100mm og 54mm ved oppstart etter stoppene. Tiltross for at spenningsstien i p'-q plottet viser en stor grad av likhet sammenlignet med øvrige forsøk, vil spenningene være dels ukorrekte. På grunn av manglende kunnskap om prøvens grad av forstyrrelse og de faktisk opptrædende spenningene under forsøket velges det å se bort ifra forsøket.



Figur C.6: De fire uønskede stoppene under forsøk 3 markert i spenningsforløpet til forsøket. Under første stopp, i konsolideringsfasen, vises en endring i spenningene da forsøket ble igangsatt igjen. Det er uvisst hva som forårsaket denne endringen da apparatet var fryst i denne perioden og forsøket stoppet.

#### Forsøk 4

På grunn av en uventet lav B-verdi registrert under B-testen til forsøket ble ventilen til poretrykkmåleren skrudd opp og vann ble spylt gjennom etter endt forsøk. Det ble da oppdaget en lomme med luft som hadde samlet seg i ventilen. Denne oppsamlede luften er trolig forklaringen på den unormalt lave B-verdien oppnådd under B-testen. Dette kan tyde på en dårlig utførelse under innbygging av forsøket som har ført til at luft har blitt fanget i poretrykksystemet. Den lave B-verdien kan også skyldes at luft har løst seg opp i det luftfrie vannet i poretrykkpumpa og at dette dermed ikke lenger er luftfritt og ikke kan absorbere et like stort volum luft, eller at luft har blitt sugd inn i poretrykkpumpa. I tillegg til en lavere oppnådd B-verdi under B-testen vil den oppsamlede luften også medføre at de beregnede effektivspenningene overskrider de faktisk opptrædende effektivspenningene i prøven. Dette virker ikke å være tilfellet da forsøket ikke opplever en økning i  $p'$ , og utviser en større grad av kontraktans enn tilsvarende forsøk, som diskutert i kapittel 4.2.2. På tross av dette samsvarer forsøket godt med de øvrige, gode forsøkene når det gjelder aksial tøyning ved brudd og høyeste registrerte skjærspenning og vil derfor benyttes videre i oppgaven.

For å unngå et tilsvarende problem ved neste forsøk ble det gamle luftfrie vannet i poretrykkpumpa pumpet ut og erstattet med nytt luftfritt vann. Senere forsøk opplevde ikke et tilsvarende problem.

#### Forsøk 8

Under forsøk 8 ble det registrert et stort volum utpresset porevann under konsolideringsfasen, se tabell 3.1. Som en følge av dette ble prøve kvaliteten vurdert med hensyn på volum utpresset porevann, som det eneste forsøket

i denne studien, funnet til å være dårlig. Ved vurdering av endringen i poretrykk ble forsøket kvalifisert som veldig dårlig. Ved en prøveforstyrrelse i den graden som beskrives ville dette gitt et tydelig avvik i spenningsstien i  $p'$ - $q$  plottet og i kurven for  $\varepsilon$ - $q$ . Figur C.1 og C.3 viser derimot at forsøk 8 følger det forventede forløpet i både i  $\varepsilon$ - $q$  og i  $p'$ - $q$  plottene. Det mistenkes derfor at det store volumet utpresset porevann skyldes en lekkasje i membranen. Dette kan stamme fra et hull som ikke ble oppdaget under inspeksjon av membranen, et hull som ble dannet under innbyggingen etter inspeksjonen ble utført eller det kan skyldes at O-ringene ikke lyktes i å klemme membranen tilstrekkelig godt mot pidestall og toppstykke. Resten av forsøket viser gode resultater og forsøket blir benyttet til sammenligning videre i oppgaven.

## **Forsøk 9**

Under innbyggingen av forsøk 9 ble leireprøven truffet av lastcellen i toppen. Trefningen forekom i det treaksialcellen skulle monteres over prøven og lastcellen ikke var dratt tilstrekkelig opp. Det ble ikke registrert synlig skade på prøven. Prøven var bygd inn med filter, plassert på pidestall, med toppstykke plassert og omsluttet av membran. En mindre forstyrrelse av prøven kan derfor ha forekommet uten at dette viste seg synlig gjennom membranen. Ved sammenligning med andre forsøk, se figur C.1 og C.3, viser det seg ingen synlige avvik fra normalen og forsøket fremstår ikke som spesielt forstyrret. Vurdert med hensyn på volumendring og endring i poretrykk scorer forsøket henholdsvis godt og god til brukbar som vist i tabell 3.6. Prøveforstyrrelsen forårsaket av trefningen anses derfor som uvesentlig og forsøket vil bli brukt videre i oppgaven.

## **Ødometerforsøk**

### **Forsøk 2**

Ved innbygging av en ødometerprøve for testing av blokken hentet opp fra 6 til 6,35 meters dybde oppsto det problemer med å få ut en god prøve. Leiren sprakk opp for hvert forsøk på innbygging. Det ble derfor valgt å utføre et forsøk da det lyktes å få en prøve uten for store skader. Visse sprekker fantes og forsøket ble antatt å være forstyrret, men forsøket ble utført for å se om noe av jordens egenskaper kunne hentes ut. Resultatene fra forsøket underbygger antagelsen om en kraftig forstyrret prøve. Da det lyktes å bygge inn en ny prøve senere, med mindre forstyrrelse, ble det valgt å ikke benytte forsøk 2 i denne oppgaven for å sikre best mulig kvalitet på dataene.

### **Forsøk 3**

Etter ødometerforsøk 3 ble det som nevnt i kapittel 4.1.2 oppdaget et problem med poretrykkmåleren da denne ikke registrerte en endring ved økende spenning. Som en følge av dette gjenspeiler de effektive spenningene for forsøket, som vist i figur 3.23, egentlig de totale spenningene påført under forsøket. Da dybdeforskjellen til leirene brukt i ødometerforsøk 1 og ødometerforsøk 3 kun var på omtrent 25 cm og det ikke var noen visuell forskjell i form av grovere lag i de to dybdene, ble det besluttet å benytte poretrykket målt i ødometerforsøk 1 for å korrigere spenningene i ødometerforsøk 3. Dermed ble  $p'_c$  funnet i ødometerforsøk 3 redusert med 2/3 av poretrykket ved tilsvarende spenning i ødometerforsøk 1 etter likning 2.24. Da det ikke senere har blitt påvist

store forskjeller i tettheten av kornstrukturen, vanninnhold eller styrkeparametre ved forsøkene utført på leire ved dybden rundt ødometerforsøk 1 og i dybden til ødometerforsøk 3, anses det som sannsynlig at de vil ha en tilnærmet lik oppbygging av poretrykk under forsøkene.





## **Tillegg D**

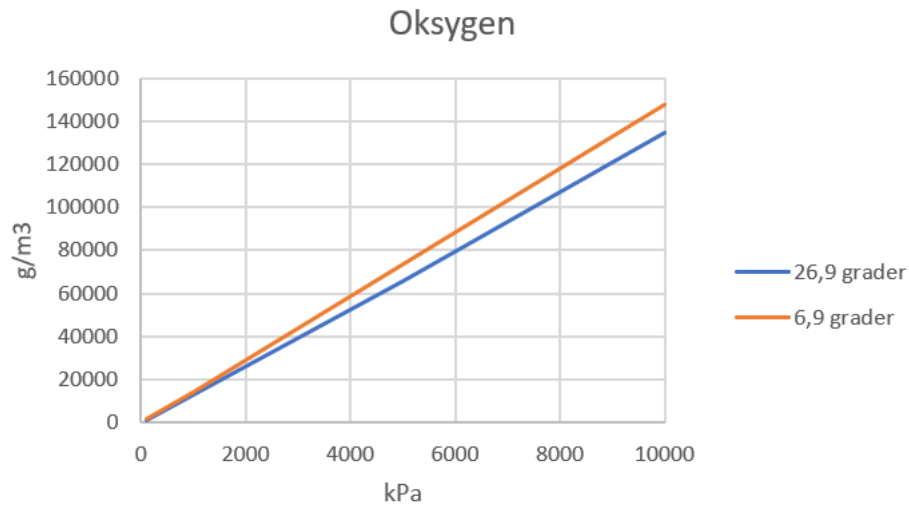
# **Teoretiske beregninger av gjenværende volum luft**

	A	B	C
1			
2	T0	25	degC
3	T1	26,9	degC
4	P0	100	kPa
5	P1	2100	kPa
6	Vsystem	0,001	m3
7	Vw	=B6-(B9*B6)	m3
8	Oppløst gass initielt?	Nei	
9	V%fg0 of Vsystem	0,2	
10			
11	T0	=273,15+B2	K
12	T1	=273,15+B3	K
13	P0	=B4*1000	Pa
14	P1	=B5*1000	Pa
15	Vg0	=B9*B6	m3
16			
17		Oksygen	
18	V0 (Opprinnelig mengde gass i systemet)	=B41*B9*B6	m3
19	V1 (Mengde gass i systemet etter kompresjon dersom ingenting er løst opp)	=B18)*\$B13/\$B14	m3
20			
21	Hcp0(T0)	0,000013	mol/m3Pa
22	Hcp0(T1)	=B21*EKSP(B23*(1/B12-1/B11))	
23	temp avh	1500	
24			
25	rhog0 (26,9)	=OksygenIC5	g/m3
26	rhog0(6,9)	=OksygenIC16	g/m3
27	rhog0	=HVIS(\$B\$3=26,9;B25;B26)	
28	rhog1 (26,9)	=B25+(OksygenIC6-OksygenIC5)/(OksygenIA6-OksygenIA5)*(B5-B13/1000)	g/m3
29	rhog1(6,9)	=B26+(OksygenIC17-OksygenIC16)/(OksygenIA17-OksygenIA16)*(B5-B13/1000)	g/m3
30	rhog1	=HVIS(\$B\$3=26,9;B28;B29)	
31	Mg (molar masse)	=2*15,9994	g/mol
32			
33	s0	=B22*B41*\$B13*B\$31	g/m3 vann
34	s1	=B22*B41*\$B14*B\$31	g/m3 vann
35			
36	Vdg0 (potensiale for oppløst gass ved T1 og P0)	=HVIS(B8="Ja";B33*\$B\$7/B27;0)	ekvivalent m3 gass
37	Vdg1 (potensiale for oppløst gass ved T1 og P1)	=B34*\$B\$7/B30 -(HVIS(B36-B39>0;B36-B39;0))	ekvivalent m3 gass
38			
39	Allerede oppløst gass i grunnvann	=B33*\$B6/B27	ekvivalent m3 gass
40			
41	Andelen av de ulike gassene i luft	0,21	
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54	Potensiell Vfg1 (Hvor mye fri luft som er igjen etter komprimering og oppløsning)	=B19-B37	
55	Vg1 (Volum gjenværende luft i systemet av O2, N2 og Ar ved T1 og P1)	=HVIS(B54<0;0;B54)	m3
56	Totalt volum gjenværende luft		

	D	E	F
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17		Nitrogen	
18		=E41*B9*B6	m3
19		=(E18)*\$B13/\$B14	m3
20			
21		0,0000064	
22		=E21*EKSP(E23*(1/B12-1/B11))	
23		1300	
24			
25		=NitrogenIC5	g/m3
26		=NitrogenIC16	g/m3
27		=HVIS(\$B3=26,9;E25;E26)	
28		=E25+(NitrogenIC6-NitrogenIC5)/(NitrogenIA6-NitrogenIA5)*(B5-B13/1000)	g/m3
29		=E26+(NitrogenIC17-NitrogenIC16)/(NitrogenIA17-NitrogenIA16)*(B5-B13/1000)	g/m3
30		=HVIS(\$B3=26,9;E28;E29)	
31		=2*14,0067	g/mol
32			
33		=E22*E41*\$B13*E\$31	g/m3 vann
34		=E22*0,78*\$B14*E\$31	g/m3 vann
35			
36		=HVIS(B8="Ja";E33*\$B\$7/E27;0)	ekvivalent m3 gass
37		=E34*\$B\$7/E30 -(HVIS(E36-E39>0;E36-E39;0))	ekvivalent m3 gass
38			
39		=E33*\$B6/E27	ekvivalent m3 gass
40			
41		0,78	
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54		=E19-E37	
55		=HVIS(E54<0;-0,000001;E54)	m3
56		=SUMMER(B55;E55;H55)	

	G	H	I
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17		Argon	
18		=H41*B9*B6	m3
19		=(H18)*\$B13/\$B14	m3
20			
21		0,000014	
22		=H21*EKSP(H23*(1/B12-1/B11))	
23		1500	
24			
25		=ArgonI C5	g/m3
26		=ArgonI C15	g/m3
27		=HVIS(\$B3=26,9;H25;H26)	
28		=H25+(ArgonI C6-ArgonI C5)/(ArgonI A6-ArgonI A5)*(B5-B13/1000)	g/m3
29		=H26+(ArgonI C16-ArgonI C15)/(ArgonI A16-ArgonI A15)*("Gjenværende gass ny formel" I B13/1000)	g/m3
30		=HVIS(\$B3=26,9;H28;H29)	
31		=39,948	g/mol
32			
33		=H22*H41*\$B13*H\$31	g/m3 vann
34		=H22*0,01*\$B14*H\$31	g/m3 vann
35			
36		=HVIS(B8="Ja";H33*\$B\$7/H27;0)	ekvivalent m3 gass
37		=H34*\$B\$7/H30 -(HVIS(H36-H39>0;H36-H39;0))	ekvivalent m3 gass
38			
39		=H33*\$B6/H27	ekvivalent m3 gass
40			
41		0,01	
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54		=H19-H37	
55		=HVIS(H54<0;0;H54)	m3
56			

## Densitet av oksygen



Figur D.1: Densitet av oksygen med temperatuene 6,9°C og 26,9°C ved ulike trykk.

### Densitet av oksygen ved 6,9°C

Absolutt trykk [kPa]	$\text{g/m}^3$
100	1376
1000	13860
10000	147600

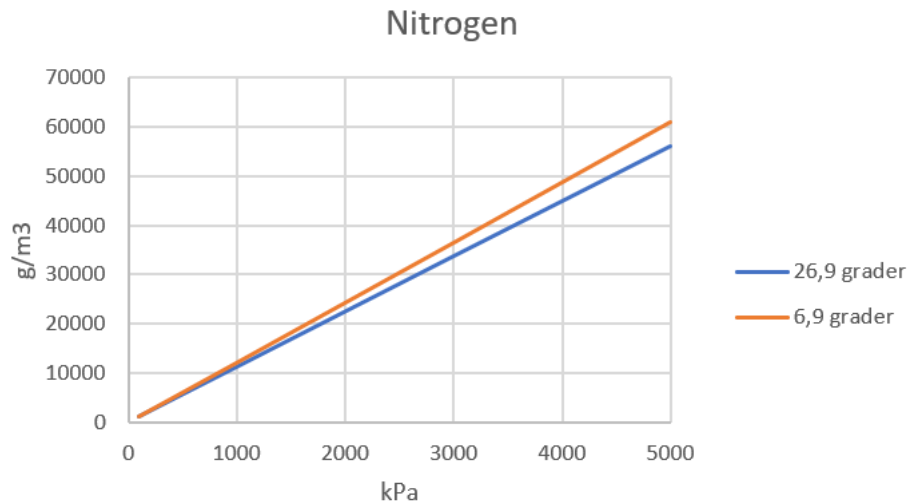
Tabell D.1: Densitetene til oksygen med en temperatur på 6,9°C ved ulike trykk. Verdiene er hentet fra Engineering ToolBox [39].

### Densitet av oksygen ved 26,9°C

Absolutt trykk [kPa]	$\text{g/m}^3$
100	1284
1000	12910
5000	65970
10000	134600

Tabell D.2: Densitetene til oksygen med en temperatur på 26,9°C ved ulike trykk. Verdiene er hentet fra Engineering ToolBox [39].

## Densitet av nitrogen



Figur D.2: Densitet av nitrogen med temperatuene 6,9°C og 26,9°C ved ulike trykk.

### Densitet av nitrogen ved 6,9°C

Absolutt trykk [kPa]	g/m <sup>3</sup>
100	1205
1000	12090
3000	36480
5000	61016

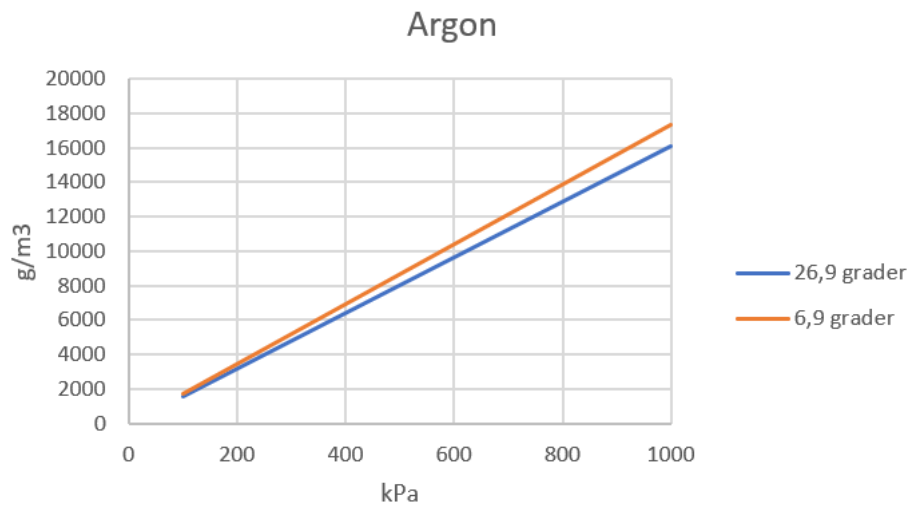
Tabell D.3: Densitetene til nitrogen med en temperatur på 6,9°C ved ulike trykk. Verdiene er hentet fra Engineering ToolBox [40].

### Densitet av nitrogen ved 26,9°C

Absolutt trykk [kPa]	g/m <sup>3</sup>
100	1126
1000	11230
3000	33680
5000	56130

Tabell D.4: Densitetene til nitrogen med en temperatur på 26,9°C ved ulike trykk. Verdiene er hentet fra Engineering ToolBox [40].

## Densitet av argon



Figur D.3: Densitet av argon med temperatuene 6,9°C og 26,9°C ved ulike trykk.

### Densitet av argon ved 6,9°C

Absolutt trykk [kPa]	g/m <sup>3</sup>
100	1717
1000	17300

Tabell D.5: Densitetene til argon med en temperatur på 6,9°C ved ulike trykk. Verdiene er hentet fra Engineering ToolBox [41].

### Densitet av argon ved 26,9°C

Absolutt trykk [kPa]	g/m <sup>3</sup>
100	1603
1000	16110
5000	82280

Tabell D.6: Densitetene til argon med en temperatur på 26,9°C ved ulike trykk. Verdiene er hentet fra Engineering ToolBox [41].