

# Prøveforstyrrelser ved bruk av NGI 54 mm sylindrerprøvetaker i lerie

- en studie av prosedyreeffekter

**Idun Rabbås Holsdal**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, BAT

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





Oppgavens tittel: Prøveforstyrrelser ved bruk av NGI 54mm sylinderprøvetaker i leire – en studie av prosedyreeffekter	Dato: 24.6.2012		
	Antall sider (inkl. bilag): 155		
	Masteroppgave	x	Prosjektoppgave
Navn: Idun Rabbås Holsdal			
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal			

<p><b>Ekstrakt:</b></p> <p>Opptak av uforstyrrede prøver er en utfordring og et viktig tema innenfor geoteknikk. De fleste prøver som skal brukes til å bestemme jordens styrke- og stivhetsparametere blir tatt opp med sylinderprøvetaker, og i Norge benyttes i hovedsak NGI 54mm sylinderprøvetaker. Det er derfor ønskelig at sylinderprøvetakingen foretas på en måte slik at unødvendig prøveforstyrrelser unngås.</p> <p>To metoder blir brukt for løsning av jorden fra underliggende masse etter utskjæring og før opptak. En metode bruker kun trekk slik at prøven går i brudd i bunn, en annen metode bruker rotasjon for å vri av prøven. Masteroppgaven undersøker om de to metodene har ulik påvirkning på prøve kvaliteten til prøvene som blir tatt opp.</p> <p>Det er tatt opp sylinderprøver fra like dybder der det er variert mellom å bruke trekk og å bruke rotasjon ved opptak. I laboratoriet det utført rutineundersøkelser, ødometer tester og treksialtester. Prøveresultatene er vurdert i forhold til metode brukt for opptak, prøvestykkets plassering i prøvesylinderen og lagringstid fra opptak fram til testing. En undersøkelse og vurdering er også gjort i forhold til lagringstid av blokkprøver.</p> <p>Laboratorieresultatene viser at prøvestykkets plassering i sylinderen er av stor betydning, da kvaliteten er varierende gjennom lengden av sylinderen. De beste resultatene ble oppnådd ved testing av prøvestykker fra midten av prøvesylinderen for prøver tatt med rotasjon. For leirer av svært sensitiv karakter bør ikke rotasjon benyttet ved opptak. En lagringstid på få dager kan forstyrre sylinderprøvene betydelig, og bør tas hensyn til ved vurdering av bestemte parameteres nytteverdi i sammenheng med prosjektering. Blokkprøver tåler lagring i større grad enn sylinderprøver, men burde begrenses for å oppnå pålitelige resultater.</p>
---

#### Stikkord

1. Prøveforstyrrelser
2. Sylinderprøvetaking
3. Laboratorieundersøkelser

Idun R. Holsdal



---

## FORORD

Masteroppgaven er skrevet i 10. og avsluttende semester ved sivilingeniørstudiet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU, våren 2012. Oppgaven gir 30 studiepoeng ved Institutt for bygg, anlegg og transport.

Oppgaven er en delvis videreføring av prosjektoppgaven "Prøveforstyrrelser med sylindertestning. Forskjellige metoders effekt på prøve kvaliteten" av Ingelin Gjengedal og Idun Holsdal høsten 2011, utarbeidet etter ide framlagt av veileder Arnfinn Emdal.

Takk til Amanuensis Arnfinn Emdal for klarlegging av oppgaven, hjelp og ideer underveis. Takk til Gunnar Winther og Jan Jønland for opptak av prøver og Per Østensen og Jan Jønland for assistanse og hjelp i forbindelse med laboratoriearbeidet. Takk til Ph.d – stipendiat Anders Gylland for tilgang på datamateriale.

Trondheim, juni 2012.

Idun Rabbås Holsdal



---

## SAMMENDRAG

Opptak av uforstyrrede prøver er en utfordring og et viktig tema innenfor geoteknikk. Prosessen med å ta opp og flytte jordprøven fra sin naturlige tilstand in situ og til den er klar for å testes i laboratoriet inneholder mange elementer som kan påvirke prøve kvaliteten. Prøve kvaliteten påvirker igjen bestemmelsen av styrke- og stivhetsparametere. Ved dimensjonering i forbindelse med geoteknisk prosjektering er det viktig at de estimerte parameterne fra laboratorieundersøkelsene er så korrekte som mulig i forhold til jordens egenskaper in situ. Underestimering av parametere kan gjøre dimensjoneringen unødvendig konservativ og kostbar fordi den baserer seg på at jorden er svakere enn den virkelige jorden. Ved overestimering av parametere vil det kunne få sikkerhetsmessige konsekvenser ved at dimensjoneringen baserer seg på en jord som er sterkere enn den virkelige jorden. Dersom prøvene er påført mye forstyrrelser og er av dårlig kvalitet, kan nytteverdien av de bestemte parameterne bli minimal.

Prøver tatt opp med blokkprøvetaker gir til dels svært god prøve kvaliteten og synliggjør at kvaliteten på sylindereprøver er betydelig dårligere ved sammenligning. De fleste uforstyrrede prøvene blir av praktiske og økonomiske årsaker tatt opp med en sylindereprøvetaker, og i Norge benyttes vanligvis NGI 54mm sylindereprøvetaker. Siden dette er den mest brukte metoden for opptak av uforstyrrede prøver er det viktig å finne den beste måten å utføre sylindereprøvetaking på, slik at unødvendige prøveforstyrrelser unngås.

Ved sylindereprøvetaking blir stempel og prøvetaker først ført ned til ønske dybde, og prøven skjæres deretter ut. Før opptak må prøven løsnes fra underliggende masser i bunn, og det er to ulike metoder dette kan gjøres på. Trekk går ut på å trekke prøvesylinderen litt rett opp, vente til jorden går til brudd, og deretter fortsette opptrekket. Den andre metoden omtales som rotasjon, og går ut på å rotere prøvesylinderen slik at den vrir av i bunn før den trekkes opp.

Litteraturstudiet viser at det er utført mange studier innenfor temaet prøveforstyrrelser og sylindereprøvetaking. Det er i midlertidig ikke funnet litteratur som går spesifikt inn på hvordan sylindereprøven påvirkes av valgt metode for løsning fra underliggende masser eller hvordan den videre påvirkes av opptrekket. Masteroppgaven fokuserer på om valgt metode for opptak har innvirkning på prøve kvaliteten. Dette er undersøkt ved å ta opp sylindereprøver med begge metodene, og for deretter å teste prøvene i laboratoriet.

Det er i alt tatt opp og testet 13 sylindere fra 4 dybder. Det var et mål å ta opp flest mulig prøver fra samme dybde, slik at prøvene kunne sammenlignes på likt grunnlag. I laboratoriet er det utført rutineundersøkelser for alle sylindere, 24 ødometertester (CRS) og 35 treksialtester (CIU). I tillegg til metoden som er benyttet, er også prøvestykkets plassering i sylinderen og lagringstid før testing en faktor som er vurdert i forhold til prøveresultatene. Prøve kvaliteten er vurdert ved bruk av poreallsforholdet. En test er også utført i forbindelse med langtids lagringstid av blokkprøver.

For meget sensitiv leire med  $s_r < 0,2$  kPa og  $S_t > 100$  var forsøk på å rotere ved opptak ikke vellykket da store deler av prøven ble mistet under opptak. Den delen av prøven som kom opp var synlig forstyrret. For leire og kvikkleire med  $s_r > 0,4$  kPa og  $S_t < 80$  er det utført vellykkede opptak med bruk av rotasjon som metode. Det har ikke vært problemer med å ta opp prøvene ved bruk av trekk.

---

Laboratoriearbeidet var vellykket gjennomført, alle prøver ble testet innen 4 dager etter opptak, og viser generelt god kvalitet. Det er ikke funnet en klar sammenheng mellom kvalitet på prøvene og metoden som er brukt for prøvetakingen. Det er i midlertidig gjort observasjoner som indikerer at metoden kan ha betydning. Fra treksialtestene er det funnet at prøvestykkets plassering i sylindren er av betydning for de bestemte styrkeparametere. Det er gjennomgående at prøvestykkene fra midten av prøvesylindren gir betydelig bedre resultater enn prøvestykkene tatt lenger opp og lenger ned i sylindren. Dette gjelder både prøvene som er tatt opp med rotasjon og prøvene som er tatt opp med trekk. Prøvene som er tatt opp med rotasjon gir spesielt gode resultater for prøvestykket fra midten av sylindren, der man finner de beste resultatene for hele laboratoriearbeidet.

For prøvestykkene som er tatt lenger opp og lenger ned i prøvesylindren er resultatene noe mer varierende og knyttes ikke til metoden som er brukt ved opptak. Det var forventet at det i den nedre delen av sylindren skulle være forskjeller på resultatene de to metodene gav, men en slik forskjell er ikke påvist.

Innad i prøvesylindren er det større variasjoner for prøvene som er tatt med rotasjon enn for prøvene tatt med trekk. Dette kan tyde på at trekk påvirker prøvesylindren likt gjennom hele sylindren, mens bruk av rotasjon har ulik påvirkning gjennom lengden av prøvesylindren.

Arbeidet viser at lagringstiden fra opptak og til testing kan påvirke prøveresultatene, selv om lagringstiden kun er på noen få dager. Endring i poreallsforholdet under konsolidering er økende med antall dager sylindren er lagret før åpning. For å få gode resultater som har nytteverdi burde sylinderprøvene derfor testes i laboratoriet svært raskt etter opptak. Blokkprøven som ble lagret viste endrede egenskaper i forhold til blokkprøven som var blitt testet rett etter opptak. Den lagrede prøven hadde en høyere omrørt skjærstyrke, lavere vanninnhold og høyere bruddtøyning enn den ferske blokkprøven.



---

## ABSTRACT

Undisturbed soil sampling is an important and challenging topic in geotechnical engineering. During sampling and the process of making the sample ready to be tested in the laboratory, there are many factors which can affect its sample quality. The sample quality affects the determination of strength and stiffness parameters. With concern to the foundation design it is important that the estimated parameters are as close to the in situ soil properties as possible. Underestimation of the parameters can lead to a design which is unnecessarily conservative and costly, because it is based on a soil which is weaker than the real soil. Overestimation of the parameters can have consequences for the safety, because the design is based on a soil which is stronger than the real soil.

Block sampling gives very good sample quality, and it is clear that the quality of piston samplers often is poor in comparison. The majority of undisturbed samples are sampled by using a piston sampler, and in Norway NGI 54mm piston sampler is normally used. In most projects it is not cost efficient or practically feasible to use block sampling. Based on this, it is very important to know how to obtain good piston samples and to avoid unnecessary sample disturbance during sampling.

When using a piston sampler, the piston and tube is first brought down to the desired depth, and the sample is cut by penetration of the tube. Prior to retrieval, there are two methods which can be used to separate the sample from the subsoil. One method use pure pull, the other method twist of the sample in the bottom.

Literature studies and previous work shows that it has been done a lot of work associated to the topic of sample disturbance and piston sampling. However, there is found no literature which concentrate on how the phase preceding the retrieval and the actual retrieval of the tube affects the sample quality. This thesis focuses on this topic. The problem has been studied by using both methods for sampling. After sampling, the samples have been brought in to the laboratory for testing and the results have been analyzed and compared.

Laboratory testing has been carried out on 13 piston tube samples, taken from 4 different depths. It was desirable to take as many samples as possible from the same depth, so the comparison was based on the same foundation. The laboratory testing include index testing, 24 odometer tests (CRS) and 36 triaxial tests (CIU). In addition to the method used prior to retrieval, the position of the specimen in the tube and storing time before testing is considered when evaluating the results. Sample quality is quantified by using the change in normalized void ratio, both for the odometer test and the triaxial test. In addition, parameters and plots are compared. One test is also performed in connection with long term storage of block samples.

Though no clear correlation between the method used and sample quality is found, the results indicate that the method used may have an impact on the sample quality. From the triaxial test it is found that the position of the specimen in the cylinder has an impact on the strength parameters. The specimen from the middle of the cylinder show generally better results than the specimens closer to the top and closer to the bottom of the cylinder. This applies for samples taken by both methods. However, the samples which have been twisted are particular good.

---

A difference was expected between the specimens from the bottom of the cylinder, regarding the method that had been used. Such a difference is not found. Nor are there obvious correlations with method used and sample quality for specimens from the top of the cylinder.

Inwards one cylinder the results varied with the position of the specimen. The variation was found to be larger for the samples that have been twisted. This can indicate that disturbance the method of pulling apply the sample is more even distributed through the length of the cylinder, and that the disturbance the method of twisting apply the sample is more uneven distributed through the sample.

The study shows that the storage time from sampling to testing can affect the test results, even though it is just a few days. The change in void ratio increases with number of days the cylinder is stored before opening. To obtain good, reliable and representative results for the actual soil, the tube samples should be tested within a short time after sampling. The block sample which had been stored for 7 months had some changed properties compared to the block sample tested in a short time after sampling. The stored sample had lower water content, higher remoulded shear strength and higher strain to failure. However, despite the fact it had been stored for a long time, the stored block sample did have quite good quality.

---

# INNHold

<b>FORORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>INNHold</b> .....	<b>VII</b>
<b>FIGURLISTE</b> .....	<b>IX</b>
<b>TABELLISTE</b> .....	<b>XI</b>
<b>SYMBOLLISTE</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Prøvetaking.....	3
2.1.1 Sylinderprøver.....	3
2.1.2 Blokkprøver.....	4
2.2 Trekk og rotasjon ved opptak av sylinderprøver.....	4
2.3 Prøveforstyrrelser.....	6
2.3.1 Kategorisering.....	6
2.3.2 Faktorer som påvirker prøve kvaliteten.....	7
2.3.3 Vurdering av prøve kvaliteten.....	7
<b>3 TIDLIGERE ARBEID</b> .....	<b>13</b>
3.1 Analytiske studier.....	13
3.2 Numeriske studier.....	15
3.3 Oppsummerende spenningssti.....	19
3.4 Utdrag av empirisk studie.....	20
<b>4 TREKK OG ROTASJON- TILNÆRMINGER</b> .....	<b>23</b>
4.1 Opptrekk.....	23
4.2 Rotasjon.....	25
<b>5 FELT- OG LABORATORIEARBEID</b> .....	<b>27</b>
5.1 Feltarbeid.....	27
5.2 Utførte laboratoriearbeid.....	28
<b>6 RESULTATER</b> .....	<b>31</b>
6.1 Rutineundersøkelser.....	31
6.2 Ødometer.....	35
6.3 Tre aksialforsøk.....	36
<b>7 SAMMENLIGNINGER OG DISKUSJON</b> .....	<b>39</b>

---

7.1	Rutineundersøkelser .....	39
7.2	Forhold som kan påvirke prøveresultatene .....	41
7.3	Ødometerforsøk .....	42
7.4	Treaksialforsøk.....	46
7.4.1	Generelt.....	46
7.4.2	Plassering i sylinder .....	50
7.4.3	Lagringstid .....	55
<b>8</b>	<b>BLOKKPRØVER.....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>KONKLUSJON .....</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>VIDEREFØRING AV OPPGAVEN .....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>REFERANSER .....</b>	<b>67</b>
	<b>BILAG A – TREAKSIALFORSØK .....</b>	
	<b>BILAG B – ØDOMETERFORSØK.....</b>	
	<b>BILAG C – LAGRINGSTID .....</b>	
	<b>VEDLEGG A – OPPGAVETEKST .....</b>	

---

## FIGURLISTE

Figur 1 Prøvesylinderens geometri (NGF 1997).....	4
Figur 2 Forstyrrelser ved nedpressing av stempel med prøvetaker (NGF 1997).....	7
Figur 3 Eksempel på CRS- forsøk. (DeGroot et al. 2005).....	10
Figur 4 Eksempel på CAU-tester av ulik kvalitet. (Lunne et al. 2006).....	11
Figur 5 CAU-test av sylinderprøver av kvikkleire. F1 er testet umiddelbart etter prøvetaking, F2 er testet 3 dager senere. Forskjellen i styrke er tydelig. (Bjerrum 1973).....	12
Figur 6 Tøyninger i senterlinjen for prøven, avhengig av forholdet mellom diameter og tykkelse for prøvetakeren. (Baligh et al. 1987).....	15
Figur 7 Splitting av noder for å etterligne prøvetakerens reelle geometri ved nedpressing av prøvetakeren.....	16
Figur 8 T.v.: Oppsett for elementnett for de numeriske analysene.....	16
Figur 9 Vertikale tøyninger, positivt tøyning indikerer trykk.(Wu 1991).....	17
Figur 10 Vertikal tøyningshistorie ved senterlinjen av prøven under penetrasjon av prøvetakeren.....	18
Figur 11 Hypotetisk spenningssti under prøvetaking- og prøvestykkeforberedelser. (Ladd ogDeGroot 2003).....	19
Figur 12 Poretallsforhold ved pålastning til in situ effektive spenninger, CRS OG CAUC (Long et al. 2009).....	22
Figur 13 Opptrekk av sylinder.....	23
Figur 14 Torsjon av sylinder.....	25
Figur 15 Elastisk og plastisk skjærspenningsfordeling (Larsen 2012).....	25
Figur 16 Veiledning til oppdeling av sylinderprøven.....	28
Figur 17 T.v.: Innebygd prøve i ødometerapparat. T. h: Innbygd prøve i treaksialapparat.....	29
Figur 18 Sylinder H_R2_8m. Meget sensitiv leire tatt opp ved bruk av rotasjon.....	31
Figur 19 Typiske brudd etter enaksialforsøk. T.v. prøve fra 5 meter, t.h. prøve fra 6 meter.....	33
Figur 20 Sammensetting av resultatene fra rutineundersøkelsene.....	40
Figur 21 Resultat fra CRS for alle sylindre tatt opp våren 2012, 5meter.....	43
Figur 22 Resultat fra CRS for alle sylindre tatt opp våren 2012, 6 meter.....	43
Figur 23 Prekonsolideringsspenning og OCR tolket fra ødometerforsøkene.....	44
Figur 24 Poretallsforholdet ved testede dybder.....	45
Figur 25 Poretallsforholdet sammenlignet med prøvestykkets plassering i prøvesylinderen.....	45
Figur 26 Fargekodingen ved framstilling av treaksiltestene.....	46
Figur 27 Treaksialresultater for prøver tatt våren 2012, 5- 5,8 meter. Øverst: q-p'-plot, Nederst: $\tau$ - $\epsilon$ -plot.....	47
Figur 28 Treaksialresultater for prøver tatt våren 2012, 6-6,8 meter. Øverst: q-p'-plot, Nederst: $\tau$ - $\epsilon$ .....	48
Figur 29 Skjærspenninger og bruddtøyning fra treaksialforsøk mot dybde.....	49
Figur 30 Sammenheng mellom skjærstyrke og bruddtøyning for alle prøvene.....	49
Figur 31 Poretallsforholdet for alle prøvene fra treaksialforsøk.....	50
Figur 32 Resultat fra sylinder V_R2_6m. En ujevn start kommer av kontaktfeilen i treaksialmaskinen.....	51
Figur 33 Resultat fra V_T2_6m. Her er kontaktfeilen i treaksialmaskinen rettet opp.....	51
Figur 34 Alle prøvene tatt våren 2012, sammenlignet for samme plassering i sylinderen, rotasjon/trekk.....	53

---

Figur 35 Bruddtøyning sammensatt med prøvestykkets plassering i prøvesylinderen, 0 meter er den åpne prøvens topp, 0,8 meter er prøvens bunn. Sammenheng for prøver tatt med rotasjon.....	54
Figur 36 Bruddtøyning sammensatt med prøvestykkets plassering i prøvesylinderen, 0 meter er den åpne prøvens topp, 0,8 meter er prøvens bunn. Sammenheng for prøver tatt med trekk.....	54
Figur 37 Poretallsforhold i forhold til antall dager lagret i sylinter .....	56
Figur 38 Poretallsforholdet i forhold til antall dager lagret i kjøleskap.....	56
Figur 39 Bruddtøyning i forhold til total lagringstid.....	57
Figur 40 CIU- test, blokkprøver og sylinderprøver.....	60
Figur 41 CRS- forsøk, blokkprøver og sylinderprøver på kvikkleire.....	60

---

## TABELLISTE

Tabell 1 Veiledning i forhold til trekk/rotasjon.....	5
Tabell 2 Kategorier, av prøvetakingsmetoder og kvalitetsklasser, gjengitt fra NS-EN-1997-2:2007 (2008).....	6
Tabell 3 Klassifisering av prøver testet i laboratoriet etter poretallsforhold, gjengitt fra Lunne et al. (1997).....	8
Tabell 4 Klassifisering etter volumtøyninger, gjengitt fra Andresen og Kolstad (1980) .....	8
Tabell 5 Metoder brukt av de ulike mannskapene ved opptak av sylinderprøvene, utdrag (Long et al. 2009) ("Overcoring"= sammentrykking i topp).....	21
Tabell 6 Parametre for NGI 54mm prøvetaker.....	24
Tabell 7 $s_r$ og $s_u$ ved likevekt.....	25
Tabell 8 Oversikt over prøver tatt opp.....	27
Tabell 9 Klassifisering av enaksielt trykkforsøk, gjengitt fra Vegdirektoratet (2010) .....	28
Tabell 10 Klassifisering av sensitivitet, gjengitt fra Vegdirektoratet (2010).....	29
Tabell 11 Resultat fra utførte konusforsøk .....	32
Tabell 12 Resultat fra enaksielt trykkforsøk og tetthet .....	33
Tabell 13 Vanninnhold.....	34
Tabell 14 Tolkede parametre etter ødometerforsøk.....	35
Tabell 15 Tolkede parametre fra treaksialforsøk.....	37





---

## SYMBOLLISTE

a	Attraksjon
e	Poretall
$e_0$	Initial poretall
D	Dilatansparameter
$K'_0$	Hviletrykkskoeffisient
m	Modultall
M	Ødometermodul
NC	Normalkonsolidert
OC	Overkonsolidert
OCR	Overkonsolideringsgrad
$p'_c$	Prekonsolideringsspenning
$\sigma'_0$	Initialspenning
$s_u$	Udrenert skjærstyrke
$s_r$	Omrørt skjærstyrke
$S_t$	Sensitivitet
w	Vanninnhold
$\Delta e$	Endring i poretall
$\varphi$	Friksjonsvinkel
$\sigma'$	Effektivspenning
$\sigma'_m$	Middelspenning, $\sigma'_m = 1/3(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) = p'$
$\sigma'_d$	Deviatorspenning, $\sigma'_d = \sigma'_1 - \sigma'_3 = q$
$\gamma$	Tyngdetetthet
$\tau$	Skjærspenning
$\varepsilon$	Tøyning
$\varepsilon_a$	Aksiell tøyning
$\varepsilon_{vol}$	Volumetrisk tøyning
$\Delta V$	Endring i volum
$V_0$	Initialt prøvevolum
$\Delta \varepsilon_{vol}$	Volumtøyning under konsolidering i treaksialforsøk
CRS	Kontinuerlig ødometertest
CAU	Anisotrop konsolidert udrenert treaksialtest
CIU	Isotrop konsolidert udrenert treaksialtest
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
NGI	Norges Geotekniske Institutt
NGF	Norsk Geoteknisk Forening
NS	Norsk Standard
SSV	Statens Vegvesen



## 1 INNLEDNING

Opptak av det som omtales som uforstyrrede prøver er et viktig tema innenfor geoteknikk. Det er ikke i praksis mulig å ta opp helt uforstyrrede prøver, men begrepet brukes som benevnelse på prøver som har tilfredsstillende lite forstyrrelser slik at de kan benyttes til bestemmelse av jordens styrke og stivhet. Den geotekniske dimensjoneringen blir i hovedsak basert på parametere tolket fra laboratorietesting av prøver. Feilestimering av jordparametere kan påvirke dimensjoneringen i stor grad. Ved underestimering av styrke- og stivhetsparametere vil dimensjoneringen kunne bli unødvendig konservativ og føre til at bygge- og anleggsarbeid vil kreve ekstra materielle og økonomiske ressurser. Ved overestimering av parametere vil det kunne få sikkerhetsmessige konsekvenser ved at beregningene baserer seg på en jord som er sterkere enn den i virkeligheten er. Opptak av uforstyrrede prøver blir i dag hovedsakelig foretatt med sylinderprøvetaker, selv om det ved enkelte store prosjekter blir benyttet blokkprøvetaker. Det er derfor ønskelig at prøvetaking med sylinderprøvetaker blir utført på en måte slik at prøveforstyrrelsene blir redusert til det minimale, og estimerte parametere blir så reelle som mulig.

Det er utført en rekke studier og analyser som omhandler prøveforstyrrelser, og hvordan prøvetakingen bør utføres for å redusere disse. Sylinderprøvetakingen består av flere faser, der hovedfasene er nedpressing av prøvetakeren, utskjæring av prøven og opptrekk av prøven. Påvirkningen av de to første fasene på prøveforstyrrelser er nøye studert i flere studier, mens fasen for opptrekk ikke har blitt studert like grundig. I tillegg til utførelsen av selve prøvetakingen påvirkes graden av prøveforstyrrelsene av prøvetakerens geometri, transport og lagring av prøven, åpning og utskyvning av prøven i laboratoriet og innbygning ved laboratorieundersøkelser.

Denne oppgaven fokuserer spesielt på fasen mellom utskjæring av prøven og opptrekk av prøvetakeren. Det er to ulike metoder som blir benyttet for å løsne prøven fra underliggende masser før opptrekk. I den ene metoden blir rotasjon av prøvetakeren benyttet for å vri av prøven i bunn. I den andre metoden trekkes prøvetakeren litt opp slik at jorden i bunn av prøven går til brudd med underliggende masser. Metodene vil bli omtalt som rotasjon og trekk. Målet med oppgaven er å finne ut om det er en sammenheng mellom hvilken metode som er benyttet og prøvekvaliteten til sylinderprøvene. Dette vil spesielt bli undersøkt med tanke på prøvestykkets plassering i sylindringen, der en hypotese var at nedre del av sylindringen vil være mer påvirket av prøveforstyrrelser ved bruk av rotasjon enn ved bruk av trekk.

Masteroppgaven er en fortsettelse av prosjektoppgaven "Prøveforstyrrelser ved sylinderprøvetaking", av Gjengedal og Holsdal, høsten 2011. I denne oppgaven ble det utført et laboratoriearbeid som sammenlignet prøver som ble tatt opp med rotasjon og prøver som ble tatt opp med trekk i forhold til prøveforstyrrelser og prøvekvalitet. Antall prøver som ble testet var for få til å kunne trekke konklusjoner, og laboratoriearbeidet i masteroppgaven fortsetter

derfor på dette arbeidet. I laboratoriet er det utført rutineundersøkelser, 36 treaksialtester (CIU) og 24 ødometerforsøk (CRS).

På grunn av en senere oppdaget feil i registreringen av data fra treaksialapparatet måtte datamaterialet fra prosjektoppgaven behandles og tolkes på nytt, og disse stemmer derfor ikke nøyaktig med resultatene presentert i prosjektoppgaven. Også resultatene fra masteroppgaven måtte, av samme årsak, til dels behandles to ganger.

Oppgaven innledes med teori om prøvetaking og praksis i Norge i kapittel 2. Bakgrunn for bestemmelse og klassifisering av prøveforstyrrelser er beskrevet. Kapittel 3 presenterer tidligere arbeid som har behandlet temaet prøveforstyrrelser.

Kapittel 4 viser beregninger som illustrerer forskjellen på løsrivning av prøven med rotasjon og trekk. Utførelsen av felt- og laboratoriearbeidet er beskrevet i kapittel 5. I kapittel 6 er resultatene fra laboratoriearbeidet kort presentert med tolkede parametere framstilt i tabeller. Resultatene blir videre sammenlignet og diskutert før en konklusjon av arbeidet legges fram, i henholdsvis kapittel 7, 8 og 9. Avslutningsvis er elementer i en eventuell videreføring av oppgaven foreslått i kapittel 10.

## 2 TEORI

I det følgende vil de ulike metodene for prøvetaking av uforstyrrede prøver bli beskrevet. Videre vil kategorisering og klassifisering av prøvetaking og prøveforstyrrelser bli forklart. Faktorer som har innvirkning på prøve kvaliteten og ulike metoder for å vurdere prøve kvaliteten vil bli presentert.

### 2.1 Prøvetaking

Innenfor prøvetaking av uforstyrret leire finnes to metoder som vanligvis blir benyttet; bruk av sylindprøvetaker (stempelprøvetaker) og bruk av blokkprøvetaker. Sylindprøvetaker er den mest brukte metoden, noe som blant annet skyldes høye kostnader og ressursbruk knyttet til blokkprøvetaking (Vegdirektoratet 1997).

#### 2.1.1 Sylindprøver

Sylindprøvetaking er en effektiv metode for opptak av uforstyrrede prøver, da det er mulig å ta opp mange prøver på kort tid og i store dybder.

Felthåndbok 280 (Vegdirektoratet 2010) beskriver sylindprøvetaking utført med stempelprøvetaker. Ved hjelp av forlengelsesrørene som er festet til prøvesylinderen presses prøvetakeren først ned til ønsket dybde for prøvetaking. Innvendig har prøvetakeren et stempel festet til en stempelstang. Ved nedføring er stempelstangen låst til borhodet. Når ønsket dybde for prøveutskjæringen er nådd, frikoples stempelet, låses fast i posisjon i toppen, og prøvesylinderen presses videre ned ved hjelp av forlengelsesrørene. Skjærlengden skal være lik sylindrelengden. Prøven løsnes fra underliggende masser, og trekkes rolig opp. Etter at prøven er kommet opp forsegles den med en gummihette, og transporteres skånsomt for lagring eller testing. Under nedpressing er det viktig å unngå å presse stempelprøvetakeren for langt ned, da dette kan føre til ekstra sammenpressing av prøven ("overcoring") i topp av sylinderen. Opptrekket utføres med forsiktighet, hastigheten avhenger av type leire. Det er viktig at hastigheten ikke er for lav eller for høy, da vil prøven kunne skli ut.

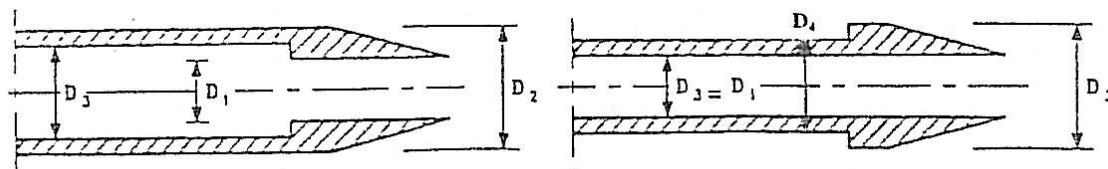
Fremgangsmåten for prøvetaking med stempelprøvetaker kan oppsummeres i tre deler:

- Nedføring: Prøvesylindere og stempel presses ned til ønsket dybde
- Utskjæring: Stempelet fikseres og prøvesylinderen presses ned med konstant hastighet
- Opptaking: Prøven løsnes i bunn og blir trukket rolig opp

Det eksisterer mange ulike versjoner av prøvetakere. I Norge benyttes vanligvis stempelprøvetakeren utviklet av NGI med diameter 54mm. I tillegg blir også 75mm- og 95mm-prøvesylindere benyttet ved enkelte tilfeller. Standard lengde på prøvetakeren er ca. 80 cm. Sylindprøvetakeren finnes i både plast (kompositt) og stål. Bruk av stålsylindere som er i god stand gir vanligvis en bedre kvalitet på prøvene enn bruk av plastsylindere. Til tross for dette benytter mange firma i hovedsak plastsylindere.

I tillegg til lengde og prøvediameter, varierer prøvesylinderens tverrsnittsgeometri. De ulike geometriske parameterne er forklart her, se forklaringer i Figur 1.

- Tverrsnittsforhold:  $C_a = ((D_2^2 - D_1^2)/D_1^2) \times 100 \%$
- Indre klaring:  $C_i = ((D_3 - D_1)/D_1) \times 100 \%$
- Ytre klaring:  $C_o = (D_2 - D_4)/D_4 \times 100 \%$ , der  $D_4$  er utvendig diameter av prøvetakeren
- Eggvinkelen er vinkelen på skjæreggen i enden av sylinderen



Figur 1 Prøvesylinderens geometri (NGF 1997)

Indre klaring skal redusere friksjon mellom prøve og sylinderoverflaten til et minimum ved prøvetakingen. Samtidig bør den være stor nok til at tilstrekkelig svelling av prøven tillates, slik at prøvematerialet oppnår god kontakt med sylinderveggen før opptrekk (NGF 1997).

Videre vil flere studier på hvordan prøvetakerens geometri påvirker prøve kvaliteten bli lagt fram i kapittel 3.

### 2.1.2 Blokkprøver

Opptak av blokkprøver er en mer skånsom måte å ta opp leirprøver på enn sylinderprøvetaking. Lefebvre og Poulin (1979) beskriver metoden for blokkprøvetaking. Blokkprøvetakeren (The Sherbrooke Block sampler) ble utviklet og testet ved University of Sherbrooke, Canada, i løpet av perioden 1975-1978. Ved blokkprøvetaking tas det opp store sylindriske blokker med diameter 250 mm og høyde 350 mm. Prøven tas opp fra bunnen i et forboret hull. Den skjæres deretter ut ved hjelp av tre kuttere som utgjør en ringform, og skjæres i prinsippet som sylinderprøver ved at prøvetakeren roteres rolig ned. Etter prøven er skjært på sidene, låses den horisontale skilleveggen i bunn av prøven gradvis, mens sylinderen fortsatt roterer. Kniver kutter den i underkant, og prøven vil da hvile på skilleveggen som knivene danner. Når prøven er fullstendig skjært ut, trekkes den rolig opp.

Etter opptak er det viktig at prøven vokses raskt og transporteres på en skånsom måte. På grunn av prøvens store volum, vil det ved testing i laboratorium ofte være nødvendig å dele opp arbeidet. Etter utskjæring av prøvestykker, blir de delene som ikke blir testet med det samme vokset på nytt for videre lagring.

På grunn av kostnadene og behovet for ressurser knyttet til blokkprøvetaking, vil det i dag ikke være en mulighet at blokkprøver tar over for sylinderprøver i forbindelse med prosjektering. Det er i midlertid en metode som det kan lønne seg å bruke ved store prosjekter der økonomien tillater det. I tillegg er det svært nyttig og interessant innenfor forskning der det er avgjørende å ha prøver av god kvalitet, og mest mulig lik jordens egenskaper in situ.

## 2.2 Trekk og rotasjon ved opptak av sylinderprøver

Etter utskjæring og før selve opptrekket er det to metoder som blir benyttet for å frigjøre prøven fra de underliggende massene ved sylinderprøvetaking. Den ene går ut på kun å trekke rett opp,

mens man i den andre metoden roterer prøvesylindere slik at jord vrir av i bunn. Metodene vil her bli forklart, i tillegg til at praksis i Norge blir beskrevet.

### Prinsipp for trekk

Etter utskjæring av prøven løftes prøvetakeren rett opp maksimalt 2 centimeter. Bunnen av prøven vil være i strekk, jorden omkring vil være omrørt, og etter noe ventetid vil leiren i enden av prøven ha gått til brudd med underliggende masser. Skjærspenningene mellom prøvetakeren og prøven og påsatt sug i topp er større enn vekten av prøven og skjærstyrken i bunn, og prøven kan trekkes videre opp. For høy hastighet ved opptrekk vil kunne skape vakuum og sug i bunn, slik at prøven kan skli ut.

### Prinsipp for rotasjon

Ved å bruke rotasjon roteres prøvetakeren slik at prøven blir vridd av i enden. Rotasjonen vil påføre prøven torsjon, spesielt i bunn av prøven, slik at prøven løsner. Etter prøven er løsnet trekkes den opp.

Prinsippene for rotasjon og trekk er videre behandlet i kapittel 4.

### Retningslinjer

Håndbøker og retningslinjer som tar for seg feltarbeid har ulike beskrivelser av prøvetakingsprosessen. Ved nedpressing og utskjæring er standardene forholdsvis like, mens det er forskjell for beskrivelsen av opptak. De ulike veiledningene sier følgende om prosessen for sylindertakingsprøvetaking, oppsummert i Tabell 1:

- Statens Vegvesen, Håndbok 015: Utføres med NGI 54mm prøvetaker. Bestemt tempo ved nedpressing; 2-3 cm/sek. 1-2 omdreininger med urskiven for å adskille prøven fra underliggende masser. Etter vridning trekkes prøvetakeren rolig opp igjen. Ved veldig sensitive masser anbefales venting før prøven dras opp etter avvridning. (Vegdirektoratet 1997)
- NGF, Melding nr 11: Utføres med NGI 54mm prøvetaker. Bestemt tempo ved nedpressing; 2-3 cm/ sek. Vridning eller løfting 1-2 cm for å adskille fra underliggende masser. Ved sensitive masser anbefales en ventetid på 5-10 min. Rolig opptrekk. (NGF 1997)
- NS-EN ISO 22475: Prøven løsriveres fra underliggende masser ved å rotere eller trekke prøvetakeren rolig opp. Vent noen minutter før prøvetakeren trekkes opp, spesielt ved sensitive masser. (NS-EN-1997-2:2007 2008)

Tabell 1 Veiledning i forhold til trekk/rotasjon

Veiledning	Trekk	Rotasjon
Felthåndbok 015	Nevnes ikke	OK
Melding nr 11	OK	OK
NS-EN ISO 22475	OK	OK

I Norge blir både rotasjon og trekk benyttet. Dette ble bekreftet av kontakt med bransjen gjennom prosjektoppgaven utarbeidet av Gjengedal og Holsdal (2011). Borledere fra Multiconsult, Rambøll, NGI og Statens Vegvesen ble kontaktet. Enkelte av feltmannskapet som ble kontaktet brukte kun trekk eller kun rotasjon, mens andre byttet mellom metodene avhengig av hvilken type leire som skulle tas opp. Enkelte av de spurte var klar på at de mente den ene

metoden gav bedre resultat enn den andre, og brukte da konsekvent denne. Statens Vegvesen har som standard kun å bruke rotasjon, og blant mannskapet som ble kontaktet, ble dette bekreftet.

## 2.3 Prøveforstyrrelser

Det vil her bli gitt en kort oversikt over kategorisering og klassifisering av prøveforstyrrelser. Det eksisterer flere klassifiseringsmetoder utover det som blir presenter her, men det er fokusert på de som er vanligst å benytte i Norge i dag. Videre blir faktorer som har betydning for prøve kvaliteten og metoder for å vurdere prøve kvaliteten beskrevet.

### 2.3.1 Kategorisering

Prøvens kvalitet kan klassifiseres på ulike måter, og på ulike nivå. Fra Eurokode 7 (NS-EN-1997-2:2007) deles prøvetakingsmetoder inn i 3 kategorier (A-C) og kvalitetsklassen til prøven som testes i laboratoriet deles i fem deler (1-5). Tabell 2 viser sammenhengen mellom parametere som kan bestemmes ut i fra prøvens kvalitetsklasse og prøvetakingskategori.

- Kategori A – Uforstyrret: uendret lagrekke og mekaniske egenskaper er intakt
- Kategori B – Forstyrret: uendret lagrekke, men endrede mekaniske egenskaper
- Kategori C – Omrørt: endret lagrekke og endrede mekaniske egenskaper

Tabell 2 Kategorier, av prøvetakingsmetoder og kvalitetsklasser, gjengitt fra NS-EN-1997-2:2007 (2008)

Parametere/kvalitetsklasse	1	2	3	4	5
<i>Uendrede parametere</i>					
Partikkelstørrelse	x	x	x	x	
Vanninnhold	x	x	x		
Densitet, permeabilitet	x	x			
Stivhet, skjærstyrke	x				
<i>Parametere som kan bestemmes</i>					
Rekkefølge på lagdeling	x	x	x	x	x
Grenser for lag- grov	x	x	x	x	
Grenser for lag- fin	x	x			
Attenberg grenser, spesifikk densitet, organisk innhold	x	x	x	x	
Vanninnhold	x	x	x		
Densitet, porøsitet, permeabilitet	x	x			
Stivhet, skjærstyrke	x				
Prøvetakingskategori i samsvar med EN ISO 22475-1	A				
	B				
					C

Dersom prøvene skal bli brukt til å bestemme styrke- og stivhetsparametere, er det nødvendig å benytte en prøvetakingsmetode innenfor kategori A og oppnå prøver innenfor kvalitetsklasse 1. Blokkprøvetaker og stempelprøvetaker er vanligvis ansett å tilhøre kategori A.

Dersom det ikke oppnås god nok kvalitet på prøven, vil det føre til feilestimering av parameterne. Ofte vil de bli underestimert, noe som gjør at dimensjonering basert på verdiene kan være unødvendig konservativ. Dette kan føre til økt ressursbruk og økte kostnader ved byggeprosjekter. Om parameterne blir overestimert kan det få alvorlige sikkerhetsmessige konsekvenser. Dimensjoneringen baserer seg da på en jord som er sterkere enn den i realiteten er.



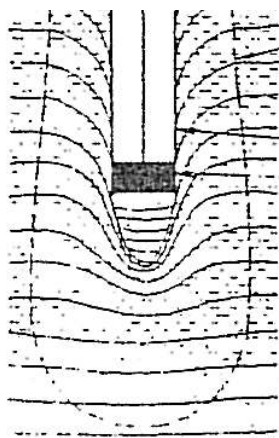
### 2.3.2 Faktorer som påvirker prøve kvaliteten

Det er mange faktorer som kan være med på å påvirke prøve kvaliteten. Selve prøvetakingen, transport, lagring og laboratoriearbeid er av stor betydning.

Faktorer som gjelder spesielt for sylindertaking er:

- Geometri og størrelse til prøvesylinder
- Om det benyttes plast eller stålsylinder, der stål gir best kvalitet
- Kvalitet på sylindren (skarphet av egg, indre klaring, alder og renhet)
- Hastighet ved utskjæring og opptrekk
- Utskyvning av prøver før laboratoriearbeid

I tillegg til dette vil den øvre delen av prøvesylindren bli forstyrret på grunn av massefortrenging ved nedpressing av stempel. Denne forstyrrelsen er ansett til å gjøre utslag opptil 2 x diameteren av prøvetakeren i topp av sylindren, Figur 2. Forstyrrelser grunnet utskjæring er avhengig av overnevnte faktorer, og er videre studert i kapittel 3.



Figur 2 Forstyrrelser ved nedpressing av stempel med prøvetaker (NGF 1997)

Eventuelle forstyrrelser knyttet til opptrekket er tema for analyser laboratoriearbeidet i denne oppgaven.

### 2.3.3 Vurdering av prøve kvaliteten

Det er flere metoder for å vurdere prøve kvaliteten, og noen av disse vil bli forklart i det følgende. Klassifisering i forhold til konsolidering for både treaksialtester og ødometertester vil først bli beskrevet. Deretter vil andre faktorer for vurdering av henholdsvis ødometertester og treaksialtester bli omtalt.

#### Klassifisering - konsolidering

Vannutpressing i løpet av konsolideringstiden kan benyttes til å vurdere prøve kvaliteten. Beskrivelse og effekter av konsolideringen er også omtalt senere i avsnitt 2.3.3.

Tidligere ble kun volumtøyningen under konsolideringen,  $\epsilon_{vol}$ , benyttet for å kategorisere prøve kvaliteten, Det er nå delvis gått over til å benytte poreallsforholdet,  $\frac{\Delta e}{e_0}$ , presentert av Lunne et al. (1997). Kriteriene for klassifiseringen ble framsatt på grunnlag av ulike studier utført av NGI. Volumtøyning benyttes også fortsatt, og de to metodene gir vanligvis nokså samsvarende resultater i forhold til hvilken kvalitetsklasse prøven tilhører. Tabell 3 og Tabell 4 viser klassifiseringen ved bruk av henholdsvis poreallsforhold og volumtøyning.

Fra ødometerforsøket bestemmes prekonsolideringsspenningen som brukes til å finne overkonsolideringsgraden, OCR. Fra treksialforsøk og ødometerforsøk finner man endringen i poretall eller volumtøyning. Det bestemmes henholdsvis ut i fra utpresset porevann i løpet av konsolideringsfasen, og aksial tøyning fram til initialt vertikalt overlagingstrykk. Klassifiseringen er avhengig av overkonsolideringsgrad.

**Tabell 3** Klassifisering av prøver testet i laboratoriet etter poretallsforhold, gjengitt fra Lunne et al. (1997)

$\Delta e/e_0$		Klasse
OCR=1-2	OCR=2-4	
<0,04	<0,03	Meget god til utmerket
0,04-0,07	0,03-0,05	God til bra
0,07-0,14	0,05-0,1	Dårlig
>0,14	>0,1	Meget dårlig

**Tabell 4** Klassifisering etter volumtøyninger, gjengitt fra Andresen og Kolstad (1980)

OCR	Perfekt kvalitet $\varepsilon_{vol} [\%]<$	Akseptabel kvalitet $<\varepsilon_{vol} [\%]<$	Forstyrret kvalitet $\varepsilon_{vol} [\%]>$
1,0-1,2	3	3-5	5
1,2-1,5	2	2-4	4
1,5-2,0	1,5	1,5-3,5	3,5
2,0-3,0	1	1-3	3
3,0-8,0	0,5	0,5-1	1

Begrunnelsen for framsettelsen av den nye klassifiseringen er forklart i Lunne et al. (1997).

$\frac{\Delta e}{e_0}$  er endring i porevolum dividert på initial porevolum, mens  $\varepsilon_{vol}$  er endring i porevolum dividert på initial totalt volum. Det er grunn til å tro at en viss endring i porevolumet vil være mer skadelig for kornstrukturen jo lavere det initiale porevolumet er. Det blir derfor forslått å benytte  $\frac{\Delta e}{e_0}$  som kriterium for prøveforstyrrelser som erstatning for  $\varepsilon_{vol}$ . For en perfekt prøve uten forstyrrelser vil  $\frac{\Delta e}{e_0}$  være nær null.

Poretallsforholdet er gitt ved

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\Delta \varepsilon_{vol} * (1 + e_0)}{e_0} \tag{1}$$

der det initiale poretallet er

$$e_0 = \frac{w * \gamma_s}{\gamma_w * S_r} \tag{2}$$

For fullt mettet jord vil da det initiale poretallet bli

$$e_0 \approx w * \rho_s \tag{3}$$

For treaksialprøvene er forholdet

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\Delta \varepsilon_{vol} * (1 + (w * \rho_s))}{w * \rho_s} \quad (4)$$

der den volumetriske tøyningen måles som utpisset porevann i løpet av konsolideringsfasen

$$\Delta \varepsilon_{vol} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (5)$$

For ødometerprøvene er forholdet

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{\varepsilon_a * (1 + (w * \rho_s))}{w * \rho_s} \quad (6)$$

der den volumetriske tøyingen tilsvarer den aksielle tøyningen fram til pålastning opp til in-situ vertikalspenning  $\sigma'_{v0}$ , siden tøyningen i de to andre retningene er null og ikke-eksisterende (Lunne et al. 1997).

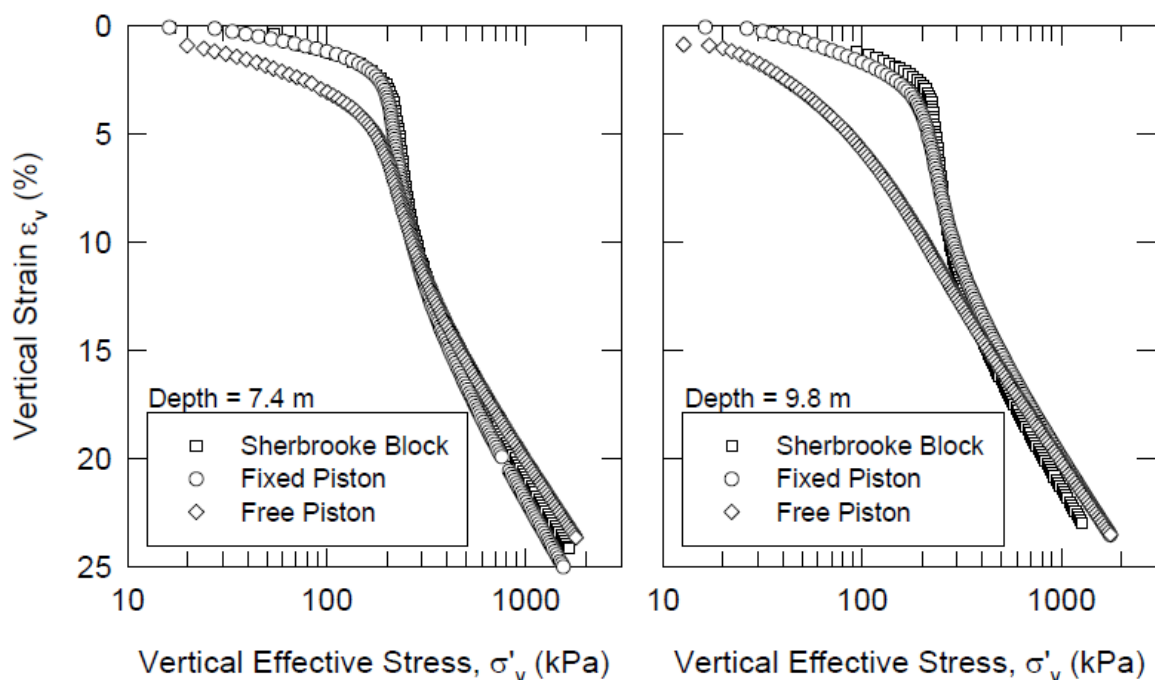
Ofte vil treaksialprøvene gi lavere poretallsforhold, og dermed klassifiseres med bedre kvalitet enn ødometerprøvene. Dette skyldes sannsynligvis måten prøvene er forberedt på. Mens treaksialprøvene skjæres ut med en tynn stålvaier, skjæres ødometerprøven ut ved å dytte en stålring gjennom prøven, noe som kan føre til ytterlige forstyrrelser (Lunne et al. 1997).

### Ødometer

Et godt ødometerforsøk viser en tydelig knekk i overgangen mellom det normalkonsoliderte området og det overkonsoliderte området, og gjør det lett å påvise prekonsolideringsspenningen. Kurver som viser modul - spenning og konsolideringskoeffisient-spenning vil synke raskt ved prekonsolideringsspenningen, og vise en bratt overgang. Dersom kurvene ikke har en tydelig overgang tyder det på at prøven er utsatt for forstyrrelser. Kornstrukturen er noe brutt ned, noe som fører til at den glemmer spenningene den tidligere har vært utsatt for.

Et eksempel på CRS-forsøk er vist i Figur 3. Kurvene viser en tydelig knekk for blokkprøver og stasjonært stempel, mens for fritt stempel er grafen slappere og prekonsolideringsspenningen vil være mindre tydelig og noe lavere. Dette er eksempel prøver av henholdsvis god og dårlig kvalitet. Det er verdt å merke seg at prøven som er tatt med stasjonær stempel gir nesten tilsvarende resultat som blokkprøven. Dette viser at det er mulig å ta opp svært gode prøver dersom riktige teknikker blir benyttet. (DeGroot et al. 2005).

Lunne et al. (1997) beskriver en studie av leire fra Lierstranda, tatt med både blokkprøvetaker og sylindrerprøvetaker. Studien viste at prekonsolideringsspenningen bestemt for sylindrerprøvene generelt er lavere enn for blokkprøvene, med gjennomsnittlig 9 % lavere verdier. Selv om forskjellen ikke var veldig tydelig, ser det ut til at prøver av bedre kvalitet kan gi høyere prekonsolideringsspenning enn prøver med dårligere kvalitet. Stivheten til prøvene av god kvalitet er observert til å være høyere før prekonsolideringsspenningen og lavere etter prekonsolideringsspenningen sammenlignet med prøver av dårligere kvalitet.

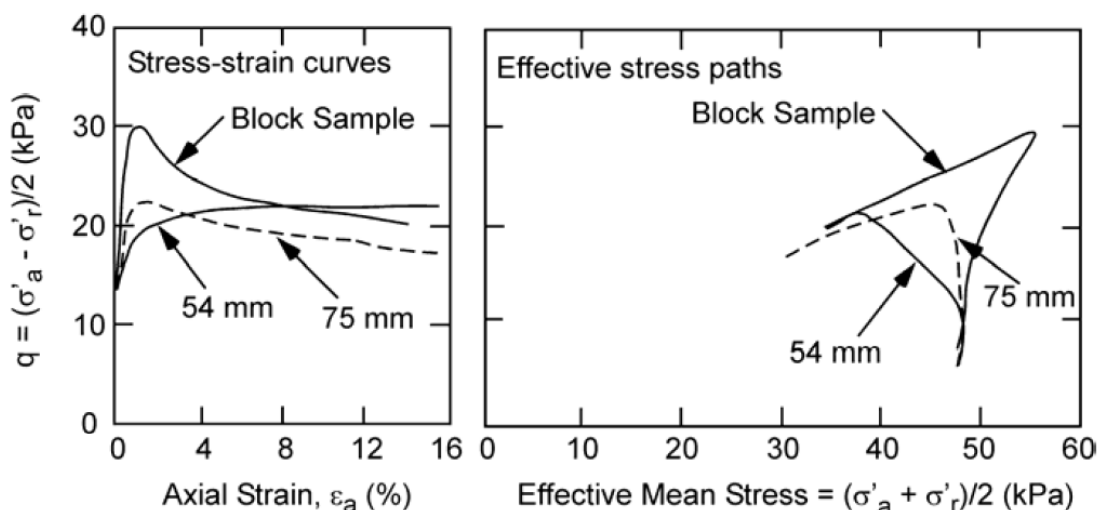


Figur 3 Eksempel på CRS- forsøk. (DeGroot et al. 2005)

### Treksialprøver

Et godt treksialforsøk viser et tydelig brudd, og deviatorspenningene skal synke raskt ved økende pålastning etter brudd. En prøve av god kvalitet vil ha lav bruddtøyning og lite volumtøyninger under økte skjærspenninger opp til brudd slik at dilatansparameteren ( $D$ ) er lav og nær null. Ved å sammenligne parametere fra ulike forsøk på samme materiale kan prøve kvaliteten vurderes. Figur 4 viser et eksempel på gode og mindre gode prøveresultater fra CAU- tester. Blokkprøvene viser klare brudd med lav bruddtøyning og høy skjærstyrke, noe som indikerer god kvalitet. Prøven tatt med 75mm har lavere verdier enn blokkprøven, mens prøven tatt med 54mm er av dårligst kvalitet og viser en tydelig slappere kurve.

Treksialprøvene viser ulike resultat på grunn av ulik nedbryting av kornskjelettet (mekanisk forstyrrelse) ved prøvetaking, motsatte effekter i løpet av konsolideringen og reduksjon i vanninnhold i løpet av konsolideringen. (D.W.Hight 2001). Prøveforstyrrelser fram til testing i laboratoriet vil da være hovedårsaken til ulike resultater for prøver tatt fra samme sted og dybde.



Figur 4 Eksempel på CAU-tester av ulik kvalitet. (Lunne et al. 2006)

Tidligere studier har vist at det i hovedsak er i treaksialtestene de største forskjellene på gode og mindre gode prøver (blokkprøver og sylinderprøver) kommer til syne, og at det i mindre grad er utslagsgivende i ødomertesten og for tolket prekonsolideringsspenning. (D.W.High 2001). Ved vurdering av prøveforstyrrelser bør det derfor legges størst vekt på resultater fra treaksialtester.

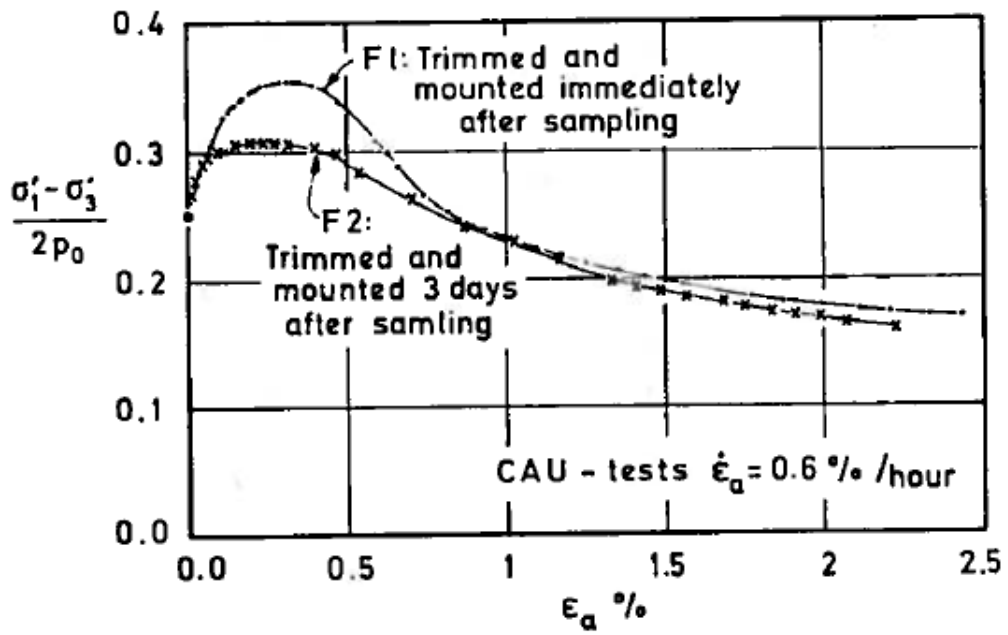
### Konsolidering og lagring

Bjerrum (1973) beskriver hvordan lagring påvirker en leirprøve. Leiren i senteret av prøven, som er den mest uforstyrrede, vil ha en tendens til å suge inn vann fra de ytre og mer forstyrrede delene av prøven. Den uforstyrrede delen i midten av prøven vil da svulle, og den ytre delen vil konsolidere tilsvarende, noe som gjør at samlet volum opprettholdes. Siden dette er en tidsavhengig prosess, vil effekten øke ettersom prøven lagres.

For å utjevne effekten av lagring og svelling konsolideres prøven til sin in situ spenningstilstand. Konsolideringen fører til at prøven oppnår en spenningstilstand tilsvarende sin naturlige, i tillegg til at det ekstra vanninnholdet presses ut. Vannmengden som presses ut under konsolideringen vil sannsynligvis være noe høyere enn mengden som ble absorbert under svellingen. Den ekstra utpressingen kan ha en skadelig effekt på kornstrukturen til leiren. Denne effekten er i midlertid mindre ødeleggende for leiren ved treaksialforsøk enn den ødeleggende effekten et vanninnhold som er høyere enn prøven originalt hadde hatt.

Et eksempel på effekten av lagring av prøver er vist i Figur 5, der en prøve er testet umiddelbart etter opptak, mens en annen er testet tre dager etter opptak. Prøven som har vært lagret i tre dager har 15 % lavere skjærstyrke enn prøven som er testet rett etter opptak. Prøvene er testet med CAU-forsøk, så dette viser at selv med konsolidering vil lagringen kunne påvirke prøve kvaliteten.

I gjennomføringen av felt- og laboratoriearbeid før byggeprosjekter blir ofte prøvene lagret lenge før de blir testet. Mange sylindere blir ofte tatt opp på samme tidspunkt, og laboratoriene har ikke tid og kapasitet til å teste prøvene med en gang. Dette kan dermed være svært ødeleggende for prøvenes kvalitet.



Figur 5 CAU-test av sylindprøver av kvikkleire. F1 er testet umiddelbart etter prøvetaking, F2 er testet 3 dager senere. Forskjellen i styrke er tydelig. (Bjerrum 1973)

### 3 TIDLIGERE ARBEID

Det er utført en rekke studier som omhandler temaet prøveforstyrrelser. Teorien i kapittel 2 baserer seg også på tidligere studier, mens det i dette kapittelet vil bli gått mer spesifikt inn på hver av studiene, resultatene og de ulike metodene som er benyttet. Dette gir også et inntrykk av utviklingen innenfor forskningen på emnet.

Hvorslev (1949) gav ut en rapport der han blant annet beskriver prøvetakingen med sylinderprøvetaker, og presenterte ulike anbefalinger for hvordan prøvetakingen bør utføres slik at prøveforstyrrelsene reduseres. Anbefalt geometri på prøvesylinder innebærer blant annet at diameteren bør være 50-75mm for prøver som skal benyttes til rutineundersøkelser, og 100-150mm for prøver til mer avanserte tester. I forhold til selve prøvetakingen anbefales en hviletid på 10-20 minutter før opptrekk, slik at det skal utvikles adhesjon mellom leire og prøvetaker. Opptrekket beskrives ved at man skal utøve et lite trekk samtidig som prøvetakeren roteres to til tre ganger rundt. Prøvetakeren trekkes rolig opp med konstant fart. Praksisen Hvorslev foreslo er på mange områder fortsatt gjeldende innen for prøvetaking.

Ladd og Lambe (1963) gav i 1963 ut en artikkel som omhandlet styrken til "uforstyrret" leire fra udrenerte skjærtester. De innførte begreper som perfekt og ideal prøvetaking. Studien består av blant annet laboratoriarbeid. På 80-tallet ble Strain Path Method (SPM) tatt i bruk i forbindelse med prøveforstyrrelser (Baligh 1985). Ved hjelp av denne metoden ble det utført et analytisk arbeid som fokuserte på å finne ut hvordan tøyningene og spenningene fordeler seg i en prøve, med spesielt fokus på penetrasjon av prøvetakeren.

Wu (1991) har publisert en doktoravhandling som tar for seg numeriske beregninger ved bruk av elementmetoden for å modellere prøvetakingen som prosess. Clayton et al. (1998) har også benyttet elementmetoden for å finne påvirkningen av prøvetakerens geometri på prøveforstyrrelser ved penetrasjon. Begge studiene har brukt funn fra Baligh som sammenligningsgrunnlag.

Avslutningsvis vil en empirisk studie som blant annet tar for seg hvordan prøvetakingen og ulike metoder benyttet underveis påvirker prøvekvaliteten bli beskrevet. Studien tar også stilling til problematikken i forhold til rotasjon og trekk ved opptrekk av sylinderprøver.

#### 3.1 Analytiske studier

Fra Ladd og Lambe (1963) brukes to definisjoner på teoretisk prøvetaking:

- **Perfekt prøvetaking:** Prøven er kun fjernet fra in situ, og in situ skjærspenningene er frigjort. Det vil si at det er kun spenningen fra den tidligere omkringliggende jorden som er fjernet, og det er ingen videre forstyrrelser. Ved innbygging i treaksialcellen har prøven oppnådd en isotropisk  $\sigma'_{ps}$ . Prøven er dermed kun utsatt for prøveforstyrrelse i form av spenningsavlastning.

- **Ideal prøvetaking:** Perfekt prøvetaking som er utvidet til å også omfatte minimum forstyrrelse som resultat av penetrasjon av prøvetakeren i mett jord. Ingen forandring i vanninnhold eller størrelse og fordeling av effektive spenninger etter at prøven er tatt opp fra felt og plassert i treaksialapparatet. Alle operatørvhengige forstyrrelser er dermed ikke tatt hensyn til.

$\sigma'_{ps}$ , som er en teoretisk spenning, kan estimeres ved å konsolidere prøven til  $K_0$  – tilstanden og frigjøre skjærspenningene ved konstant trykk. Ved å sammenligne denne med  $\sigma'_r$ , som er målt i laboratoriet, kan man indikere graden av prøveforstyrrelse ut i fra forholdet mellom de to spenningene ( $\sigma'_{ps}/\sigma'_r$ ).  $\sigma'_r$  kan bestemmes fra målt poretrykk ved null celletrykk i treaksialcellen. Verdien avhenger av blant annet størrelsen på prøven, og er derfor noe usikker, men ble foreslått å bruke til å anslå prøveforstyrrelsen ved opptak av leire.

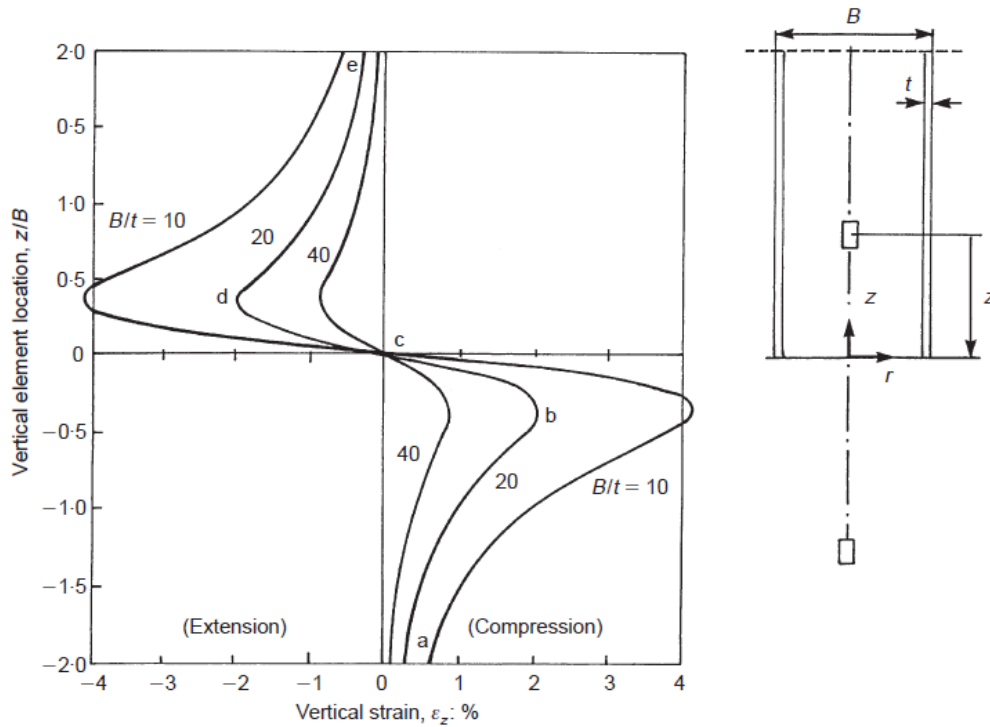
Stress Path Method ble først beskrevet av Ladd og Lambe (1967). Dette er en analytisk teknikk som anslår stabilitet og deformasjon av grunne problemer som utgravninger, skrånninger, fundamenter der problemets dybde er liten i forhold til horisontal utbredelse. For grunne problemer baserer slike analyser seg på økende spenninger. Baligh (1985) fant at for dype problemer (peler, prøvetakere) er deformasjonen så og si uavhengig av jordens skjærstyrke. Den er derimot tøyingsavhengig, og dermed knyttet til jordens stivhet. Strain Path Method (SPM) ble da utviklet, og kan brukes til å forutsi forstyrrelsen av jord forårsaket av ulike stive elementers installasjon i jorden. Metoden er bygd opp på samme måte som Stress Path Method, og kan anslå jordens deformasjon, tøyninger, spenninger og poretrykk forårsaket av penetrasjon av prøvetakeren.

SPM ble først brukt på perfekt prøvetaking (Perfect Sample Approach, PSA), og senere utvidet til å omfatte ideal prøvetaking (Ideal Sample Approach, ISA). Resultatene fra PSA kan brukes til å estimere prøveforstyrrelsene for et prøvestykke fra en blokkprøve, mens resultatene fra ISA er bedre egnet til å estimere de reelle prøveforstyrrelsene for et prøvestykke som er tatt med en sylindrerprøvetaker.

Figur 6 viser tøyninger for et jordelement i senterlinjen av prøven, avhengig av forholdet mellom diameter (B) og tykkelse (t) av prøvesylinder, funnet av Baligh et al. (1987) ved bruk av SPM for ISA. Tøyningene er plottet i forhold elementets vertikale posisjon,  $z/B$ , se figur for forklaring på siden. Det er tydelig at de geometriske forholdene har stor betydning for tøyningene prøven vil oppleve. Tøyningene i senterlinjen minker med økende B/t- forhold. Det er tydelig svært ønskelig at det blir benyttet prøvetaker med høyt B/t-forhold. Enkelte jordarter vil ha en bruddtøyning ned mot 1 %. Figuren viser at dersom det blir benyttet en prøvesylinder med B/t=20, vil disse tøyningene være påført jorden allerede før prøven er tatt opp. Dette er selvsagt svært uheldig ved senere parameterbestemmelser i laboratoriet, og jordens oppførsel opp mot brudd vil ikke kunne gjenskapes ved testing i laboratoriet.

Denne analytiske studien baserte seg på en prøvesylinder med rund tupp, uten skjæregg og indre klaring. Tøyningen vist i figuren er kun tøyningene i senterlinjen av prøven. Disse er dermed de minimale tøyningene for prøven, da den er minst forstyrret i midten. I ytre deler vil forstyrrelsen grunnet penetrasjonen være større.



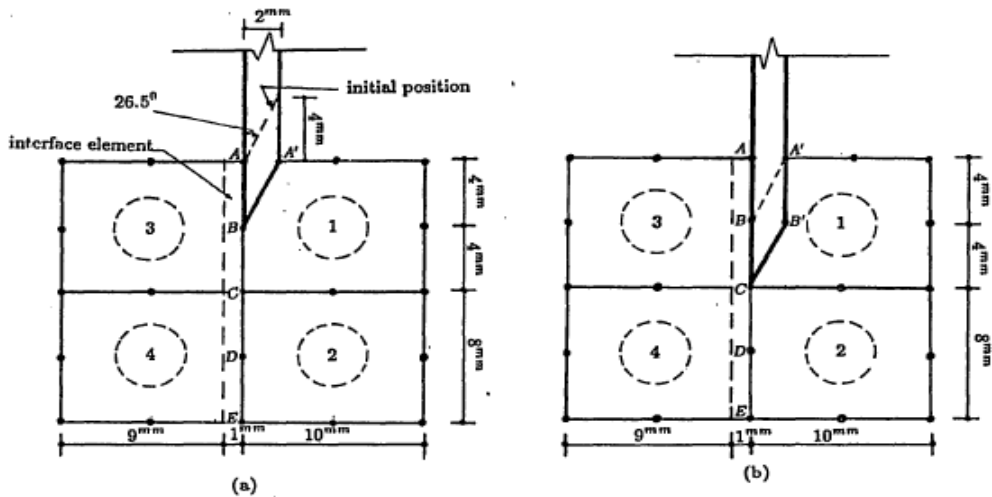


Figur 6 Tøyninger i senterlinjen for prøven, avhengig av forholdet mellom diameter og tykkelse for prøvetakeren. (Baligh et al. 1987)

### 3.2 Numeriske studier

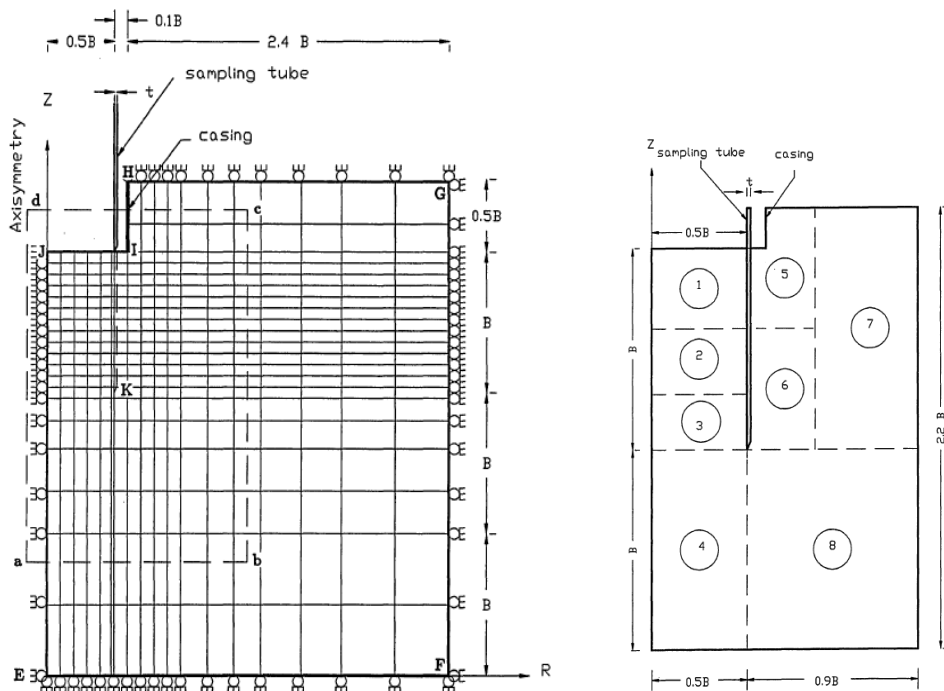
Wu (1991) har i sin doktorgrad har undersøkt hvordan leirprøver påvirkes av prøvetakningen, ved bruk av numeriske analyser. I avhandlingen er det fokusert på virkningen av penetrasjon av prøvetakeren. Prinsippet for modelleringen og noen av funnene vil bli presentert her.

Nedpressingen av prøvetakeren simuleres ved splitting av en gruppe noder foran penetrasjonsruten, og påfører økende forskyvninger slik at det etterligner prøvetakerens nøyaktige geometri. Dette er vist i Figur 7. Det er også lagt til tynne lag med elementer på innsiden av vegg, slik at jord-prøvetaker -grenseflaten kan modelleres. I motsetning til Strain Path Method som brukte en rund tupp, er det her modellert slik at prøvetakerens korrekte geometri med eggvinkel blir tatt hensyn til.



Figur 7 Splitting av noder for å etterligne prøvetakerens reelle geometri ved nedpressing av prøvetakeren

Elementene har kvadratiske forskyvninger, og kvadratisk poretrykksfordeling. Det er benyttet aksesymmetri for å konstruere situasjonen. Figur 8 viser situasjonen før prøvetakeren penetreres. Her er borhullet gravd, og føringsrøret installert, tuppen på prøvetakeren er på toppen, og er klar for å penetreres ned. Prøvetakerens diameter kalles  $B$ , tykkelsen på prøvetakerveggen er  $t$ , og prøvetakeren blir i alt penetrert  $B$  langt. I denne studien er  $B=100\text{mm}$  og  $t=2\text{mm}$ . Jorden som befinner seg innenfor området der prøvetakeren skal penetrere blir modellert med et finere elementnett, da det er i dette området det er interessant å undersøke hva som skjer.



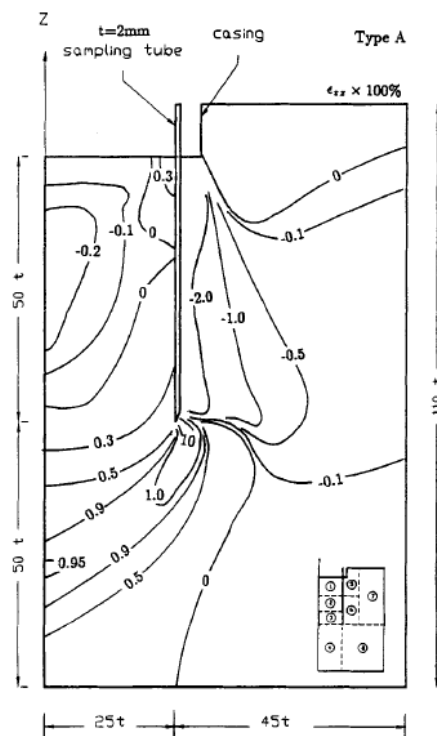
Figur 8 T.v.: Oppsett for elementnett for de numeriske analysene.  
T.h.: den finere inndelingen av elementnettet langs prøvetakeren (Wu 1991)

Området a-b-c-d avgrenses, og er videre delt inn flere små regioner der spenningsfordelingene og tøyningene skal studeres. Område 1,2 og 3 skal gå inn i prøvetakeren, 5,6 og 7 er på utsiden,

og 4 og 8 er under prøvetakeren. Med tanke på prøveforstyrrelser er det mest interessant å studere områdene 1-4, da det er jorden inne i disse som vil bli tatt opp og videre testet i laboratoriet.

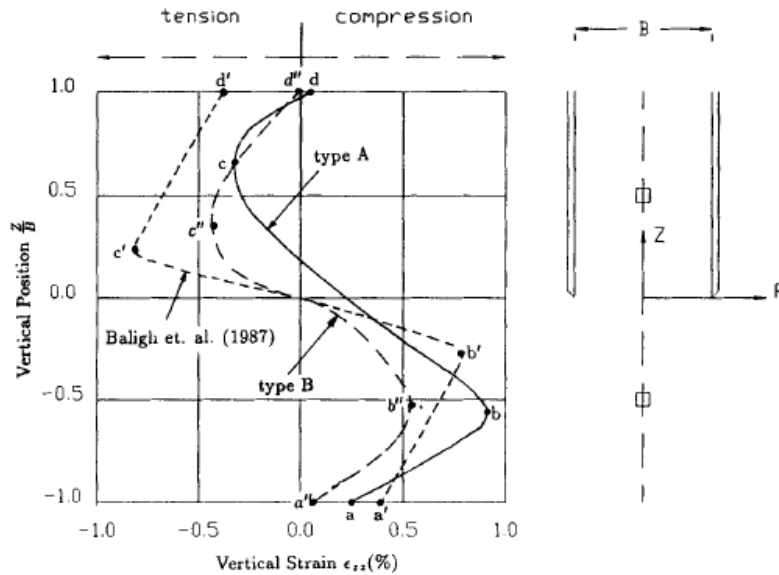
Det er studert vertikale tøyninger, radielle tøyninger og skjærtøyninger som følge av prøveutskjæringen. Regionene på innsiden under prøvetakeren har en sammensatt tøyningshistorie som følge av penetrasjonen. I forkant av prøvetakeren vil jorden først være i trykk, men endres til strekk da jorden kommer inn i prøvetakeren. Avslutningsvis vil jorden igjen bli utsatt for trykk, dette gjelder spesielt jorden i toppen av prøvetakeren. De vertikale tøyningene ved penetrasjon er vist i Figur 9.

Også dette resultatet viser at prøven ved utskjæring gjennomgår forstyrrelser som påfører tøyninger slik at tøyninger om mot bruddtøyninger kan ha blitt påført allerede ved prøvetakingen.



**Figur 9 Vertikale tøyninger, positivt tøyning indikerer trykk.(Wu 1991)**

Resultatene fra de numeriske analysene stemmer godt med resultatene funnet ved bruk av SPM. Ved å sammenligne tøyningene for senterlinjen av prøvetakeren, framkommer det at utviklingen langs prøvetakeren er nokså lik for de to metodene. SPM viser noe høyere verdier enn den numeriske løsningen, og det varierer hvor i prøven de høyeste verdiene er plassert. De numeriske resultatene er ansett for å være mer nøyaktig. En sammenligning av metodene er vist i Figur 10. Figuren viser som Figur 6 sammenhengen mellom vertikal posisjon av et jordelement og vertikale tøyninger.



**Figur 10 Vertikal tøyningshistorie ved senterlinjen av prøven under penetrasjon av prøvetakeren**  
 Gjennom arbeidet med doktoravhandlingen kom Wu (1991) fram til følgende konklusjoner:

- "Jorden er utsatt for 3 stadier av vertikal tøyningshistorie: kompresjon- ekspansjon- kompresjon (trykk-strekk-trykk).
- Den udrenerte skjærstyrken til en forstyrret prøve som er konsolidert til in situ spenninger er større enn for jomfrujorden for NC-leier, men mindre enn for OC-leirer.
- Prøveforstyrrelsen på grunn av friksjon mellom jord og prøvetaker øker ettersom prøvetakeren penetrerer jorden. Dette betyr at lange prøver vil være mer forstyrret.
- Hastigheten på penetrasjonen påvirker kvaliteten- raskere hastigheter gir mindre forstyrrelser.
- Graden av prøveforstyrrelser synker ettersom in-situ styrken øker." (Budhu og Wu 1992)

Dette betyr at svake leirer vil påvirkes mer av prøvetakingen i form av forstyrrelser, og dermed få påvist enda lavere styrkeparametere enn det som er tilfelle.

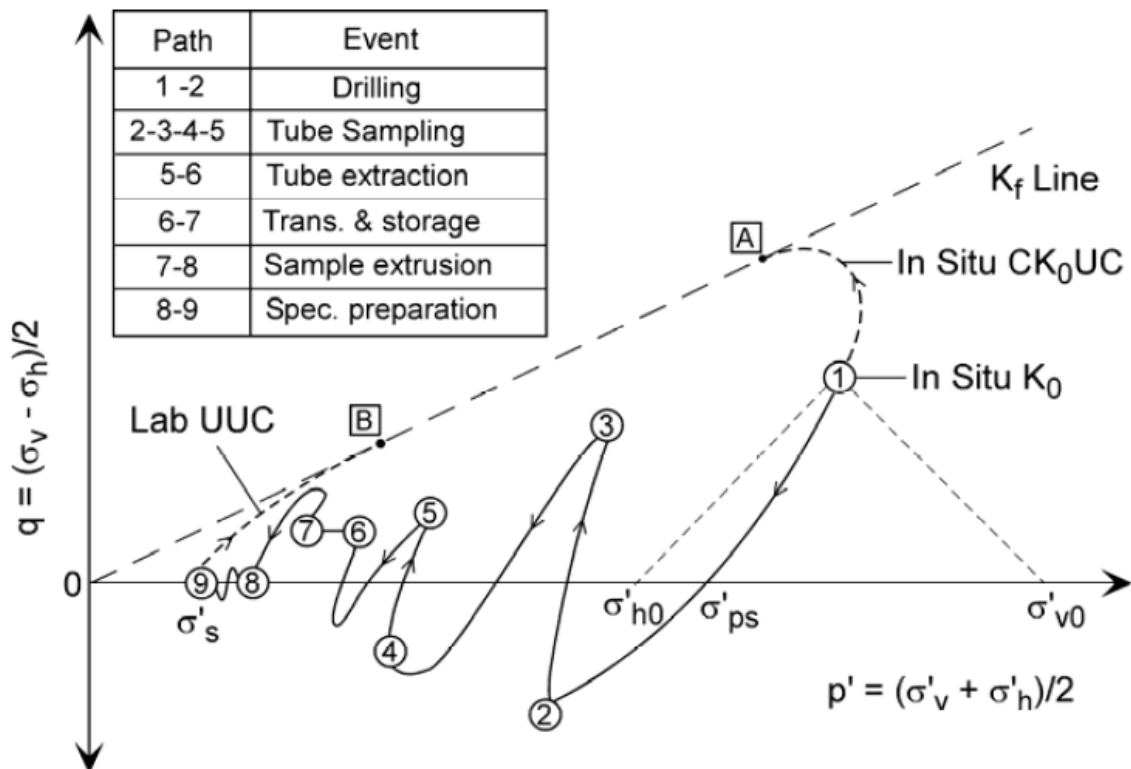
Ved valg av lengde av prøvesylinderen må det dermed tas hensyn til at den ikke kan være for lang grunnet forstyrrelser ved penetrasjonen. Samtidig må hensyn til forstyrrelser ved nedpressing, se avsnitt 2.3.3, bli tatt i betraktning. Prøven må være av en lengde slik at den delen av prøven som er upåvirket av nedpressingen og dermed kan brukes til testing av uforstyrret prøve.

Også Clayton et al. (1998) studerte Baligh's bruk av SPM i forhold til prøveforstyrrelsene, og implementerte metoden via elementmetoden. Videre studerte han hvordan prøvetakerens geometri påvirket prøve kvaliteten. I studien ble det konkludert med at den beste kvaliteten på prøvene oppnås med skarp egg og ingen indre klaring. I tillegg er det viktig å bruke nye sylindere av stål, og helst minimum diameter 76 mm, og forholdet  $D/t > 45$ .

### 3.3 Oppsummerende spenningssti

Figur 11 viser de potensielle kildene til prøvforstyrrelser ved sylinderprøvetaking framstilt som prøvens hypotetiske spenningssti. Punkt 1 viser prøvens initiale spenningsstilstand in situ for en leire med lav OCR, mens punkt 9 viser prøvens tilstand når den er klargjort for laboratorietesting.

Teorien ble først fremstilt av Ladd og Lambe (1963), Figur 11 er den modifiserte utgaven som ble lagt fram av Ladd og DeGroot (2003). Den delen av spenningsstien som tar for seg selve prøvetakingen er spesielt oppdatert siden første utkast kom i 1963. Spenningsstien er på mange måter oppsummerende i forhold til studiene som er gjort innenfor prøvetaking og prøvforstyrrelser i dag, og det som er nevnt i kapittel 2 og 3.



Figur 11 Hypotetisk spenningssti under prøvetaking- og prøvestykkeforberedelser. (Ladd og DeGroot 2003)

Den følgende beskrivelsen av spenningsstien baserer seg på beskrivelser av Ladd og DeGroot (2003) og DeGroot et al. (2005). Hver nummererte del av spenningsstien representerer en del av prøvetakingen. Det blir foreslått ulike praktiske løsninger som kan redusere graden av prøvforstyrrelser, delt inn i de ulike delene av spenningsstien. Det refereres her til de punktene som er mest relevant for norske forhold.

**1-2: Drilling av borhull:** Reduserer den totale vertikale spenningen ( $\sigma_v$ ). Når  $\sigma_v = \sigma_{h0}$  representerer spenningsstien den "perfekte prøvetaking effektivspenning",  $\sigma'_{ps}$ .

**2-3-4-5. Prøvetakning:** Følgende gjelder for sylindere med indre klaring større enn 0:

2-3: Jorden i senterlinjen opplever skjær i trykk foran cylinderen

3-4: Jorden i senterlinjen opplever skjær i strekk når jorden går inn i cylinderen

4-5: Trykk når jorden er inne i sylindere

For å begrense prøveforstyrrelsene er det anbefalt å følge rådene nevnt i avsnitt 3.2 angående prøvetakergeometrien.

**5-6. Opptak:** Denne delen av spenningsstien beskrives som svært usikker. Det anbefales å benytte stasjonær sylindereprøvetaker. Etter nedpressing og utskjæring bør det være noe ventetid slik at leiren delvis kan feste seg til prøvesylinderveggen før opptrekk. Deretter roteres sylindere rolig to runder for å skjære jorden i bunn, og tilslutt trekkes prøven rolig opp.

**6-7. Transport og lagring:** Denne delen av spenningsstien antar at sylindere er behandlet forsiktig etter opptak. Sylindereprøvene må forsegles med gummihette, og blokkprøvene må vokses umiddelbart etter opptak. De synkende effektivspenningene oppstår som følge av økende vanninnhold innenfor senteret av sylindere. Rystelser og temperaturforandringer under transport og lagring må unngås.

**7-8. Utskyvning:** Også her er spenningsstiens utseende usikker, og kun antatt. Dersom sylindereprøven har vært lagret kan det ha oppstått bindinger mellom prøvesylinder og jord. Før prøven skyves ut må man da forsikre seg om at disse bindingene er brutt, ellers vil det være fare for at prøven blir ytterligere forstyrret ved utskyvningen. Dersom det har oppstått bindinger, kan en stålvaier føres inn i grensesjiktet mellom jord og sylinder og roteres rundt flere ganger.

**8-9. Forberedelser i laboratorium:** Prøven kan oppleve en ytterligere reduksjon i effektivspenning på grunn av avlastning ved å ta prøven ut av sylindere, og forstyrrelser ved tilskjæring og montering. Ved bestemmelse av styrke- og stivhetsparametere skal ikke den nederste og øverste delen av prøven benyttes. En hovedregel er og ikke å benytte 1-1,5 ganger diameteren i topp og bunn av prøven.

Punkt 9 representerer spenningstilstanden til en forstyrret UUC-prøve for test i laboratoriet. Som tidligere nevnt skal konsolideringsfasen bidra til å få prøven tilbake til sin in situ-spenningstilstand.

Det kan her bemerkes at de fasene som omhandler opptak og utskyvning begge betegnes som usikre i forhold til hvilken virkning de har på prøven og prøveforstyrrelser.

### 3.4 Utdrag av empirisk studie

Long et al. (2009) sammenlignet sylindereprøver tatt med 54mm komposittsylindere med prøver tatt med blokkprøvetaker. Formålet med denne studien var å undersøke hvordan ulik utførelse av boring (feltarbeid) og laboratoriearbeid kunne påvirke prøveresultatene og parameterbestemmelsene. 3 ulike boremannskaper tok opp 2 sylindere på 6 dybder. Prøvene ble sendt til 2 ulike laboratorier. Alle fikk beskjed om å følge enten NGFs melding 11 eller Statens Vegvesens retningslinjer beskrevet i håndbøkene ved prøvetakingen. Underveis i prøvetakingen ble boremannskapet, utstyret og metodene de benyttet observert og kartlagt. Tabell 5 viser et utdrag av de ulike observasjonene knyttet til prøvetakingen. Observasjonene tydeliggjør at selv om alle følger de samme standardene, er det flere punkter som kan utføres på ulike måter, og dermed skape ulik kvalitet på prøvene.

Tabell 5 Metoder brukt av de ulike mannskapene ved opptak av sylinderprøvene, utdrag (Long et al. 2009) ("Overcoring"= sammentrykking i topp)

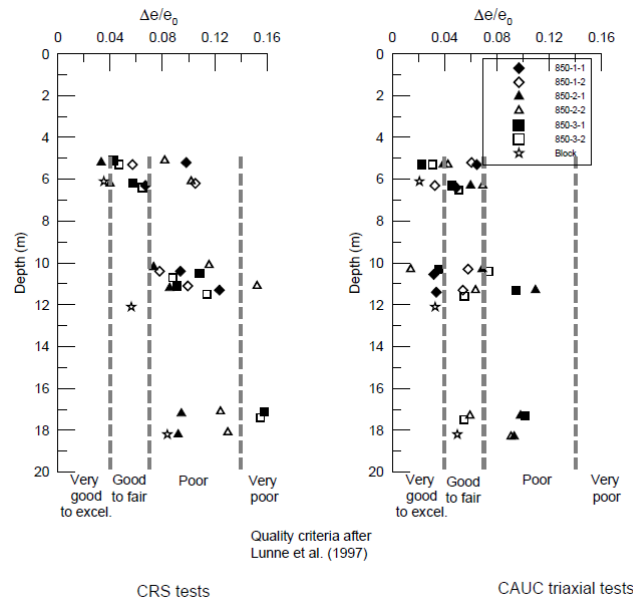
Element	Mannskap 1	Mannskap 2	Mannskap 3
Skjæretid [sek]	40-45	15-20	40-50
"Overcoring"[cm]	1-2	2-8	>1
Rotasjon	Nei	Nei	Ja, alle
Hviletid [min]	10	5-35, gjennomsnitt 13	3-40, gjennomsnitt 18
Opptrekking	Umiddelbart 5 cm, deretter 2 min. hvile	Rolig kontinuerlig	Rolig kontinuerlig
Annet	Medium kvalitet på prøvesylindere (ikke nye, generelt rene, sjeldne små overflateskader). Skarp egg.	Medium kvalitet på prøvesylindere (ikke nye, sjeldne små overflateskader). Skarp egg.	God prøvesylinderkvalitet (i praksis nye). Skarp egg.

For å ha et godt sammenligningsgrunnlag ble det også tatt opp blokkprøver fra samme område. Bemerk at mannskap 1 og 2 ikke bruker rotasjon, mens mannskap 3 bruker rotasjon på alle sine prøver for å løsne prøven fra underliggende masser.

Prøver som er tatt av samme firma, men testet i ulike laboratorium, oppfører seg nokså likt. Det betyr at årsaken til den varierende kvaliteten ligger i hvordan feltarbeidet og prøvetakingen er utført.

Etter testing i laboratorium er prøvene evaluert, og kvaliteten rangert etter hvordan parameterbestemmelsene er i forhold til blokkprøvene som ansees å være av meget god kvalitet. Dette er gjort ved først å rangere en og en parameterverdi med verdi 1-6, for deretter å finne en gjennomsnittlig verdi for hver prøveserie. Dette er gjort for enaksialt trykkforsøk, ødometerforsøk (CRS) og treaksialforsøk (CAU).

I artikkelen blir det utført flere sammenligninger av de ulike parameterne mellom prøveseriene. Poretallsforholdet er blant annet sammenlignet, dette er vist i Figur 12. Ut i fra kriteriet til Lunne et al. (1997) ser man at de fleste treaksialprøvene har en god eller meget god kvalitet, mens ødometerforsøkene havner innenfor god til bra og dårlig. Dette tilsvarer resultatene fra tidligere gjennomførte forsøk og er forventet.



**Figur 12 Poretallsforhold ved pålastning til in situ effektive spenninger, CRS OG CAUC (Long et al. 2009)**

Artikkelen konkluderer med at det er viktig å følge NGFs eller Statens Vegvesens anbefalinger, samtidig som blant annet følgende punkt bør vektlegges:

- "Kompetansen til boremannskapet er av stor betydning. Boremannskapet må få informasjon om hva prøvene skal brukes til og hvilke krav som stilles til prøvekvalitet i forhold til arbeidet som skal utføres i laboratoriet. [...]"
- Skjæringen av prøven bør være relativ rask (ca. 45 sek for en prøve på 0,8m, tilsvarende ca. 2cm/sek). Dette bør etterfølges av 15 min pause, slik at poretrykket får utjevnet seg noe.
- Rotasjon av prøven bør unngås om mulig. Prøven bør heller trekkes rett opp 1-2mm, hvile, og deretter trekkes videre opp i gradvis økende intervaller. [...]" (Long et al. 2009)

Hvordan de har kommet fram til konklusjonen vedrørende rotasjon/trekk kommer ikke klart fram i teksten. De prøveseriene som utpeker seg som best er prøvene tatt av mannskap 1 og 3, men disse kommer omtrent likt ut i rangeringen. Det er derfor ikke lett å se hvorfor det konkluderes med at trekk som brukes av mannskap 1 er bedre enn rotasjon som brukes av mannskap 3. Mannskap 3 synes å ha det beste prøvetakingsutstyret og dermed de beste forutsetningene for å ta opp gode prøver. Mannskap 1 klarte med dårligere grunnlag å ta opp like gode prøver, så det kan være noe av grunnen til at trekk blir anbefalt.

Teori og tidligere arbeider kan ikke gi tydelig svar på hvordan prøven påvirkes av løsning i bunn før opptak. Det strides om det er best med trekk eller rotasjon, og bortsett fra arbeidet av Long et al. (2009) er det ikke oppdrevet arbeider som har tatt spesielt stilling til hvordan prøven påvirkes av de ulike metodene for opptrekk.



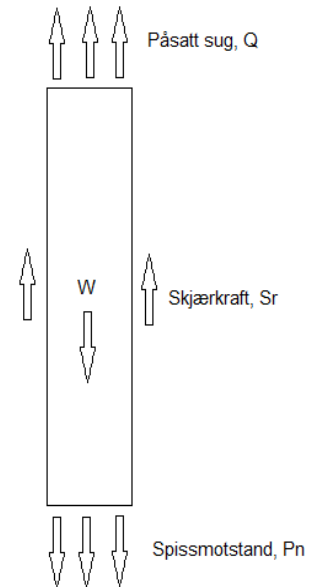
## 4 TREKK OG ROTASJON- TILNÆRMINGER

Kapittel 2.1 og 2.2 beskriver prøvetaking med nedpressing, utskjæring og opptrekk, og de to metodene for løsriving før opptrekk er beskrevet. I dette kapitlet vil det bli gjort enkle overslag for å belyse hva som skjer med prøven ved løsning av de underliggende massene og opptrekket, og hvordan forholdet mellom leirens sensitivitet påvirker opptaket

### 4.1 Opptrekk

Ved opptrekk er det 4 krefter som virker på prøven, vist i Figur 13.

- Prøvens vekt,  $W$
- Skjærkraft mellom prøve og prøvetaker,  $S_r$
- Spissmotstand i bunn,  $P_n$
- Påsatt sug i topp,  $Q$



Figur 13 Opptrekk av sylinder

For at prøven skal løsne og bli dratt opp, må påsatt sug og skjærspenninger være større enn prøvens vekt og spissmotstand i bunn. Dersom spissmotstanden i bunn er for stor vil ikke skjærspenningene langs prøvetakerens lengde klare å holde igjen prøven, og den vil skli ut. Det er dette som skjer ved tap av prøver.

Med utskjæring vil jorden langs prøvetakeren bli omrørt. Om leiren blir fullstendig omrørt er uvisst, men i noen tilfeller vil skjærstyrken til jorda langs prøvetakeren sannsynligvis gå ned mot omrørt skjærstyrke,  $s_r$ . Etter utskjæring blir det ofte lagt inn noe ventetid slik at adhesjonen kan utvikles, og skjærspenningene dermed øker noe. Skjærspenningene langs prøvetakeren vil likevel her bli notert som  $s_r$ , selv om den ikke nødvendigvis er tilsvarende  $s_r$  bestemt med konusforsøk i laboratoriet.

Kraftlikevekten for situasjon i Figur 13 er som følger

$$F = Q_{topp} + S_r - P_n - W \quad (7)$$

Dersom  $F < 0$  vil prøven gli ut av sylindren.

Ligningene som er nødvendig for oppsett av likevekten er:

$$\text{Sideareal av prøvetaker:} \quad A_s = l * O_s = l * 2\pi * r \quad (8)$$

$$\text{Tverrsnittsareal} \quad A_p = \pi r^2 \quad (9)$$

$$\text{Vekt av prøven:} \quad W = A_p * l * \gamma \quad (10)$$

$$\text{Skjærkraft:} \quad S_r = s_r * A_s \quad (11)$$

$$\text{På satt sug, kraft:} \quad Q_{topp} = S * A_p \quad (12)$$

$$\text{Netto pismotstand:} \quad P_n = N_c * s_u * A_p \quad (13)$$

S er på satt sug i topp, som en spenning som virker over tverrsnittsarealet.

$N_c$  er bæreevnefaktor for dype fundamenter, her;  $N_c=9$ . (Emdal et al.)

Variablene som er brukt i utregningene er vist i Tabell 6, og tilsvarer NGI 54mm prøvetaker.

Tabell 6 Parametre for NGI 54mm prøvetaker

Parameter		
Lengde av sylinder	l	0,8 m
Radius av tverrsnitt	r	0,027m
Tyngdetetthet, antatt	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>
Sideareal	$A_s$	0,137 m <sup>2</sup>
Tverrsnittsareal	$A_p$	0,0232 m <sup>2</sup>
Vekt	W	37 N

For en maksimalt på satt sug, 100 kPa, og geometri og forutsetninger som nevnt over, er det gjort beregninger for størrelsen på nødvendig virkende skjærstyrke,  $s_u$ , i bunn for at prøven skal skli ut, som funksjon av skjærstyrke langs sylinderveggen,  $s_r$ .

$$s_u = \frac{Q_{topp} + S_r - W}{9 * A_p} \quad (14)$$

Tabell 7 viser resultatet fra beregningene. Ved trekk vil prøven først løftes noen få mm/cm slik at jorden i bunn skal svekkes, og dermed vil " $s_u$ " være 0 eller svært lav ved selve opptrekket om ventetiden har vært lang nok. Det er tydelig at det ved svært sensitive masser, med lav  $s_r$ , er viktig det blir ventet lenge nok, slik at prøven får gå til brudd i bunn, og at skjærspenningen langs sylinderveggen øker noe. Dersom dette ikke blir gjort, er den omrørte skjærstyrken for lav til å holde på prøven.

Tabell 7  $s_r$  og  $s_u$  ved likevekt

$s_r$ [kPa]	$s_u$ [kPa]
0,5	13
1,0	16
1,5	19
2,0	22
2,5	25
3,0	29
3,5	32

## 4.2 Rotasjon

Ved rotasjon blir prøven rotert rundt, slik at den vrir av i bunn.

For at jorden i bunn skal gå til brudd er det nødvendig med et torsjonsmoment er av en størrelse som motvirker torsjonskapasiteten i bunn av prøven. Det er her gjort en vurdering av hvilke skjærspenninger mellom prøvetaker og prøve som er nødvendig for å holde i mot påsatt torsjon ved brudd i bunn, slik at prøven fortsatt er "festet" i prøvetakeren.

Det blir ved rotasjon satt på et torsjonsmoment. I bunn av prøven motvirkes dette av  $s_u$ , og langs prøvens lengde motvirkes dette av  $s_r$ . Ved brudd antas full plastifisering av tverrsnittet.



For torsjon generelt er det elastiske torsjonsmomentet gitt (Larsen 2012)

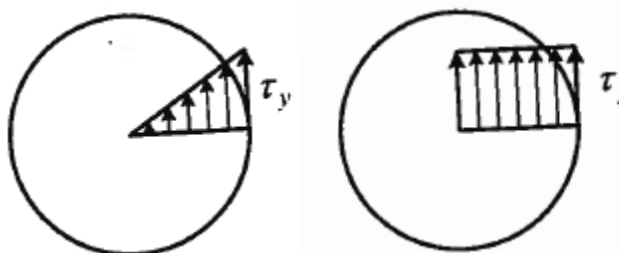
$$T_{el} = \frac{\tau_y * I_p}{r} \quad (15)$$

For en elastisk stav er polart andre arealmoment

$$I_p = \frac{\pi r^4}{2} \quad (16)$$

For full plastifisering kan ved integrering over arealet vises at det plastiske torsjonsmomentet

$$T_{pl} = \frac{4}{3} T_{el} = \frac{4\tau_y * I_p}{3r} \quad (17)$$



Figur 15 Elastisk og plastisk skjærspenningsfordeling (Larsen 2012)

Figur 14 Torsjon av sylinder

$T_{su}$  er torsjonskapasiteten til leieren i bunn, og denne må motvirkes ved rotasjon av prøvetaker og full plastifisering av tverrsnittet:

$$T_{su} = T_{pl} = \frac{4s_u * I_p}{3r} = \frac{2\pi r^3}{3} * s_u \quad (18)$$

Torsjonskapasiteten for prøvetaker-prøve langs lengden av sylindere er avhengig av skjærspenningene mellom sylindervegg og prøve, omkrets og lengde på sylindere:

$$T_{sr} = s_r * O_s * l * arm = s_r * 2\pi r * l * r = 2\pi r^2 l * s_r \quad (19)$$

Nødvendig skjærspenning mellom prøvemateriale og prøvetaker for å holde igjen prøven ved påsatt torsjonsmoment finnes der

$$T_{sr} = T_{su} \quad (20)$$

som resulterer i

$$s_r = \frac{r}{3 * l} * s_u \quad (21)$$

eller

$$S_t = \frac{s_u}{s_r} = \frac{3 * l}{r} \quad (22)$$

Ved bruk av NGI 54mm prøvetaker vil likevekten være oppnådd når sensitiviteten er 89. Dersom sensitiviteten er større enn 89 vil all skjærkapasitet langs sylinderveggen være fullt mobilisert, og prøven vil ikke henge fast i prøvesylindere, og sylindere vil spinne rundt. Det presiseres at dette er sensitiviteten ut ifra den skjærspenningen som er langs prøvetakeren etter utskjæring,

Rotasjonen blir ofte påført rett etter utskjæringen, og ventetid etter rotasjonen er dermed viktig for sensitive leirer. Det må igjen bygges opp bindinger mellom prøvematerialet og prøven for at prøven skal være festet til sylinderveggen før opptrekk.

## 5 FELT- OG LABORATORIEARBEID

I dette kapittelet vil utført feltarbeid med opptak av prøver og utført laboratoriearbeid bli beskrevet, og valg som ble tatt i forhold til hvordan arbeidet skulle utføres bli begrunnet. Det blir gitt en oversikt over hvilke sylinderprøver som er tatt opp, og kort hvordan laboratorieprogrammet ble utført.

### 5.1 Feltarbeid

Sylinderprøvene ble tatt opp på Tiller i Trondheim i løpet av høsten 2011 og våren 2012, henholdsvis til prosjektoppgaven og til masteroppgaven. Området på Tiller benyttes av NTNU i forbindelse med forskning og opptak av prøver. Grunnen består av ikke-sensitiv leire som går over til kvikkleire omtrent ved kote 8 meter, noe avhengig av lokal topografi.

Tabell 8 viser en oversikt over prøvene som er tatt opp, og viser tidspunkt for opptak, metode benyttet og dybde. R viser at prøven er tatt opp med bruk av rotasjon, T viser at prøven er tatt opp med bruk av trekk. På grunn av begrensede ressurser var det nødvendig å finne den beste løsningen slik at prøver kunne tas opp effektivt, samtidig som det var praktisk gjennomførbart for feltmannskapet ved NTNU. Det var i tillegg ønskelig å teste prøvene i laboratoriet så raskt som mulig etter opptak. På grunn av kapasiteten i laboratoriet er det kun mulig å teste en sylinderprøve i løpet av en dag. For at prøvene ikke skulle bli liggende for lenge før testing var det derfor ikke hensiktsmessig at det ble tatt opp flere enn to sylinderprøver samtidig. De to sylindrene som ble tatt opp samme dag ble tatt opp fra samme borhull.

I forbindelse med prosjektoppgaven ble det utført mislykkede forsøk på å ta opp en prøve med kvikkleire fra 8 meter ved bruk av rotasjon, da kun halve sylinderprøven ble med opp og resten av prøven ble mistet. Da prøver skulle tas opp til masteroppgaven ble disse derfor tatt opp fra 5 og 6 meter, der det var forventet å finne middels fast leire og middels sensitiv leire. Det ville da også være mulig å sammenligne disse resultatene med resultatene som ble funnet i prosjektoppgaven fra de tilsvarende dybdene.

Tabell 8 Oversikt over prøver tatt opp

Dybde [m]	Høst 2011	Vår 2012
5,0-5,8	T, R	R,R,T,T
6,0-6,8	T	R,R,T,T
8,0-8,8	R (kun halv prøve)	
9,0-9,8	T	

Prøvesylindrerne er navngitt etter når prøven ble tatt opp (Høst/Vår), type metode benyttet (Rotasjon/Trekk), nummer på boringen ved bruk av gitt metode og dybde. For prøvestykkene er også nøyaktig dybde angitt.

Eksempel: Sylinder V\_T1\_5m er tatt opp våren 2012, det er benyttet trekk som metode, og prøven er fra 5-5,8 meter. Sylinder V\_T1\_6m er tatt opp samtidig fra samme borhull (T1), fra 6-6,8 meter. I sammenligninger i kapittel 7 benyttes også notasjonen H/V\_Trekk/Rotasjon for beskrivelse av alle prøvene som ble tatt på høsten 2011 eller våren 2012 med trekk eller rotasjon.

Alle prøvene ble tatt opp av bormannskap ved NTNU, og testet i geoteknikklaboratoriet ved NTNU. Med unntak av de to siste sylindrerne som ble tatt opp, ble alle prøvene tatt opp av samme borleder. Det ble kun benyttet stålsylindere, og ved rotasjon ble prøvetakeren rotert to hele runder.

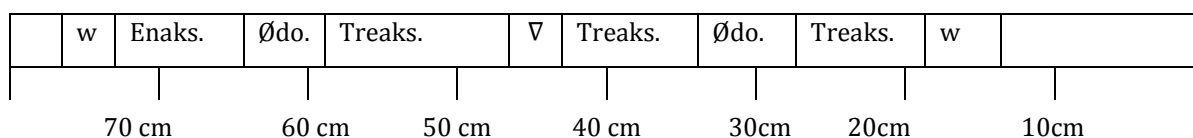
## 5.2 Utførte laboratoriearbeid

8 sylindere ble tatt opp og testet våren 2012, 5 sylindere ble tatt opp og testet høsten 2011. I tillegg ble det i februar 2012 testet en blokkprøve tatt opp i juni 2011.

Det ble tatt opp to sylindre samtidig ved hver boring. Fra hver sylinder ble det utført tre treaksialtester, to ødometerforsøk og rutineundersøkelser. Sylinder 1 ble åpnet rett etter opptak eller en dag senere. Det ble utført rutineundersøkelser, to ødometerforsøk og en treaksialtest med det samme etter åpning. Sylinder 2 ble, så lenge det var praktisk mulig, åpnet neste dag. På grunn av praktiske årsaker tok det for to av sylindrerne to dager før de ble åpnet. De resterende ble åpnet samme dag som prøvetaking eller en dag etter.

I Bilag C er det gitt en oversikt over alle prøvene i forhold til når de ble tatt opp, åpnet og når de ulike laboratorieundersøkelsene ble gjennomført.

Etter utskyvning ble prøven delt inn etter mal som vist i Figur 16. Dette er kun veiledende, og det er individuelle forskjeller for hver sylinder. Hensyn til synlige forstyrrelser, lagdeling og eventuelle andre tilpasninger ble gjort.



Figur 16 Veiledning til oppdeling av sylinderprøven

### Rutineundersøkelser

Rutineundersøkelsene bestod av enaksialt trykkforsøk, bestemmelse av vanninnhold og konusforsøk med bestemmelse av både uforstyrret og omrørt skjærstyrke,  $s_u$  og  $s_r$ . Klassifiseringen etter trykkforøket gjøres i henhold til Tabell 9.

Tabell 9 Klassifisering av enaksialt trykkforsøk, gjengitt fra Vegdirektoratet (2010)

Leirtype	Enaksial skjærstyrke [kPa]
Bløt	<25
Middels fast	25-50
Fast	>50

Kvikkleire er definert som en leire med  $s_r < 0,5$  kPa.

Fra konusforsøket bestemmes leirens sensitivitet,  $S_t = s_u / s_r$ . Klassifiseringen av sensitivitet er gitt i Tabell 10.

Tabell 10 Klassifisering av sensitivitet, gjengitt fra Vegdirektoratet (2010)

Betegnelse	Sensitivitet
Lite sensitiv	<8
Middels sensitiv	8-30
Meget sensitiv	>30

### CRS - ødometer

Det ble utført to kontinuerlige ødometerforsøk for hver sylinder. Prøvestykkene som ble testet ble tatt fra omkring 30 cm og 60 cm fra prøvesylinderens topp, se Figur 16.

I CRS- forsøket trykkes prøven sammen med en konstant deformasjonshastighet, som bestemmes ut i fra jordtype. I dette laboratoriearbeidet ble prøvene med lite og middels sensitiv leire kjørt med en deformasjonshastighet på 0,005mm/min (1,5 % time), mens den sensitive leiren ble kjørt med en deformasjonshastighet på 0,0035mm/min (1 % time). Underveis i forsøket registreres deformasjon, aksialspenning og poretrykk. Etter endt forsøk ble prøven tørket og vanninnholdet bestemt. Figur 17 viser ødometeret benyttet i forsøkene.



Figur 17 T.v.: Innebygd prøve i ødometerapparat. T. h: Innbygd prøve i treaksialapparat.

### Treaksialforsøk

Det ble utført tre treaksialtester for hver sylinder. Prøvestykkene som ble testet ble tatt fra omkring 20 cm, 35 cm og 50 cm fra prøvesylinderens topp, se Figur 16. Prøvestykkene vil bli omtalt som henholdsvis prøvestykkene fra topp, midt og bunn av prøvesylinderen.

Alle treaksialforsøkene er isotropt konsoliderte, aktive, udrenerte forsøk (CIU- forsøk). Prøvestykket ble bygd inn som vist i Figur 17, og forsøkene utført med 3 % tøyning per time fram til 10 mm tøyning. Konsolidering opp til middelsspenningen ble gjort trinnvis i tre trinn. Et nytt trinn ble påført når poretrykket hadde stabilisert seg for inneværende spenningstilstand.

Følgende parametere ble benyttet for å finne konsolideringsspenningen:

- Grunnvann i terreng, kote 0 m
- Tyngdetetthet  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- $K'_0=0,7$

Det samme treaksialapparatet ble brukt for alle treaksialtestene. Dette førte til at prøvestykkene som ikke ble bygd inn rett etter utskyvningen av prøven måtte lagres fram til testing. Prøvestykkene ble forsiktig pakket inn i aluminiumsfolie, vått papir og plastpose, og deretter oppbevart i kjøleskap fram til testing. På denne måten hindres uttørking av prøven, og den påføres minst mulig forstyrrelser.

Noe av fokuset i denne oppgaven var å studere eventuelle forskjeller på prøvestykkene i forhold til hvor i sylindren de var fra. Prøvestykket fra bunn av sylindren var av spesiell interesse, og disse ble testet først fra hver sylinder slik at effekten av lagring skulle være så liten som mulig. Deretter ble prøvestykket fra midt i sylindren testet, mens prøvestykket fra topp av sylindren ble testet sist.

Ofte ble en ny sylinder åpnet før alle prøvestykkene fra den forrige sylindren som hadde blitt åpnet var ferdig testet. Det ble da prioritert å teste bunnstykket (og eventuelt midtstykket) fra den nyåpnede sylindren før de resterende fra forrige sylinder. Dette ble gjort fordi det var ønskelig at prøvestykkene fra bunn av sylindren skulle bli minst mulig påvirket av effekten av lagring. Lagringstiden vil kunne ha innvirkning på prøve kvaliteten, og sammenligningsgrunnlaget for prøvestykkene vil derfor bli dårligere dersom lagringstiden til de ulike prøvestykkene som skulle sammenlignes varierer mye.

Prøvestykkene fra bunn og midt av sylindren ble prioritert før prøvestykkene fra topp av sylindren. Noen ganger ble nye sylindere tatt opp og åpnet før testingen av de to forgående sylindrene var fullført. Disse forholdene og den nevnte prioriteringen førte til at lagringstiden for prøvestykkene i kjøleskap varierte fra noen timer og opptil maksimalt 3 dager.

Den totale lagringstiden for en prøve er sammensatt av lagringstiden i sylindren før åpning og lagringstiden i kjøleskap for prøvestykket etter åpning av sylindren. Maksimal total lagringstid for en prøve før den ble testet i treaksialapparatet var i dette laboratoriearbeidet 4 dager. Prøvestykkene fra topp av prøvesylindren hadde lengst lagringstid, prøvestykkene fra bunn av prøvesylindren hadde kortest lagringstid.



## 6 RESULTATER

I de følgende delkapitlene vil resultater og tolkede verdier fra rutineundersøkelsene, ødometerforsøkene og treaksialforsøkene bli presentert.

Observasjonene av prøvesylindrene ved åpning viste at de var jevnt over glatte, og hadde lite skader av prøvetakingen. Stålsylindrene som ble brukt var rene og av god kvalitet. Det ble observert noe lagdeling med tynne siltlag og sjeldne innslag av sandkorn og skjellrester. Ved tilskjæring av prøvestykker ble eventuelle inhomogeniteter og tydelig sår på overflaten av prøven tatt hensyn til.

Det lyktes ikke å få opp en hel prøve ved bruk av rotasjon fra 8 meter, høsten 2011. For denne prøvetakingen ble kun deler av prøvesylinderen med, og denne var synlig forstyrret. Det ble derfor kun utført rutineundersøkelser på denne sylinderen (H\_R2\_8m). Prøvesylinderen er vist i Figur 18.



Figur 18 Sylinder H\_R2\_8m. Meget sensitiv leire tatt opp ved bruk av rotasjon.

### 6.1 Rutineundersøkelser

Prøvene fra våren 2012 ble tatt fra samme område på Tiller som prøvene som ble tatt høsten 2011. Det viste seg i midlertid at det er en høydeforskjell av betydning i terrenget, slik at prøvene tatt våren 2012 sannsynligvis er fra et noe lavere nivå enn prøvene som ble tatt høsten 2011. Dette ble klart siden prøvene fra 6,0-6,8 meter som ble tatt høsten 2011 var middels sensitiv leire, mens prøvene fra lik dybde tatt våren 2012 var meget sensitiv leire, og ligger rundt grensen til å bli klassifisert som kvikkleire ( $s_r < 0,5 \text{ kPa}$ ). Dette fører til at det direkte sammenligningsgrunnlaget blir noe tynnere enn ønsket. Alle resultatene er likevel tatt med, da det er mulig å sammenligne den generelle oppførselen til de ulike prøvene.

Tabell 11 viser resultater fra konusforsøk. Uforstyrret skjærstyrke, omrørt skjærstyrke og sensitivitet er vist. Det varierer noe hvor mange forsøk som er tatt fra hver sylinder. I utgangspunktet ble det kun utført et forsøk, rundt midten av hver sylinder. Det ble under laboratoriearbeidet mistenkt at sensitivitet nedover i sylinderen for prøvene fra 6 meter (vår 2012) var stigende, det ble derfor undersøkt ved å ta opptil tre konustester på samme sylinder.

Det viste seg da at den bestemte sensitiviteten var noe varierende, men at leiren er klassifisert som meget sensitiv gjennom hele lengden av sylindere.

Kvikkleiren tatt opp fra 8 og 9 meter (høst 2011) har betydelig høyere sensitivitet enn kvikkleiren fra 6 meter (vår 2012). Prøvene tatt fra 5 og 6 meter høsten 2011 og prøvene tatt fra 5 meter våren 2011 er klassifisert som middels sensitive.

Tabell 11 Resultat fra utførte konusforsøk

Sylinder	Dybde [m]	S <sub>u</sub> [kPa]	S <sub>r</sub> [kPa]	S <sub>t</sub> [-]
H_R1_5m	5,40	47,6	2,90	16
H_R2_8m	8,45	20,1	0,20	101
H_T1_5m	5,40	30,4	2,60	12
H_T1_6m	6,40	30,4	2,10	14
H_T2_9m	9,40	24,0	0,20	120
V_R1_5m	5,45	38,7	2,30	17
V_R1_6m	6,50	38,7	0,78	50
V_R2_5m	5,45	27,0	2,50	11
V_R2_6m	6,70	24,0	0,29	83
V_R2_6m	6,44	24,5	0,59	42
V_R2_6m	6,10	24,0	0,59	40
V_T1_5m	5,46	30,4	2,70	11
V_T1_5m	5,16	30,4	2,70	11
V_T1_6m	6,71	30,4	0,59	52
V_T1_6m	6,46	24,0	0,59	41
V_T1_6m	6,16	30,4	0,59	52
V_T2_5m	5,42	21,1	2,20	10
V_T2_6m	6,42	26,0	0,39	67

Tabell 12 viser tyngdetettheten og enaksial skjærstyrke for alle sylindere. Enaksial skjærstyrke er tatt i bunn av sylindere, med varierende dybde mellom 60-65 cm fra topp av sylindere. Tyngdetettheten er den gjennomsnittlige tettheten for hele sylindere. Denne er konstant, og varierer mellom 18,0 og 19,0 kN/m<sup>3</sup>.

Tabell 12 Resultat fra enaksialt trykkforsøk og tetthet

Sylinder	Dybde [m]	Tetthet [kN/m <sup>3</sup> ]	Enaksial skjærstyrke $s_u$ [kPa]
H_R1_5m	5	18,9	22,9
H_T1_5m	5	18,0	28,1
H_T1_6m	6	18,6	24,3
H_T2_9m	9	18,4	14,3
V_R1_5m	5	18,9	32,5
V_R1_6m	6	18,5	29,2
V_R2_5m	5	19,0	32,5
V_R2_6m	6	18,7	21,6
V_T1_5m	5	18,9	32,9
V_T1_6m	6	18,5	21,8
V_T2_5m	5	18,9	26,0
V_T2_6m	6	18,6	24,7

Enaksial skjærstyrke varierer mellom 14,3 kPa og 32,9 kPa. Figur 19 viser to typiske brudd ved enaksial trykkforsøk. Prøven til venstre er fra V\_T2\_5m og viser typisk brudd for middels fast og middels sensitiv leire. Prøven til høyre er fra V\_T1\_6m og har ett typisk kvikkleirebrudd, med 45 grader bruddvinkel.



Figur 19 Typiske brudd etter enaksialforsøk. T.v. prøve fra 5 meter, t.h. prøve fra 6 meter.

Tabell 13 viser vanninnhold i prøvene. Vanninnhold ble studert i topp og bunn av sylindren. Vanninnhold ble også undersøkt i prøvestykkene brukt til treaksialtesting og ødometerforsøkene, se avsnitt 0 og 0. Vanninnholdet varierer mellom 34,2 – 44,9 %.

Tabell 13 Vanninnhold

Sylinder	Dybde [m]	w [%]
H_R1_5m	5,10	38,3
H_R1_5m	5,60	34,2
H_T1_5m	5,10	32,6
H_T1_5m	5,60	37,0
H_T1_6m	6,05	44,9
H_T1_6m	6,70	39,2
H_T2_9m	9,20	42,4
H_T2_9m	9,70	38,6
V_R1_5m	5,15	35,6
V_R1_5m	5,74	35,0
V_R1_6m	6,13	37,4
V_R1_6m	6,70	40,6
V_R2_6m	6,15	38,0
V_R2_6m	6,74	38,0
V_T1_5m	5,12	37,8
V_T1_5m	5,75	35,4
V_T1_6m	6,12	39,3
V_T1_6m	6,74	36,4
V_T2_5m	5,72	33,5
V_T2_5m	5,12	34,7
V_T2_6m	6,72	38,0
V_T2_6m	6,72	42,3

## 6.2 Ødometer

Tabell 14 viser de tolkede parameterne fra ødometerforsøkene. Modultallet er tolket med en tilhørende referansespenning. Tolket prekonsolideringsspenningen for sylindereprøvene er relativt konstant, og ligger mellom 120 kPa og 175 kPa. OCR for prøvene fra 5 og 6 meter ligger mellom 2,4-3,4. OCR for kvikkleiren på 9 meter ligger mellom 1,5 og 1,75. Vanninnholdet ligger innenfor samme intervall som resultatene for rutineundersøkelsene.

Ved to anledninger måtte prøvestykkene lagres i kjøleskap før de ble bygd inn i ødometerapparatet. Dette gjelder sylindere V\_R2\_6m og V\_T1\_6m.

**Tabell 14 Tolkede parametere etter ødometerforsøk.**  
x indikerer at verdien ikke kunne tolkes, \* indikerer at verdien er noe usikker

Prøve	Dybde [m]	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	$p'_c$ [kPa]	m [-]	$p'_{ref}$ [kPa]	M [MPa]	$c_v$ [m <sup>2</sup> /år]	w [%]	$\Delta e/e_0$ [-]	OCR
H_R1_5,30	5,30	47,7	120	20	0	5,5	17,5	29,9	0,066	2,52
H_R1_5,60	5,60	50,4	120	x	x	x	x	29,7	0,054	2,38
H_T1_5,40	5,40	48,6	140	20	0	7	38	29,7	0,060	2,88
H_T1_5,70	5,70	51,3	140	18	60	5	26	32,7	0,045	2,73
H_T1_6,40	6,40	57,6	150	20	50	6	13	33,1	0,053	2,60
H_T1_6,65	6,65	59,9	165	17	100	6	x	42,6	0,071	2,76
H_T2_9,40	9,40	84,6	140	17	100	3,5	6,7	40,0	0,092	1,65
H_T2_9,60	9,60	86,4	130	20	150	2,5	6,4	40,0	0,103	1,50
V_R1_5,40	5,40	48,6	150	19	50	5,8	x	34,0	0,076	3,09
V_R1_5,65	5,65	50,9	150	20	25	5,1	28	32,6	0,057	2,95
V_R1_6,28	6,28	56,5	155	20	100	5,4	x	35,5	0,076	2,74
V_R1_6,60	6,60	59,4	175	21	150	7	11,1	38,0	0,062	2,95
V_R2_5,30	5,30	47,7	160	19	100	6,6	24	33,5	0,081	3,35
V_R2_5,65	5,65	50,9	165	19	100	7,4	14	35,0	0,063	3,24
V_R2_6,30	6,30	56,7	157	20	150	5,8	9	39,1	0,074	2,77
V_R2_6,59	6,59	59,3	165	20	130	5,8	16	37,9	0,091	2,78
V_T1_5,30	5,30	47,7	155	20	100	5,5	23,5	32,9	0,075	3,25
V_T1_5,61	5,61	50,5	160	20	80	4,9	25	32,9	0,063	3,17
V_T1_6,30	6,30	56,7	160	21	100	6,1	14,5	34,3	0,081	2,82
V_T1_6,69	6,69	60,2	x	x	x	x	x	40,2*	0,059*	x
V_T2_5,27	5,27	47,4	150	17	0	5,5	17	38,2	0,087	3,16
V_T2_5,56	5,56	50,0	150	17	0	4	35	34,6	0,067	3,00
V_T2_6,28	6,28	56,5	160	19	100	5,2	21	36,6	0,071	2,83
V_T2_6,56	6,56	59,0	140	20	100	5	17,5	37,2	0,067	2,37
Blokk_8,75	8,75	79	120	22	100	7	x	x	x	1,5
Blokk_9,2	9,2	82,2	170	20	150	7	21	41,0	0,065	2,1

### 6.3 Treaksialforsøk

Tabell 15 viser parametere tolket fra treaksialforsøk. Det var mekaniske kontaktproblemer i treaksialapparatet i starten på de fleste forsøkene, dette er grunnen til at de har en noe ujevn start, se 7.4 og Bilag A. Ved tolkning av bruddspenningen ble dette tatt hensyn til ved å forlenge den stabiliserte grafen ned til punktet der den ville ha truffet tøyningaksen, og deretter trekke dette fra bruddtøyningen funnet rett fra grafen. Problemet ble rettet opp på slutten av laboratoriearbeidet, og grafene for forsøkene fra sylindere V\_T2\_5m og V\_T2\_6m er derfor korrekte.

På grunn av en feil ved dataloggingen i treaksialapparatet måtte alle data fra høsten 2011 også behandles og tolkes på nytt, og resultatene avviker derfor noe fra prosjektoppgaven. Forholdet mellom de ulike prøvestykkene er likevel nokså lik som ved første tolkning.

Prøve V\_T2\_5,55 ble ved en feiltakelse kjørt drenert (CID). Konsolideringsfasen er likevel av interesse, og prøven er derfor tatt med her.

Blokk\_9,20 ble testet i sammenheng med denne oppgaven, verdier for Blokk\_8,75 er mottatt fra Anders Gylland (2011).

Tabell 15 Tolkede parametere fra treaksialforsøk.

x indikerer at verdien ikke kunne tolkes, \* indikerer at verdien er noe usikker

Prøve	Dybde [m]	$s_u$ [kPa]	$\epsilon_{brudd}$ [%]	$a$ [kPa]	$\phi$ [°]	$D$ [-]	$w$ [%]	$\Delta\epsilon_{vol}$ [%]	$de/e_0$ [-]
H_R1_5,35	5,35	34,5	2,3	16	28,4	0,13	34,3	1,1	0,022
H_R1_5,25	5,25	32,0	2,8	15	28,5	0,03	34,0	1,1	0,022
H_T1_5,60	5,60	35,2	2,3	13	30	0,15	33,8	0,9	0,019
H_T1_5,45	5,45	31,5	3,1	x	x	0,2	36,0	4,0	0,082
H_T1_5,30	5,30	34,5	2,4	10	32	0,13	33,0	1,2	0,027
H_T1_6,55	6,55	33,3	2,6	13	30	0,06	38,3	1,8	0,035
H_T1_6,45	6,45	32,8	3,0	12	30	0	33,4	1,9	0,039
H_T1_6,35	6,35	32,7	4,4	10	31	0,08	33,4	1,6	0,033
H_T2_9,50	9,50	31,8	3,7	10	29	-0,42	35,9	1,9	0,038
H_T2_9,30	9,30	31,7	3,6	15	28	-0,55	38,4	3,1	0,061
H_T2_9,20	9,20	x	x	x	x	x	30,0	0,8	0,017
V_R1_5,55	5,55	31,0	3,2	13	32,5	-0,05	35,0	1,4	0,029
V_R1_5,35	5,35	37,8	2,6	15	30,5	0,14	30,9	1,3	0,029
V_R1_5,25	5,25	33,7	2,6	x	x	x	36,0	1,3	0,027
V_R1_6,50	6,50	36,0	1,9	8,4	31,0	0,09	37,0	1,6	0,033
V_R1_6,37	6,37	36,6	1,7	11	30,0	0,07	36,7	2,3	0,047
V_R1_6,20	6,20	39,3	3,9	x	x	0	34,7	1,7	0,036
V_R2_5,55	5,55	36,7	2,0	10	30,8	0,08	25*	1,2	0,031
V_R2_5,40	5,40	34,5	1,9	10	33,0	0,11	37,0	1,3	0,026
V_R2_5,27	5,27	32,5	3,3	8	33,0	0,12	28,8	1,6	0,038
V_R2_6,53	6,53	33,2	1,9	6	31,4	0,04	37,0	1,6	0,046
V_R2_6,37	6,37	39,2	1,7	13	31,0	0,09	35,6	1,3	0,026
V_R2_6,23	6,23	32,2	3,0	5	36,0	0	33,0	1,7	0,037
V_T1_5,53	5,53	30,7	2,8	8,8	31,0	0,05	34,5	1,4	0,030
V_T1_5,38	5,38	32,2	2,1	13	29,0	0,20	35,0	1,2	0,025
V_T1_5,24	5,24	31,1	3,0	12	32,0	0,15	24*	1,1	0,024*
V_T1_6,56	6,56	33,6	1,9	10	30,0	0	37,0	1,8	0,036
V_T1_6,36	6,36	32,9	2,7	14	29,0	0,07	36,7	1,5	0,031
V_T1_6,24	6,24	33,0	2,2	3,5	37,0	0,08	34,4	1,7	0,043
V_T2_5,50	5,50	x	x	x	x	x	x	1,4	0,031
V_T2_5,34	5,34	34,1	2,5	12	30,0	0,15	31,7	1,8	0,026
V_T2_5,20	5,20	29,5	3,0	12	29,7	0,16	35,1	2,0	0,040
V_T2_6,51	6,51	35,0	1,5	14	28,3	0,05	36,6	1,5	0,030
V_T2_6,35	6,35	36,2	1,9	7	33,7	0,05	35,5	1,6	0,036
V_T2_6,22	6,22	34,3	2,1	10	28,4	0,08	35,1	1,2	0,036
Blokk_8,75	8,75	43,0	1,5	13	31,0	-0,04	41,8	2,1	0,041
Blokk_9,20	9,2	42,7	2,3	14	27,0	0,02	36,0	2,1	0,042





## 7 SAMMENLIGNINGER OG DISKUSJON

I dette kapitlet vil resultatene bli diskutert og sammenlignet. I første omgang vil rutineundersøkelsene bli drøftet. På bakgrunn av dette, andre observasjoner og hendelser under felt- og laboratoriearbeidet vil forhold som kan ha påvirket prøveresultatene lagt fram som en ramme for videre diskusjon.

Videre vil resultatene fra ødometerforsøkene og treaksialforsøkene bli diskutert. Det blir først lagt vekt på om det er forskjell mellom prøvene som er tatt opp ved bruk av rotasjon og prøvene som er tatt ved bruk av trekk. Prøvestykkets plassering i sylindren er vurdert i forhold til prøveresultatene. Avslutningsvis er det gjort en vurdering i forhold til lagringstid fra prøven ble tatt opp av jorden og til den ble testet. Aktuelle faktorer nevnt i avsnitt 2.3.3 legges til grunn for sammenligningene og diskusjonen. Det er i hovedsak benyttet poretallsforholdet for vurdering av prøveforstyrrelser, men volumetrisk tøying er også oppgitt for treaksialforsøkene.

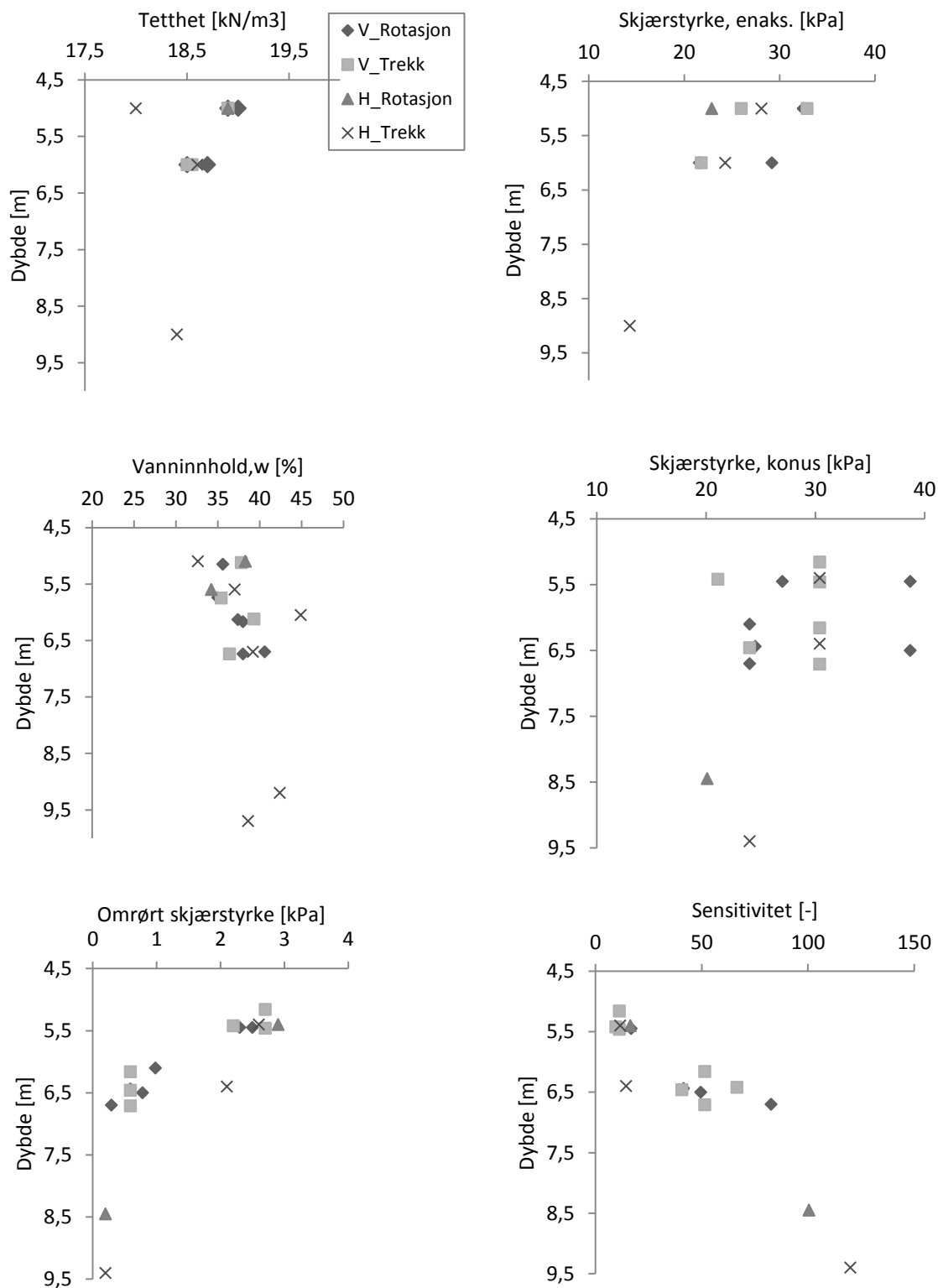
Det er kun presentert et utvalg av grafer og sammenligninger. Grafene er valgt slik at det skal være mulig å danne seg en oversikt over de ulike resultatene og slik at eventuelle sammenhenger skal komme til syne. Alle relevante grafer fra treaksialtestene og ødometertestene er vist i Bilag A og Bilag B. I Bilag C er en oversikt over lagringstiden til alle prøvestykkene.

Dersom datagrunnlaget hadde vært større, kunne en mer statistisk sammenheng vært interessant å utføre, men antall prøver for hver dybde og metode er ikke mange nok for slike beregninger. Diskusjonen er dermed basert på grafiske sammenligninger og trender ved sammenligning av tolkede parametere.

### 7.1 Rutineundersøkelser

Sammenstillingen av resultatene fra rutineundersøkelsen er vist i Figur 20. Sensitiviteten er økende med dybde, og det kommer også tydelig fram at leire tatt fra 6 meter på høsten 2011 kun er middels sensitiv, mens leire tatt fra 6 meter på våren 2012 er meget sensitiv, og til dels karakteriseres som kvikkleire. Prøvene fra høsten 2011 vil derfor ikke bli direkte sammenlignet med prøvene fra våren 2012.

Det er ingen sammenheng mellom resultatene fra rutineundersøkelsen og metode brukt for å ta opp prøvene. Selv om det er noe spredning mellom resultatene, kan leiren karakteriseres som relativ homogen. I samsvar med Long et al. (2009) vil derfor eventuelle forskjeller i styrke- og stivhetsforsøkene først og fremst være relatert til prøveforstyrrelser, og ikke inhomogeniteten i jorden selv om det som vist er lokale forskjeller som kan ha betydning.



Figur 20 Sammenstilling av resultatene fra rutineundersøkelsene

Sensitiviteten er økende med dybde. For prøvene tatt fra 6 meter våren 2012 er  $S_t \sim 50-80$  og ved 8-9 meter høsten 2011 er  $S_t \sim 100-120$ . Det lyktes ikke å få opp gode prøver fra 8 meter med rotasjon, men det har lyktes å få opp gode prøver fra kvikkleiren på 6 meter. Forskjellen i sensitivitet og den svært lave omrørte skjærstyrken til leiren fra 8 meter ( $s_r < 0,2$  kPa) er mest sannsynlig årsaken til dette. Skjærspenningene langs veggen av prøvesylinderen som hindrer prøven i å skli ut blir for små til å motstå prøvens vekt og skjærstyrken i bunn, og det blir dermed vanskelig å få opp prøven. Dersom det i tillegg til sensitive masser er lagdeling, vanskeliggjør det opptak ved bruk av rotasjon. Dette kan også ha hatt betydning i dette tilfelle, da det er noe lagdeling i området.

Prøvene fra 6 meter er noe fastere og sterkere kvikkleire, som gjør at skjærspenningene langs veggen mest sannsynlig er store nok til å holde fast prøven i prøvesylinderen. Dette er som vist i kapittel 4. Ved konusforsøkene er det vist at  $s_r$  varierer mellom 0,29 kPa og 0,79 kPa for prøvene fra 6 meter, våren 2012. Dette viser at dersom leiren er meget sensitiv med svært lav omrørt skjærstyrke bør trekk benyttes for opptak av sylinderprøven.

## 7.2 Forhold som kan påvirke prøveresultatene

Diskusjonen og sammenligning av de ulike resultatene vil i hovedsak basere seg på følgende tre faktorerers innvirkning på prøve kvaliteten:

- Metoden som ble benyttet ved opptrekk (rotasjon/trekk)
- Plassering i sylinderen
- Lagringstid

Som tidligere beskrevet kan også disse tre faktorene være avhengig av hverandre, ved at prøvens lagringstid ble lengre for prøvestykker fra topp av prøvesylinderen enn for prøvestykkene fra bunn og midt av prøvesylinderen.

I tillegg er det noen faktorer som kan ha innvirkning på prøveresultatene, men som ikke er tatt med som hovedfaktorer i sammenligningene og diskusjonen:

- Inhomogenitet: Leiren har noe lagdeling, med innslag av siltsikt og sandkorn. For prøvesylindrene fra 6 meter, våren 2012 kan de være noe forskjell gjennom prøvesylinderen. For å unngå store utvalg grunnet lagdeling, ble prøvestykkene valgt slik at tydelige lagdelinger og ujevnheter ble unngått.
- Bormannskap: Prøvene er tatt opp av to ulike borleder. Dette kan gjøre at sammenligningsgrunnlaget blir litt dårligere, siden prøvene da ikke er tatt opp ut i fra de nøyaktige samme forutsetninger, selv om de to borlederene følger den samme veiledningen, jf. Long et al. (2009). I dette tilfelle var det kun V\_T2\_5m og V\_T2\_6m som ble tatt om av en annen borleder enn de resterende prøvene.
- Laboratoriearbeid: Selv om laboratoriearbeidet er utført av den samme personen, kan det være faktorer som gjør at det blir forskjeller på måten arbeidet blir utført. I tillegg er laboratoriearbeidet en faktor som i seg kan føre til prøveforstyrrelser ved trimming og innbygging av prøver. Der det er åpenbart at noe som har skjedd i løpet av

laboratoriearbeidet har påført prøven forstyrrelser, er ikke disse resultatene tatt med i sammenligningene.

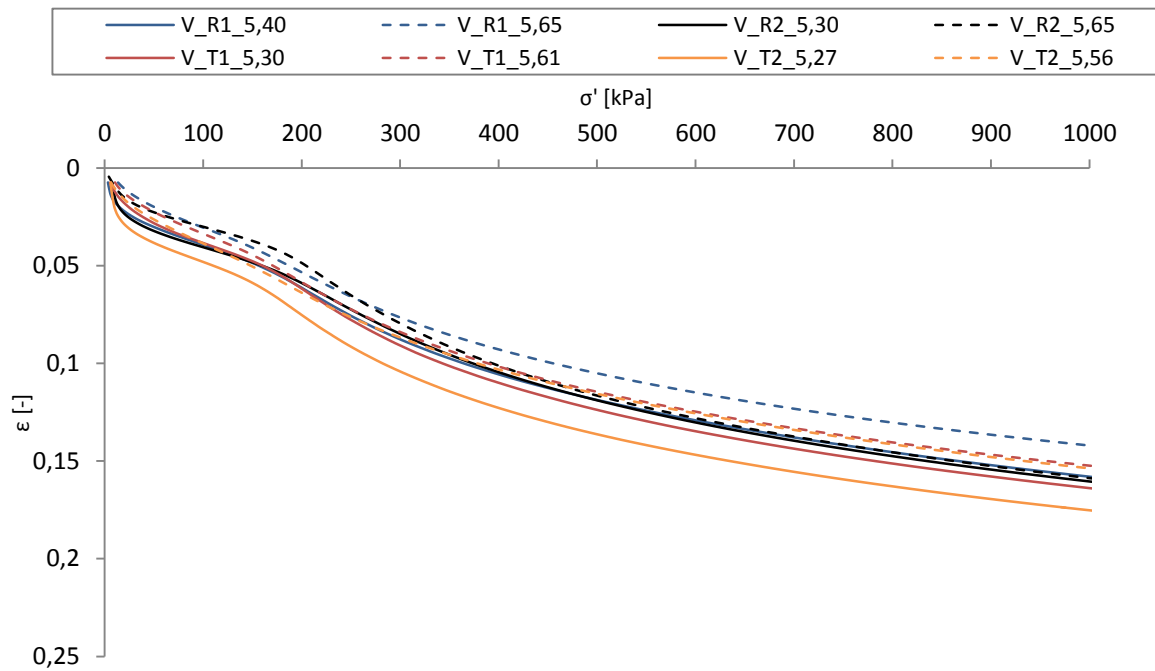
Det forutsettes at prøvetakingen fram til og etter opptak er utført likt hver gang og at prøvene er transportert og behandlet på en skånsom måte. Alle prøvesylindrene var rene og i god stand ved prøvetakingene.

### 7.3 Ødometerforsøk

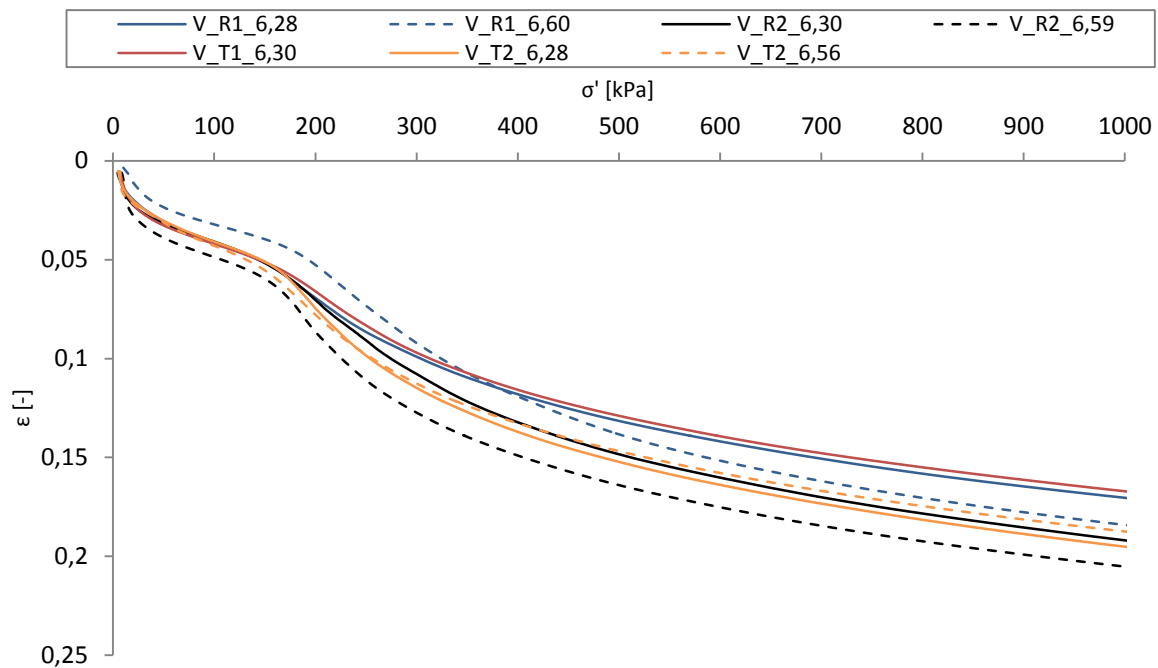
Det ble tatt to ødometerprøver fra hver prøvesylinder. Prøvene ble tatt fra omtrent 30 og 60 cm fra toppen av sylindren. Figur 21 og Figur 22 viser tøyning-spennings- kurver for alle ødometerprøvene fra henholdsvis 5 og 6 meter, tatt opp våren 2012. Sammenstillingen viser at resultatene fra forsøkene er gode, og at de stemmer godt med hverandre. Prekonsolideringsspenningen er lett å tolke, spesielt for prøvene fra 6 meter. I det normalkonsoliderte området før prekonsolideringsspenningen er resultatene fra ødometrene fra 30 cm fra topp av prøven svært like, og overlapper i stor grad hverandre. Den samme sammenhengen er også funnet av resultatene fra prøvene tatt opp fra 5 meter, høsten 2011, noe som gjør at tre prøveserier gir de samme tendensene.

Resultatene fra prøvestykkene V\_T2\_5,27, V\_R1\_6,60 og V\_R2\_6,59 skiller seg fra resten av resultatene. Siden kurvene ligger parallelt med de andre kurvene, kan det være små feil under innbyggingen som er årsaken, ved at kontakten helt i starten av forsøket ikke var optimal. Det er derfor grunn til å tro til at det ikke er prøveforstyrrelser under prøvetaking, transport og lagring som er hovedårsaken til avviket. Dette påvirker ikke bestemmelsen av stivhet og  $p'_c$ , da kurvene kun parallellforskyves vertikalt i grafen.

En mindre forstyrret ødometerprøve kan identifiseres med høyere stivhet før  $p'_c$ , og lavere stivhet etter  $p'_c$  sammenlignet med en mer forstyrret prøve. En sammenligning av stivhetene viser at det ikke er en sammenheng mellom hvordan metode som er benyttet for opptak av prøven og stivhet før og etter  $p'_c$ . Det er en antydning til at prøvene som er tatt fra den nederste delen av prøvesylindren har en noe høyere stivhet før  $p'_c$  enn prøvene tatt fra øvre del av sylindren. Forskjellene er i midlertidig så små, at en konklusjon ikke kan trekke ut fra dette.

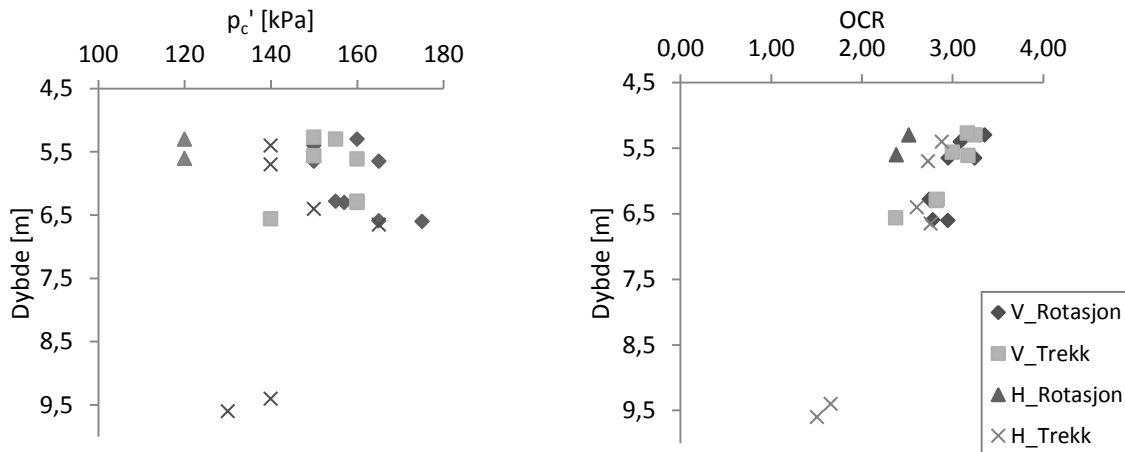


Figur 21 Resultat fra CRS for alle sylindre tatt opp våren 2012, 5 meter



Figur 22 Resultat fra CRS for alle sylindre tatt opp våren 2012, 6 meter

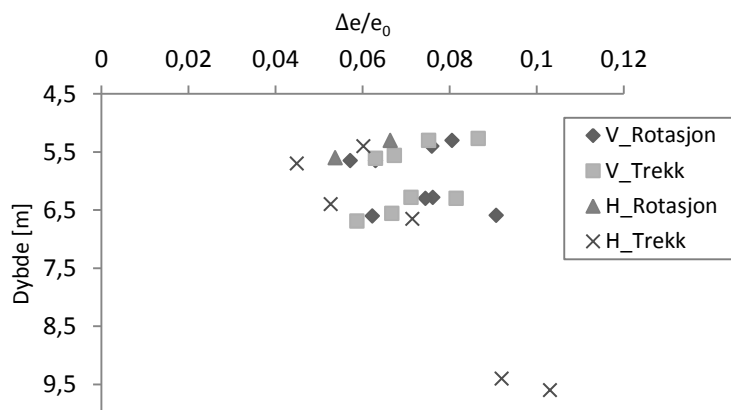
Figur 23 viser tolket prekonsolideringsspenning og OCR for prøvene, inndelt i metode brukt ved prøvetakingen. Grafene viser at verdiene stort sett varierer mellom 140 – 165 kPa for prøvene tatt våren 2012 ved 5 og 6 meter. Resultatene er jevnt fordelt mellom de to metodene, selv om prøvene tatt med rotasjon har en tendens til å vise noe høyere prekonsolideringsspenning, og dermed kan indikere høyere kvalitet. Samtidig er ikke antall prøver nok til å kunne fastslå dette. Som følge av at verdien av  $p'_c$  for de ulike prøvene er samlet, varierer heller ikke OCR bemerkelsesverdig. OCR er mellom 2,4 og 3,4 for prøvene fra 5 og 6 meter, og er noe synkende med dybde.



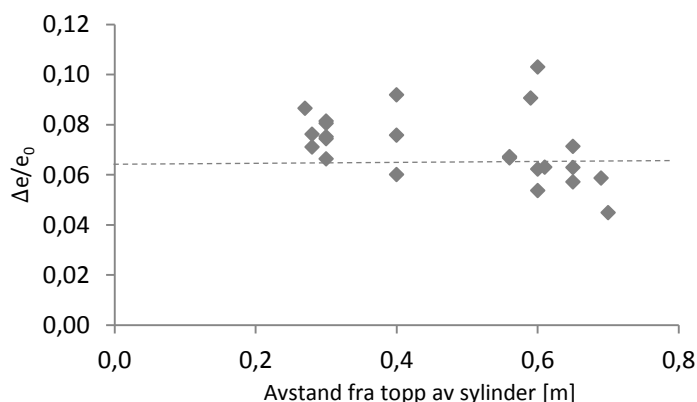
**Figur 23 Prekonsolideringsspenning og OCR tolket fra ødometerforsøkene**

Alle prøvene er vurdert i forhold til poretallsforholdet ved pålastasting opp til in situ vertikalspenning. Kvaliteten for ødometerforsøkene er ut i fra kriteriet til Lunne generelt klassifisert som av dårlig kvalitet ( $\Delta e/e_0 > 0,05$ ). Dette stemmer med teorien og tidligere utførte forsøk. Figur 24 viser en sammenstilling mellom dybder og poretallsforhold for de ulike prøvene. Det viser at det ikke er noen klar sammenheng med hvordan metode som er brukt for å ta opp prøven og klassifisert kvalitet. Det er ingen forskjell mellom prøvene tatt fra 5 og 6 meter på våren, selv om prøvene fra 6 meter er av mer sensitive masser. Prøvene tatt fra 9 meter på høsten viser en dårligere kvalitet enn de øvrige prøvene. Dette er forventet da det ved 9 meter er kvikkleire med høyere sensitivitet ved 9 meter enn ved 6 meter, er mer utsatt for forstyrrelser.

Figur 25 viser poretallsforholdet fordelt gjennom sylindrens lengde. 0 meter er den åpnede sylindrens topp, 0,8 meter er prøvens bunn. Kvaliteten til prøvene er generelt noe bedre for prøvene som er tatt fra nedre del (rundt 60 cm fra topp) enn for prøvene tatt fra sylindrens øvre del (rundt 30 cm fra topp). Dette gjelder både for prøvene tatt fra 5 meter og prøvene tatt fra 6 meter. Avstanden fra topp til der prøvestykkene ved 30 cm er hentet fra burde være stor nok til at leiren ikke er forstyrret av nedpressing av stempel og prøvesylinder eller forstyrrelser knyttet til at det er tatt opp prøver fra samme borhull tidligere. Prøvene fra toppen av prøvesylinderen er samtidig samlet i sine verdier, og det gjør at det vanskelig å bedømme kvalitetsforskjellen på dybdene



Figur 24 Poretallsforholdet ved testede dybder



Figur 25 Poretallsforholdet sammenlignet med prøvestykkets plassering i prøvesylinderen.

Det anbefales at ødometerforsøkene blir satt på rett etter åpning av prøven, da lagringen kan ha relativ stor innvirkning på resultatet for disse forsøkene. I dette laboratoriearbeidet ser det ut til at de to prøvene som ble lagret i kjøleskapet ikke har blitt påvirket av dette i stor grad, da de stemmer overens med de øvrige som ble bygd inn rett etter åpning av sylinter. Det er heller ikke påvist forskjell for ulik lagringstid i prøvesylinderen for prøvene, og begge ødometrene fra samme sylinter ble bygd inn og testet samtidig.

Innbygging av ødometerprøver vil til en viss grad påføre ødometerprøven forstyrrelser. I tillegg kan faktorer som at filteret ikke er helt nøyaktig lagt på, få store konsekvenser for resultatet. Dersom det ikke er tydelige forskjeller i påførte prøveforstyrrelser før laboratoriearbeidet, vil det være en mulighet av prøveforstyrrelsene påført under innbygging kan overskygge forstyrrelsene knyttet til prøvetakingen.

I forhold til metode som er brukt er det tilsier ikke resultatene at det er en tydelig forskjell i kvalitet, og plassering i sylinteren viser kun en svak tendens til at prøvene fra nedre del er bedre enn prøvene fra øvre. Diskusjonen i dette arbeidet stemmer dermed litteratur og teori som sier at det ofte ikke er hensiktsmessig å vurdere prøvekvalitet ut i fra ødometerforsøkene. Resultatene fra treaksialforsøkene viser ofte tydeligere sammenhenger for prøvekvalitet og de ulike variablene.

## 7.4 Treksialforsøk

Det ble utført 35 treksialtester fra 12 sylindere i alt for prøver fra høsten 2011 og våren 2012. I tillegg ble det utført en treksialtest for en blokkprøve som hadde vært lagret i 7 måneder. Blokkprøven blir omtalt i kapittel 8. Tallmateriale er blitt behandlet for å finne eventuelle trender. Selv om det ble forsøkt å utføre forsøkene på en måte slik at prøvene hadde de samme forutsetningene ved sammenligninger, er det ikke mulig å hindre at det blir individuelle forskjeller, spesielt på hvor i prøven prøvestykket tas fra og ventetid. Avsnitt 5.2 beskriver hvordan laboratoriearbeidet ble utført, og hvordan tidsaspektet ble tatt hensyn til.

De fleste sammenligningene er gjort for prøvene som ble tatt våren 2012, da det på grunn av terrengforskjellen gjorde at materialet som ble testet høsten 2011 ikke kan sammenlignes direkte med prøvene fra våren 2012. De bestemte styrkeparameterne og poretallforholdene for prøvene fra høsten 2011 er tatt med i den generelle sammenligningen.

### 7.4.1 Generelt

Figur 27 og Figur 28 viser alle prøvene tatt fra 5 og 6 meter fra våren 2012. Fargekoding etter dybde og metode er benyttet. Blå/lys blå er prøvestykket fra bunnen av prøvesylinderen, rød/oransje er prøvestykket fra midten av prøvesylinderen og grønn/mørk grønn er topp av prøvesylinderen, se Figur 26. Prøvene tatt med rotasjon har en stiplet linje, prøvene tatt med trekk har en heltrukken line.



Figur 26 Fargekodingen ved framstilling av treksiltestene

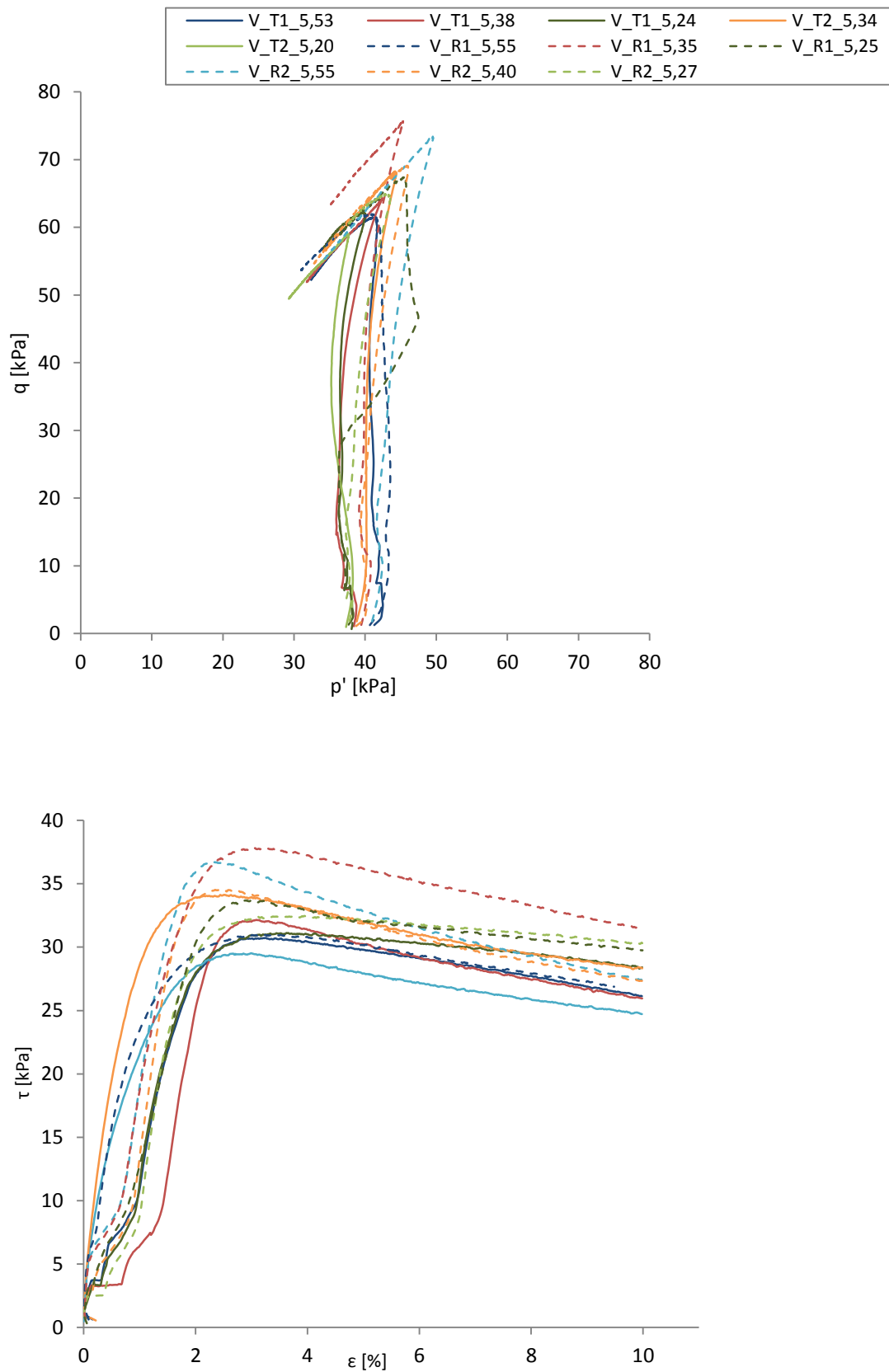
Ved den grafiske sammenligningen må det tas hensyn til at alle forsøkene bortsett fra V\_T2\_5m og V\_T2\_6m har en mekanisk kontaktfeil i begynnelsen. Det betyr at  $\epsilon$ - $\tau$ -grafene i virkeligheten skal flyttes til venstre i diagrammet, derav vil også bruddtøyningene bli lavere enn framstilt her. Dette er tatt hensyn til under tolkningene.

Det er tydelig at prøvene fra 6 meter har et klarere sprøbrudd enn prøvene fra 5 meter. Dette er fordi leiren på 6 meter var meget sensitiv og til dels kvikkleire, mens leiren fra 5 meter kun er middels sensitiv leire. De fleste prøvene dilaterer svakt, dilatansparameteren  $D$  er bestemt til omkring null for de fleste forsøkene. Generelt viser prøvene et klart brudd og er enkle å tolke. Det vitner om en generell god prøve kvalitet for prøvene som er testet.

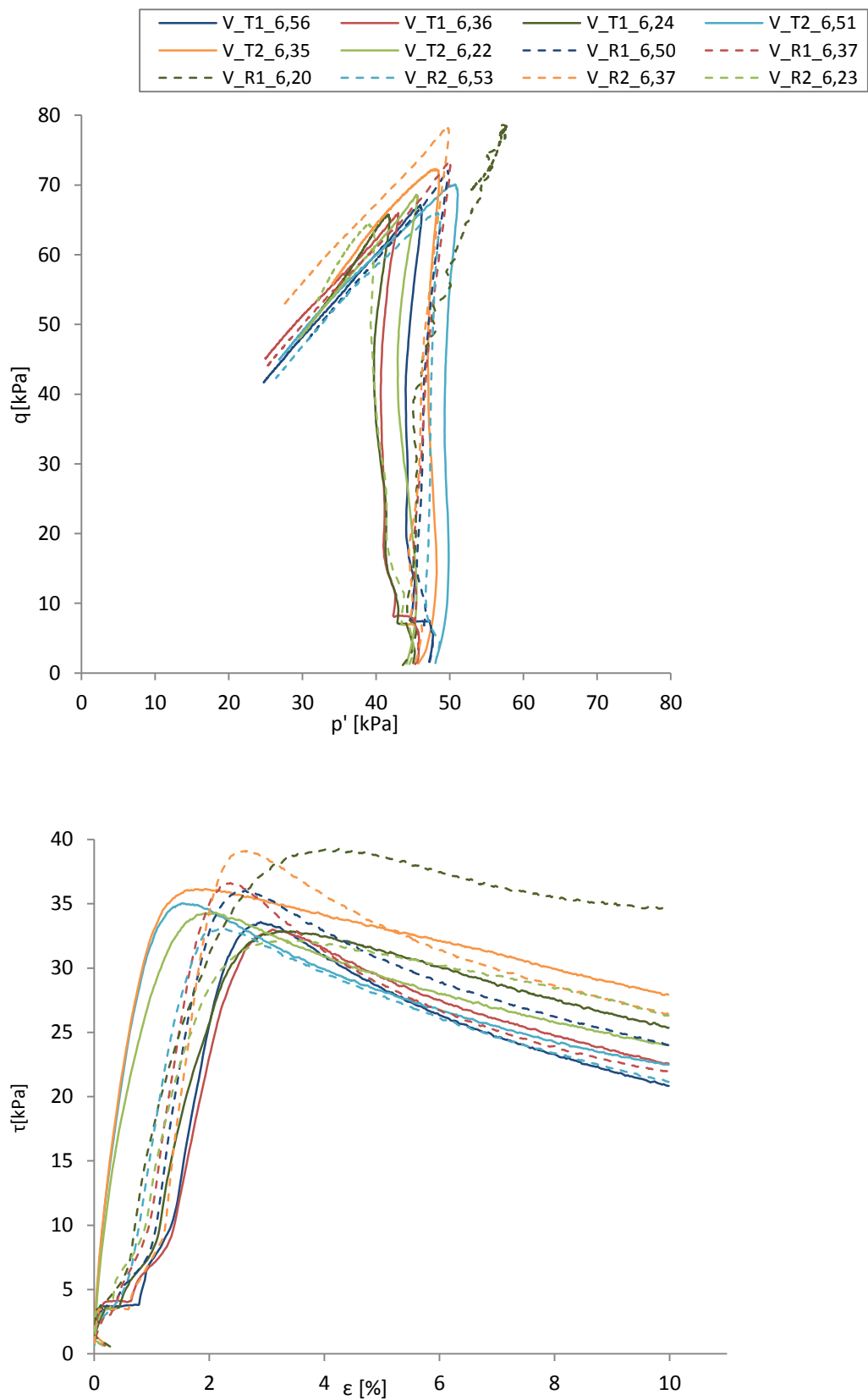
Videre er det klart at prøvestykkene som er hentet fra midten av prøven skiller seg ut ved å ha den høyeste skjærstyrken og den laveste bruddtøyningen. Dette gjelder spesielt prøvene tatt med rotasjon. Prøvene som er tatt fra toppen av sylindere har generelt de dårligste resultatene, og skiller seg fra de resterende ved flate og mye mindre skarpe kurver.

Resultatene fra bunnen av prøven er noe varierende. For prøvene tatt fra 5 meter har prøvene fra bunn av sylindere lavere skjærstyrke enn prøvene fra toppen av prøven, men bruddet er skarpere. For prøvene fra 6 meter er kvaliteten på styrkeparameterne for prøvene tatt fra bunn av sylindere bedre enn for prøvene tatt fra topp av sylindere.





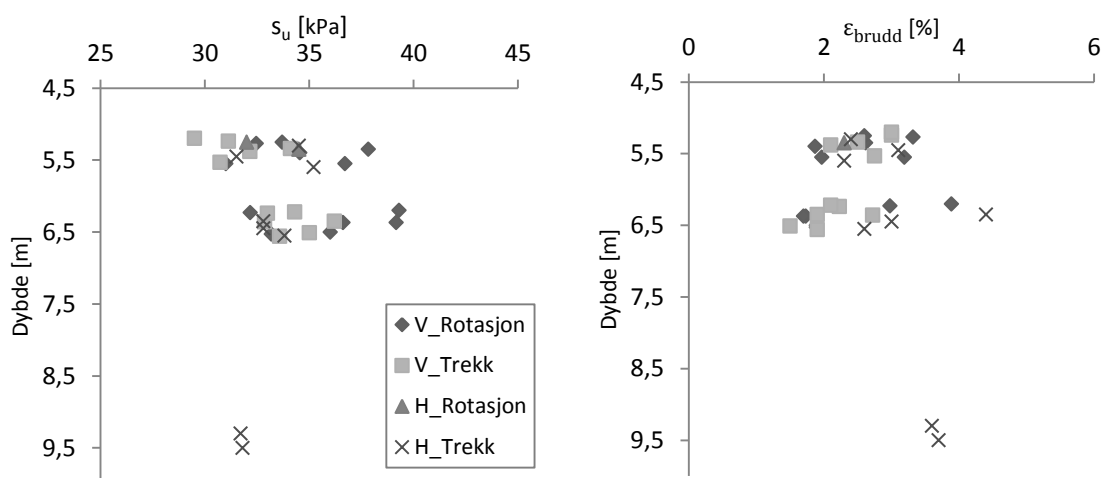
Figur 27 Treksialresultater for prøver tatt våren 2012, 5- 5,8 meter. Øverst:  $q$ - $p'$ -plot, Nederst:  $\tau$ - $\epsilon$ -plot.



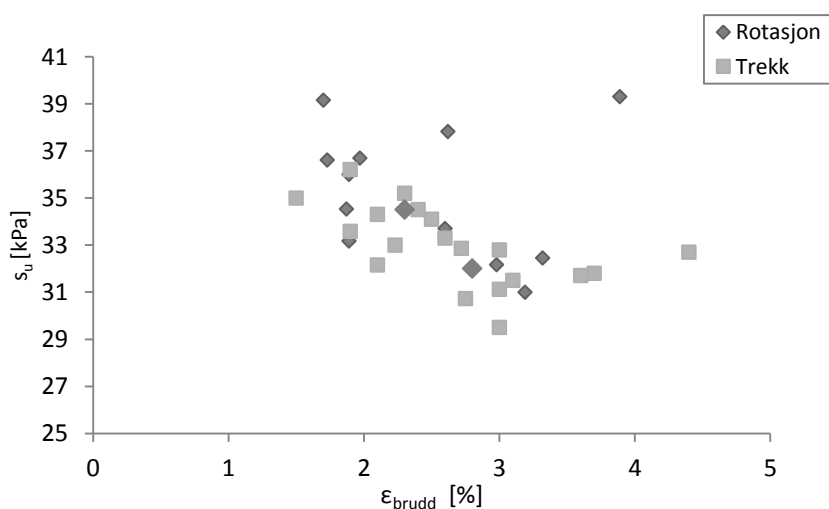
Figur 28 Treaksialresultater for prøver tatt våren 2012, 6-6,8 meter. Øverst:  $q$ - $p'$ -plot, Nederst:  $\tau$ - $\epsilon$ .

Parametere funnet og tolket fra treaksialforsøkene er samlet og plottet med dybde. Figur 29 viser skjærspenning og bruddtøyning for de ulike sylinderkategoriene. Totalt er det ingen klar forskjell mellom prøvene tatt med rotasjon og prøvene tatt med trekk, men det kan bemerkes at de prøvene som gir høyest skjærstyrke er de som er tatt med rotasjon, mens de som gir lavest skjærstyrke er tatt med trekk.

Ved å studere bruddtøyningene mot dybde i Figur 29 synes det at verdiene for prøvene tatt med rotasjon og trekk varierer innenfor det samme området. Prøvene tatt fra 6 meter har noe lavere bruddtøyninger enn prøve tatt fra 5 meter, dette kommer igjen av en høyere sensitivitet på 6 meter. Her er det verdt å legge merke til at ytterpunktene som har de høyeste tøyningene er prøver tatt med rotasjon (dersom man ser bort fra prøvene fra 9 meter tatt i meget sensitiv leire).



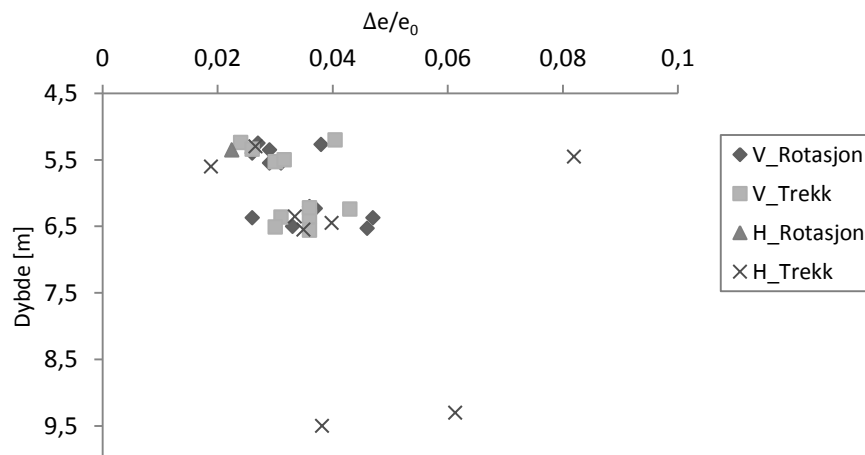
Figur 29 Skjærspenninger og bruddtøyning fra treaksialforsøk mot dybde



Figur 30 Sammenheng mellom skjærstyrke og bruddtøyning for alle prøvene

I Figur 30 er sammenhengen mellom skjærstyrke og bruddtøyning for alle de testede prøvene vist. Sammenhengen har som forventet en tendens til å være lineær. Dersom prøven har høy skjærstyrke har prøven lav bruddtøyning, og ved lav skjærstyrke har prøven høy bruddtøyning. Gode prøver ligger øverst til venstre i diagrammet, dårlige prøver havner nederst til høyre. Som i Figur 29 er det generelt for alle prøvene relativt like resultater for prøvene tatt med trekk og prøvene tatt med rotasjon, mens ytterpunktene viser at rotasjonsprøver har gitt de beste enkeltresultatene, og trekkprøver har gitt de dårligste enkeltresultatene.

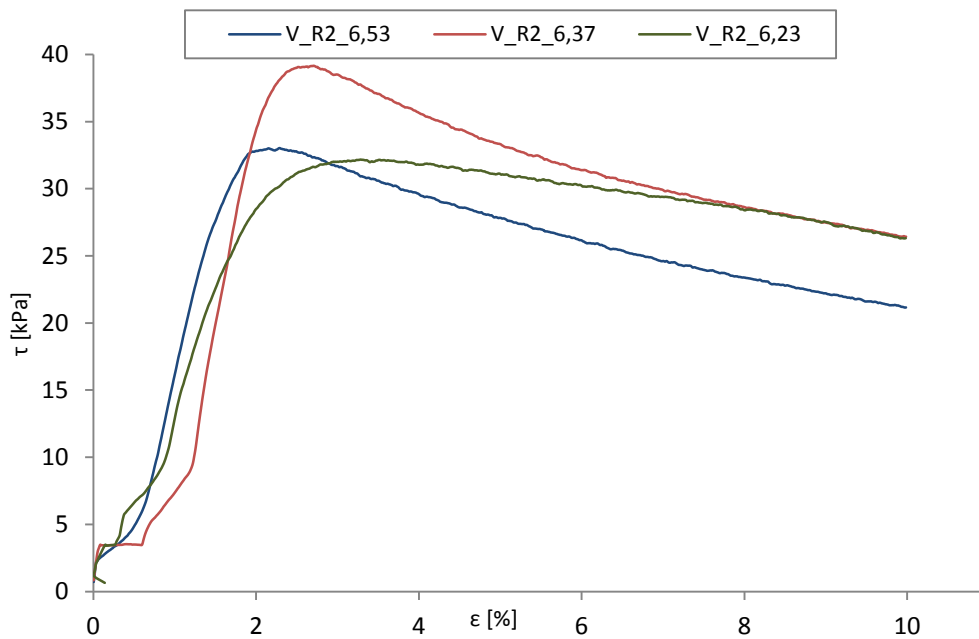
Figur 31 viser poretallsforholdet for alle treaksialforsøkene, og indikerer prøve kvaliteten. Prøvene har OCR over 2, og ut i fra kriteriet presentert av Lunne et al. (1997)(se Tabell 3) klassifiseres mange av prøvene til meget god ( $\Delta e/e_0 < 0,03$ ) eller god kvalitet ( $0,03 < \Delta e/e_0 < 0,05$ ). Prøvene tatt fra 5 meter er av noe bedre kvalitet enn prøvene tatt fra 6 meter. Dette er trolig grunnet at den meget sensitive leiren rundt 6 meter som er mer utsatt for prøveforstyrrelser. Poretallsforholdet gir ingen indikasjon på en forskjell mellom prøver tatt med bruk av rotasjon og prøver tatt med trekk.



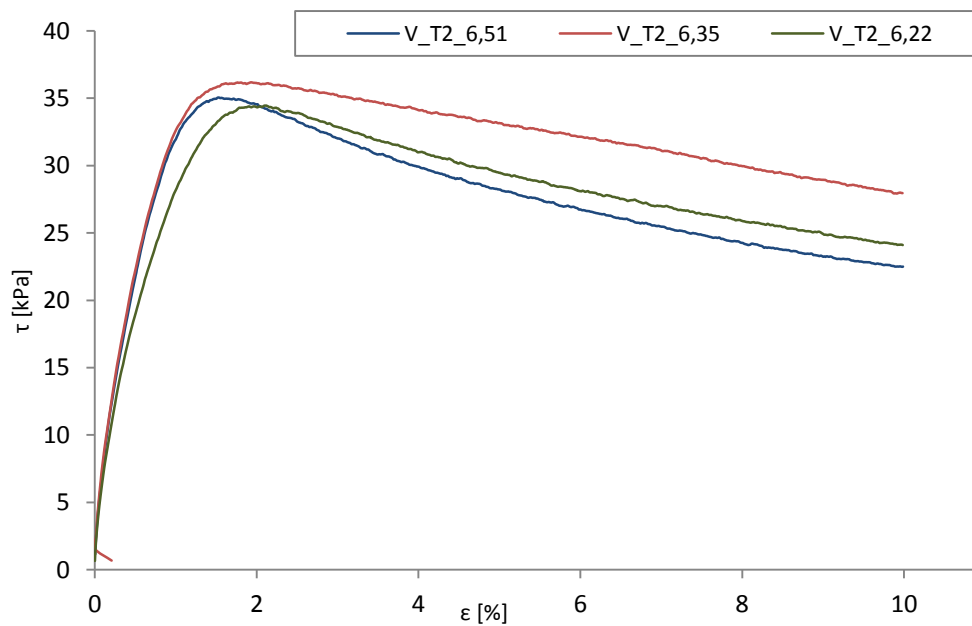
Figur 31 Poretallsforholdet for alle prøvene fra treaksialforsøk

#### 7.4.2 Plassering i sylindere

Figur 32 og Figur 33 viser resultatene for sylindrene V\_R2\_6m og V\_T2\_6m, og viser hvordan variasjonen mellom prøvestykke innad i prøvesylindrene kan være. Disse er representative for tendensen blant sylindrene som er testet. De midterste prøvestykkene fra prøvene tatt med rotasjon skiller seg ut som de beste, og det er store variasjoner innad i prøvesylindren. For prøvene som er tatt med trekk er bruddstyrken for prøven tatt fra midten noe lavere enn den som er tatt med rotasjon. Variasjonen innad i prøvesylindren er derimot ikke så store som innad i prøvene tatt med rotasjon. Dette er en gjennomgående trend for de fleste av prøvesylindrene.



Figur 32 Resultat fra sylinder V\_R2\_6m. En ujevn start kommer av kontaktfeilen i treksialmaskinen.



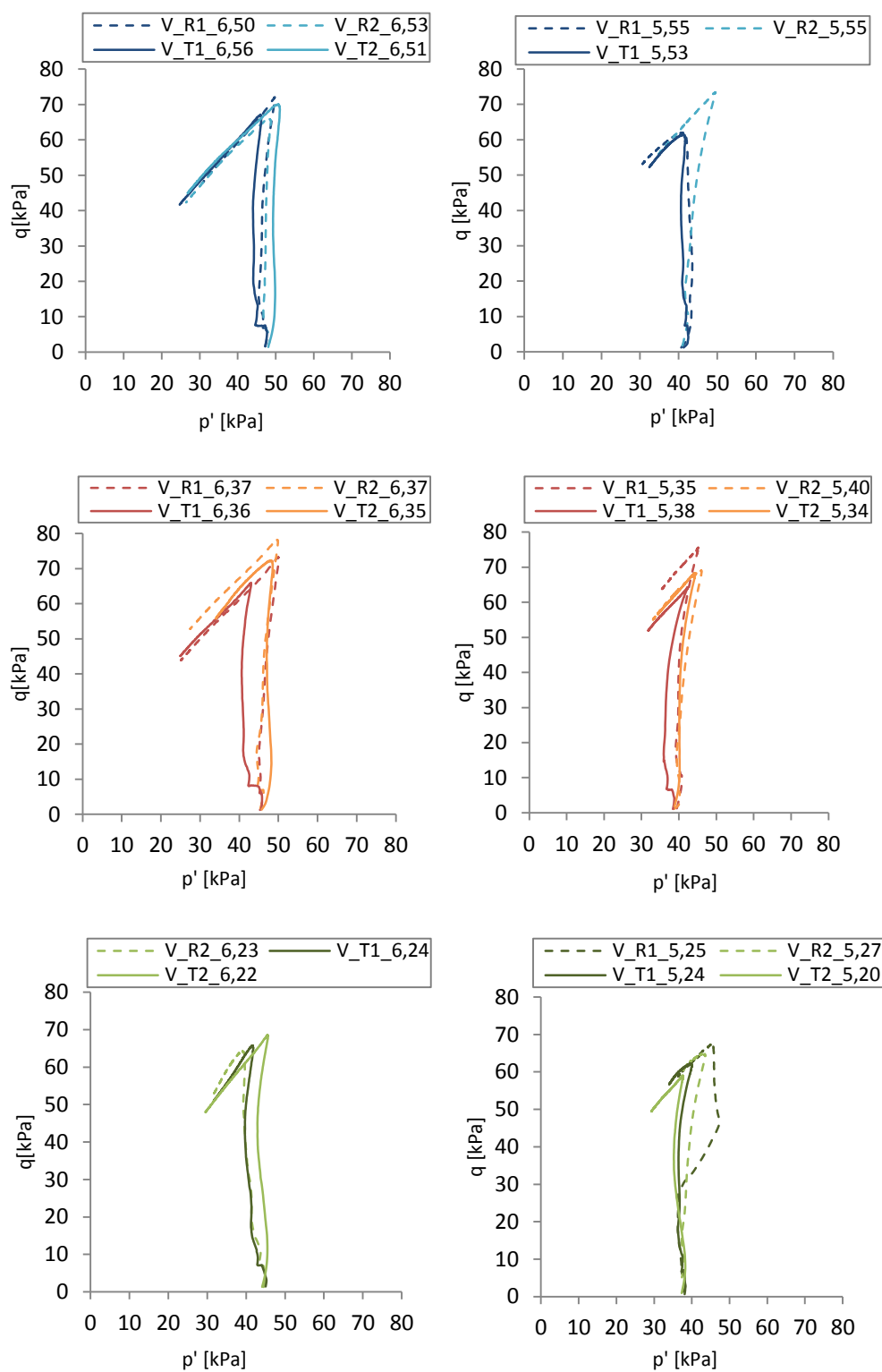
Figur 33 Resultat fra V\_T2\_6m. Her er kontaktfeilen i treksialmaskinen rettet opp.

I Figur 34 er det gjort en sammenligning av alle prøvene i forhold til om de er tatt fra 5 eller 6 meter, og dybde i sylindren. Rotasjonsprøvene og trekkprøvene er sammenlignet. Sammenligningen viser at for prøvene tatt fra bunnen av sylindren er det ingen bemerkelsesverdige forskjeller mellom prøvene som er tatt med rotasjon og prøvene som er tatt med trekk. Det var forventet at de ville være en forskjell på prøvestykkene tatt fra bunn av sylindrene, da rotasjonen var antatt å ha størst betydning her, men dette er ikke påvist. Det tyder på at rotasjon ikke er så skadelig for de nedre delene av prøvesylindren som ventet. Avstanden fra bunnen av prøvesylindren til enden av et prøvestykke er minst 15 cm. Dersom prøvestykke hadde blitt hentet fra lenger ned i sylindren kunne det kanskje blitt påvist forskjeller, men det er ikke praksis å hente et prøvestykke til styrke- og stivhetstester så langt nede i sylindren, så dette hadde ikke hatt noen hensikt.

For prøvene tatt fra midten av prøven er resultatene for prøvene tatt med rotasjon bedre enn for samtlige tatt med trekk. De har den høyeste skjærstyrken, og har laveste bruddtøyningen. Prøvestykkene fra midten av prøven som er tatt med rotasjon er de som gir de beste resultatene av alle prøvene som er tatt i dette laboratoriearbeidet.

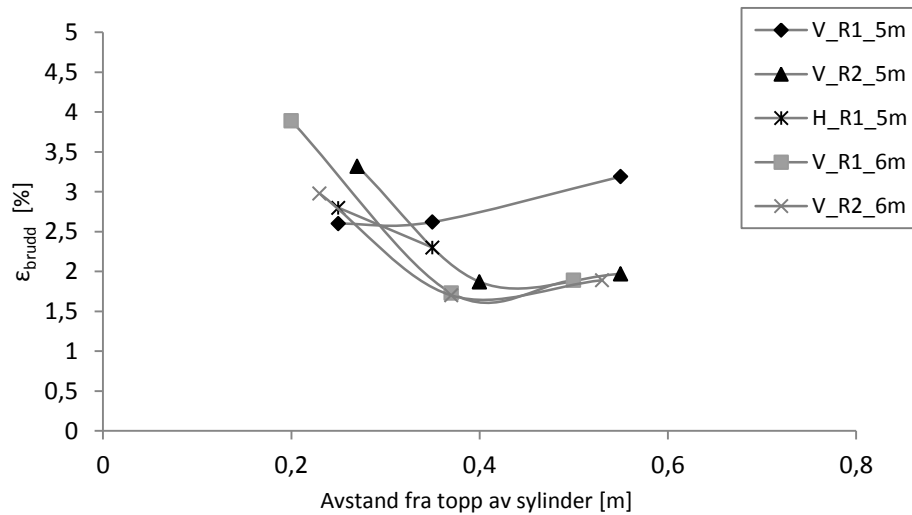
For prøvestykkene som er tatt fra topp av sylindren er det ingen klar sammenheng mellom resultatene og metode som er benyttet for opptak. For prøvene tatt fra 6 meter er de som er tatt med trekk de beste, for prøvene tatt fra 5 meter er de som er tatt med rotasjon best. Det er heller ingen grunn til å tro at den skal være en sammenheng mellom metode og kvalitet for prøvene fra topp i sylindren. Det er derfor ikke klart hva som er årsaken til at disse prøvene skiller seg ut som spesielt dårlige. Prøvene skal være tatt så langt ned fra prøvesylindrens topp at de i utgangspunktet ikke skal være forstyrret av nedpressingen av stempelet eller tidligere borer, som beskrevet i avsnitt 2.3.2. Dette kan likevel ha hatt en påvirkning. Videre kan inhomogenitet i sylindrens være avgjørende for kvaliteten, da prøvene fra 6 meter er tatt i en kote der jorden går over fra middels sensitiv til meget sensitiv leire. Det ble ikke påvist store forskjeller ved rutineundersøkelsene, men det kan fortsatt være lokale forskjeller som ikke ble oppdaget, og som kan gjøre utslag. Den siste faktoren som kan påvirke disse prøveresultatene er lagringstiden. Prøvene fra topp av sylindren ble lagret lengst. Dette er videre diskutert i avsnitt 7.4.3.

Ødometerprøvene viser også en svak tendens til at prøvene fra øvre del av sylindren var av noe dårligere kvalitet enn prøvene fra nedre del. Funnene fra treksialforsøkene viser bekrefter dette.

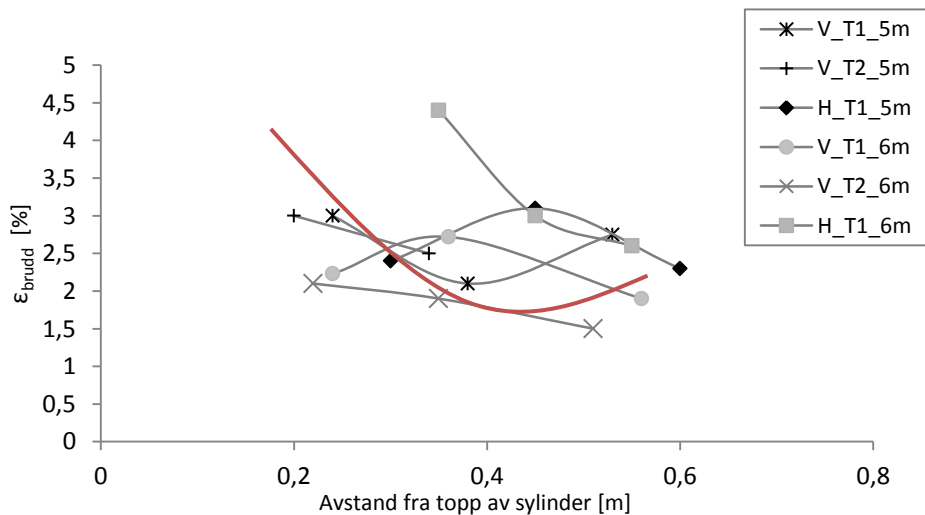


Figur 34 Alle prøvene tatt våren 2012, sammenlignet for samme plassering i sylindren, rotasjon/trekk

I Figur 35 og Figur 36 er det gjort en sammenligning mellom prøvestykkets plassering i sylindere og bruddtøyning for henholdsvis prøver tatt med rotasjon og prøver tatt med trekk. Prøvestykkene i hver sylinder er koblet til hverandre med en linje, slik at utviklingen innad i prøven er synlig. Figur 35 viser alle prøvene tatt med rotasjon. Prøvene viser samme tendens for alle prøvene. Den laveste bruddtøyningen er i midten av prøven, og den høyeste er i topp. Prøvestykket som er tatt i bunn har en noe høyere bruddtøyning enn den i midten, men er også lav, og under 2 %. Variasjonen innad i prøven er som tidligere beskrevet stor, tendensen er den samme for mange av prøvene.



**Figur 35** Bruddtøyning sammensatt med prøvestykkets plassering i prøvesylindere, 0 meter er den åpne prøvens topp, 0,8 meter er prøvens bunn. Sammenheng for prøver tatt med rotasjon.



**Figur 36** Bruddtøyning sammensatt med prøvestykkets plassering i prøvesylindere, 0 meter er den åpne prøvens topp, 0,8 meter er prøvens bunn. Sammenheng for prøver tatt med trekk.



Figur 36 viser alle prøvene tatt med bruk av trekk. Prøvene viser ikke samme tendens som prøvene tatt med rotasjon. For disse prøvene er det mer variasjon mellom sylindrene, og hvor hvilket prøvestykke som har størst/minst bruddtøyning varierer fra sylinder til sylinder. For 4 av de 6 sylindrene er her bruddtøyningen lavest i prøvestykke fra bunn. Det er noe mindre variasjoner i bruddtøyning innad i hver prøve enn for prøvene tatt med rotasjon, jamfør tidligere beskrevet resultater. I figuren er en typisk rotasjonsprøve tegnet inn (rød kurve), og viser at bruddtøyningene i forhold til dybde er noe lavere for rotasjon, bortsett fra i topp der de er høyere for prøvene tatt med rotasjon.

Resultatene viser at prøvestykkets plassering i sylindren har stor betydning til prøveresultatet. Ikke overraskende, er det best resultater midten i sylindren, som er minst påvirket av prøveforstyrrelser. Det er vanlig at de prøvestykkene som benyttes til treksialforsøk og ødometerforsøk blir hentet fra midt i sylindren, og resultatene fra dette arbeidet viser viktigheten av dette, slik at resultatene skal bli representative for den virkelige jorden.

Siden det ikke er merkbare forskjeller mellom resultatene fra bunn og topp av sylindren i forhold til metode benyttet, mens midtstykket er bedre for rotasjon, viser at i dette laboratoriearbeidet at rotasjon, har vært mest skånsom for disse prøvene.

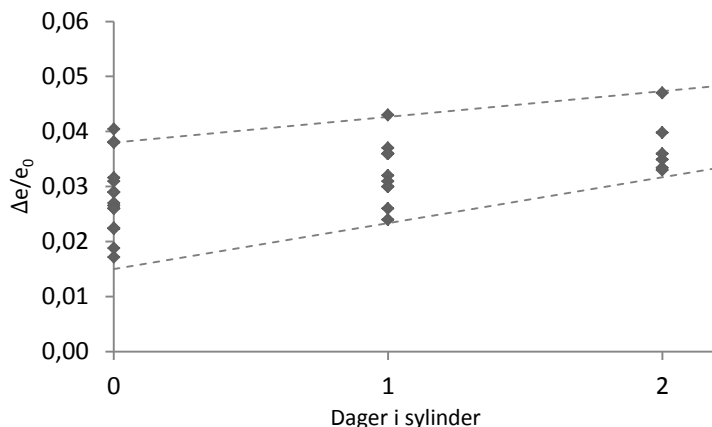
### 7.4.3 Lagringstid

Det er tilslutt gjort en vurdering i forhold til lagringstid og kvalitet av prøven. Som tidligere beskrevet relaterer lagringstiden av prøvestykkene seg til prøvestykkenes plassering i prøven. Noen prøver ble testet rett etter opptak, og de prøvene som lå lengst fra opptak/utskyvning lå i 4 dager. Det er ikke store forskjeller på prøvene som har kun vært lagret en dag eller to, da synes det som om de beholder egenskapene sine godt.

Det kan være flere grunner til prøvene som blir lagret er av dårligere kvalitet enn de som er testet tidlig etter opptak. Det er tidligere bevist at lagring er av stor betydning ved parameterbestemmelser. Lagring i sylindren kan føre til bindinger mellom leire og prøvetakeren og dermed friksjonen øker. Ved utskyvning vil det da kunne bli forstyrrelser, siden kraften som påføres prøven for å få den ut, gjør at prøven kan bli forstyrret. Samtidig fører lagring til en endring i vanninnhold, som varierer gjennom prøven, som forklart i avsnitt 2.3.3.

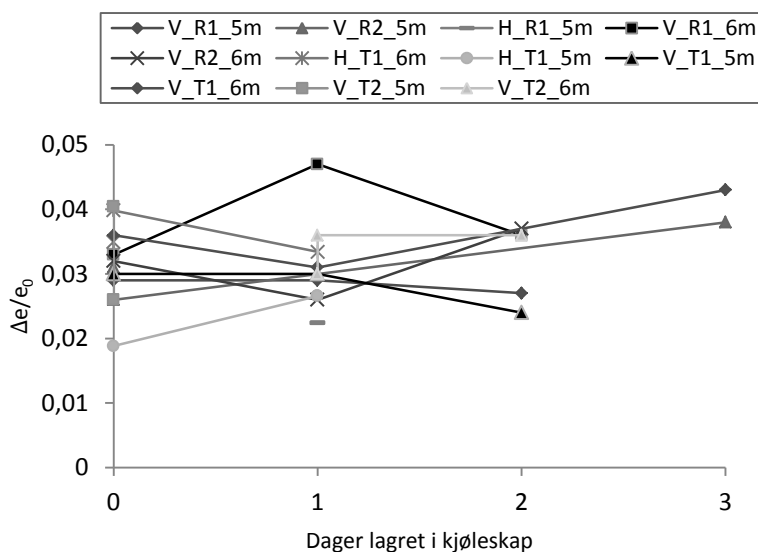
Figur 37 viser poretallsforholdet i forhold til antall dager prøvene er lagret i sylindren. Sylindrene ble lagret i romtemperatur før åpning. Den viser en tendens til at poretallsforholdet er økende, spesielt etter at sylindren har vært lagret i to dager. Det var kun to sylindere som ikke ble åpnet før to dager etter prøvetakning. Den ene av disse var kvikkleire, den andre var medium sensitiv leire. Utvalget av prøver som ble lagret i sylindren i to dager er derfor mindre enn de som ble åpnet samme dag eller dagen etter, og forskjellene er ikke veldig store. Det kan likevel bemerkes at ingen av prøvene som har ligget to dager i sylindren før de ble kjørt ut klassifiseres som av meget god kvalitet. Årsaken til dette kan være både endring i vanninnhold og forstyrrelser ved utskyvning.

Dette betyr at selv en kort lagringstid på noen få dager kan ha betydelig innvirkning på prøveresultatet. Sylindrene burde samtidig vært lagret i kjølerom, det kan da være at forskjellen hadde vært noe mindre mellom lagringsdager. Oversikten over lagringstider for alle prøvene er gitt i Bilag C.



Figur 37 Poretallsforhold i forhold til antall dager lagret i sylinder

I Figur 38 er poretallsforholdet vist i sammenheng med hvor lenge prøvestykkene har vært lagret i kjøleskap. En tilsvarende sammenheng for total antall dager prøven er lagret (lagring i sylinder + lagring i kjøleskap) viser den samme utviklingen. Poretallsforholdet er økende for noen av prøvene, men ser ikke ut til å ha en klar sammenheng mellom lagringen i kjøleskap. Prøvene var forsiktig pakket inn med vått papir, slik at prøvene skulle opprettholde vanninnholdet, slik at de skulle bli minst mulig påvirket av lagringen.

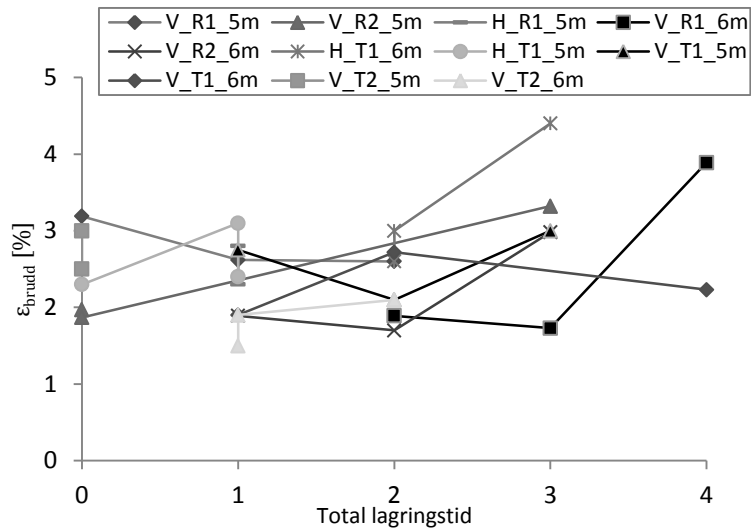


Figur 38 Poretallsforholdet i forhold til antall dager lagret i kjøleskap

Figur 39 viser total lagringstid av prøven i forhold til bruddtøyningen. For mange av prøvene øker bruddtøyningen med lagringstiden, spesielt når lagringstiden blir på over 3 dager. Dette gjelder spesielt det siste prøvestykke som ble testet fra hver sylinder, som er prøvestykket fra topp av sylindere. Toppstykkene som har kort lagringstid (1-2 dager) skiller seg ikke like mye ut som toppstykkene som har lengre lagringstid (3-4 dager). For det andre prøvestykket som er testet for hver sylinder, går bruddtøyningen ofte noe ned, dette var prøvestykket fra midten av sylinder.

I forhold til diskusjonen om hvorfor prøvestykkene fra topp av sylindere viser en dårligere kvalitet enn de resterende, gir heller ikke lagringstiden et tydelig svar på årsaken. Mest sannsynlig er årsaken sammensatt av prøveforstyrrelser på grunn av forstyrrelser ved

nedpressing og utskjæring og eventuelle lokale inhomogenitet som blir forsterket av at prøvestykkene lagres lengre enn de resterende prøvestykkene. Dette er et eksempel på en rekke uheldige faktorer som innvirker på prøve kvaliteten og som gir resultater som ikke er representative for den virkelige jorden.



Figur 39 Bruddtøying i forhold til total lagringstid

Praksis i bransjen er at prøvene ofte lagres over lengre tid. Funnene i tidligere studier og tendensene i dette laboratoriearbeidet viser at dette kan være svært uheldig for prøveresultatene. Dette burde bli tatt hensyn til ved vurdering av hvor stor nytteverdi parameterne bestemt fra laboratorieundersøkelsene for prøver som har vært lagret over lang tid er. For at prosjektøren som skal nyttiggjøre seg av laboratorieresultatene skal kunne vurdere de oppnådde parameteren, burde lagringshistorien til prøven være opplysninger som blir gitt med resultatene.



## 8 BLOKKPRØVER

I juni 2011 ble det tatt opp blokkprøver fra 8 og 9 meter. Det ble testet en blokkprøve fra 8,75 meter kort tid etter opptak (omtrent 14 dager), mens en blokkprøve fra omtrent 9,3 meter ble lagret fram til februar 2012 (omtrent 7 måneder). Høsten 2011 ble det tatt opp og testet sylindrerprøver fra 9 meter med kvikkleire. Det vil i det følgende bli foretatt en sammenligning mellom de ulike resultatene, og vurdering i forhold til prøveforstyrrelser.

Blokkprøven (Blokk\_8,75) som ble testet rett etter opptak er testet i forbindelse med et pågående upublisert arbeid med Ph.D. av Anders Gylland (Gylland 2011). Denne prøven er brukt som sammenligningsgrunnlag for vurderingen. Blokk\_8,75 hadde en omrørt skjærstyrke på omtrent 0,2 kPa ved testing rett etter opptak. Sylindrerprøvene som ble testet like etter opptak hadde tilsvarende omrørt skjærstyrke.

Ved åpning av blokkprøven som hadde vært lagret i 7 måneder ble det observert at denne ikke hadde sammen kvikke oppførsel som den blokkprøven som hadde blitt testet rett etter opptak, og den antatte omrørte skjærstyrken hadde blitt betydelig høyere. (Dette ble dessverre ikke kvantifisert med konusforsøk, men endringen var svært tydelig). De øverste 10 cm ble kuttet av, og blokken virket noe kvikkere inn mot midten av blokkprøven, men det var fortsatt mindre kvikt enn de nyåpnede prøvene. Biten som det ble utført ødometerforsøk og treaksialforsøk på ble derfor tatt fra kjernen av prøven, slik at denne skulle ha så god kvalitet som mulig.

Figur 40 og Figur 41 viser treaksialresultatene og ødometerresultatene for blokkprøvene og sylindrerprøvene. Forskjellen mellom blokkprøvene og sylindrerprøvene er tydelig, der blokkprøvene har et klassisk sprøbrudd, mens sylindrerprøven har en slappere kurve. Sylindrerprøvene har en betydelig lavere skjærstyrke og høyere bruddtøyning. Sylindrerprøvene kontrakterer, mens blokkprøvene har dilatansparameter rundt 0. Det er tydelig at blokkprøvene er mindre forstyrret og har en klart bedre kvalitet enn sylindrerprøvene. Dette er som forventet, og tilsvarer tidligere studier.

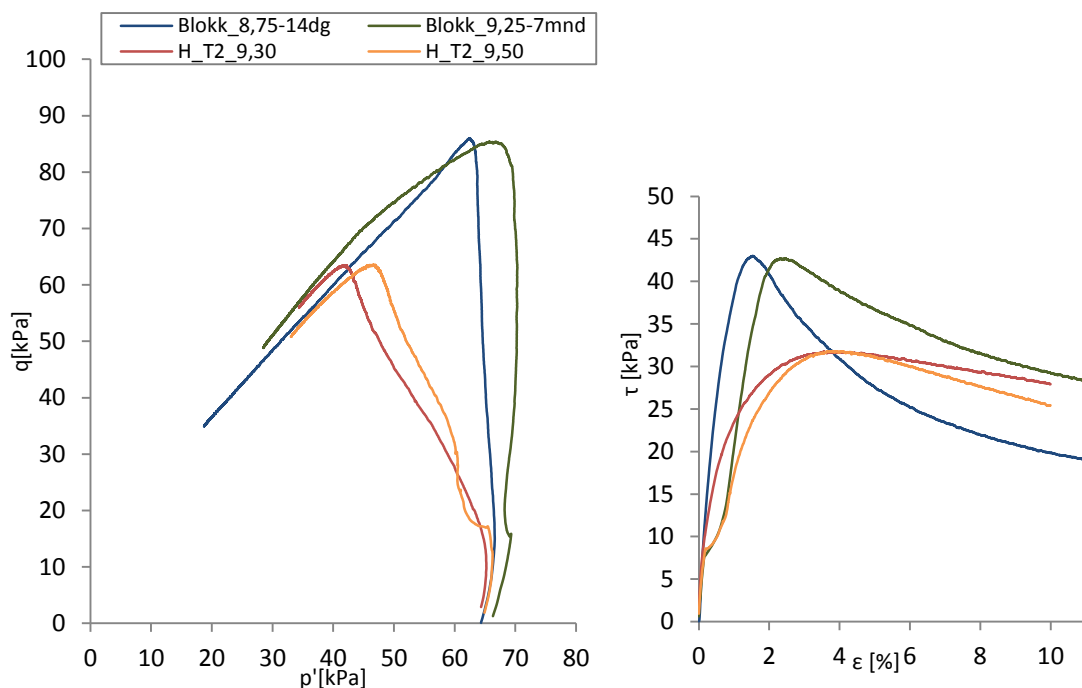
Fra ødometerforsøket ser man at stivheten før  $p'_c$  er høyere for blokkprøvene enn for sylindrerprøvene, og at  $p'_c$  er klarere markert for blokkprøvene, noe som tydelig viser bedre kvalitet. Sylindrerprøvene ble testet rett etter opptak, og det kan være grunnen til at den likevel viser relativt gode resultater.

Ved lagring av blokkprøver i 7 måneder er det forventet en endring i kvalitet. Poretallsforholdet for de to blokkprøvene er likt, mens vanninnholdet har sunket fra 41,8 % til 36 % i løpet av lagringstiden. Disse resultatene er bedre enn forventet, da det hadde vært grunn til å tro at den lagrede prøven ville ha hatt en dårligere kvalitet.

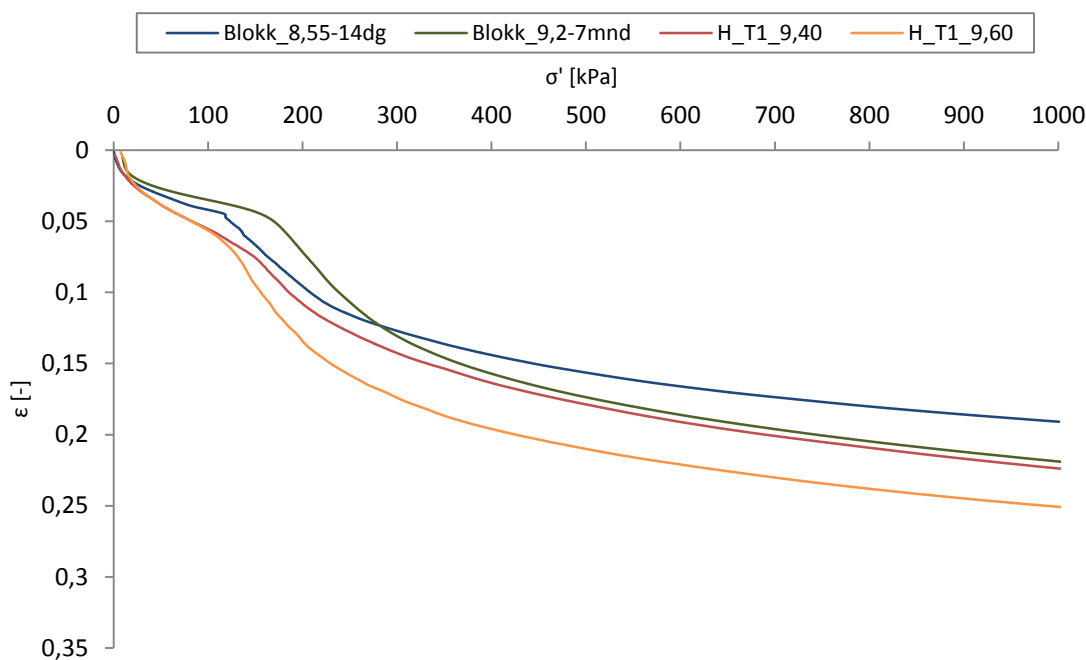
Blokk\_8,75 har  $s_u = 43$  kPa og  $\epsilon_{brudd} = 1,5$  %. Blokk\_9,25 har  $s_u = 42,7$  kPa og  $\epsilon_{brudd} = 2,3$  %. Lagringen har ikke påvirket skjærstyrken i stor grad, men bruddtøyningen har økt.

Bruddkurvene er ikke like bratte, og det karakteristiske sprøbruddet er ikke like tydelig for den lagrede blokken. Blokk\_9,25 dilaterer svakt, mens Blokk\_8,75 kontrakterer svakt.

Ødometerresultatene viser også forskjeller mellom den ferske og lagrede blokkprøven. Knekken i kurven ved prekonsolideringsspenningen er svært tydelig for blokkprøven som ble testet rett etter opptak, mens overgangen mellom det normalkonsoliderte og overkonsoliderte området ikke er fullt så tydelig for blokkprøven som har vært lagret. Prekonsolideringsspenningen er høyere for prøven som har vært lagret.



Figur 40 CIU- test, blokkprøver og sylindrerprøver



Figur 41 CRS- forsøk, blokkprøver og sylindrerprøver på kvikkleire

Resultatene viser at lagring påvirker blokkprøvene, selv om resultatene er av bedre kvalitet enn forventet. Prøvestykkene som tatt fra den lagrede blokkprøven ble tatt fra kjernen, og på grunn av observasjonene ved åpningen og tilskjæringen av blokkprøven er det grunn til å tro at de ytre delene av blokkprøven hadde gitt resultater av dårligere kvalitet. Sensitiviteten for den lagrede blokkprøven har blitt lavere, noe som svært uheldig dersom dimensjoneringen baserer seg på resultater fra lagrede blokkprøver. Selv om blokkprøven har blitt lagret, gir den fortsatt betydelig bedre resultater enn sylindrerprøvene som er testet rett etter opptak. Disse prøvene er tatt fra meget sensitiv kvikkleire, og forskjellen er dermed ekstra stor.

Dette illustrerer hvor ulike kvaliteten for prøver tatt med 54mm prøvetaker og blokkprøver kan være, og viser at nytteverdien av resultater fra 54mm-prøvesylinder kan være liten. Samtidig viser det viktigheten ved å utføre prøvetakingen så skånsomt som mulig, slik at unødvendige forstyrrelser unngås.





## 9 KONKLUSJON

De innledende studiene viser at de fleste veiledninger og artikler ofte beskriver både rotasjon og trekk som mulige metoder for å løsne prøvene fra underliggende masser før opptak. Det er funnet en studie som anbefaler at rotasjon ikke benyttes. Det er ikke funnet litteratur som går studerer grundig hvordan prøven påvirkes av opptrekkfasen ved sylindertesting. Det er viktig å redusere prøveforstyrrelser ved sylindertesting, da det er denne metoden som i hovedsak blir benyttet for opptak av uforstyrrede prøver. Studier viser at for god prøve kvalitet burde diameteren på prøvetakeren være over 75mm, for å unngå store forstyrrelser fra blant annet prøveutskjæringen. Når man i Norge i hovedsak benytter 54mm prøvesylinder, er det derfor ekstra viktig at unødvendig forstyrrelser blir unngått.

Det er ikke påvist entydige forskjeller mellom prøveresultatene for prøver tatt med bruk av rotasjon før opptak og prøver tatt med bruk av trekk før opptak. Noen tendenser er i midlertid observert. Siden det er andre faktorer som kan ha innvirkning på prøve kvaliteten i tillegg til valg av metode for opptak, er disse også tatt med i vurderingen.

Utført laboratoriearbeid på sylindertesting tatt opp med 54mm sylindertester av stål viser følgende:

- Dersom leiren er av meget sensitiv karakter og har lav omrørt skjærstyrke, bør ikke rotasjon benyttes for å løsne prøven før opptak ved sylindertesting.
- Prøvestykkenes kvalitet er varierende gjennom prøvesylindrens lengde, til tross for at det er unngått å teste prøvestykker fra de antatt mest forstyrrede delene i hver ende av sylindren.
- Det er tydeligere forskjeller mellom prøvestykkene ved sammenligning av CIU-tester enn ved sammenligning av CRS- tester. Det er lettere å undersøke prøveforstyrrelser som er påført fram til laboratoriearbeidet for CIU-tester enn CRS-tester.
- Prøvestykkene fra midten av prøvesylindren gir de klart beste resultatene for treksialforsøk, spesielt for prøvene tatt med rotasjon. Midtstykkene fra sylindrene som er tatt med rotasjon gir de beste resultatene av alle prøvestykkene som er testet.
- Prøvestykkene fra topp av sylindren utpeker seg som de dårligste av prøvestykkene som er testet. Årsaken til dette kan være inhomogenitet i jorden, forstyrrelser fra tidligere boring og nedpressing av stempel, lagringstid, eller en kombinasjon av disse faktorene.
- Det er ikke påvist tydelig forskjell mellom prøvestykkene tatt fra bunn av prøvesylindren for de to metodene ved CIU-testing, der det var forventet at rotasjon skulle ha negativ påvirkning på prøveresultatene.

- Det er mer variasjon i resultatene innad i prøvesylindrene for prøvene som er tatt med rotasjon enn for prøvene som er tatt med trekk. En mulig årsak til dette kan være at bruk av trekk fører til at prøven blir forstyrret i lik grad gjennom hele prøvesylinderens lengde. Ved bruk av rotasjon vil deler av prøvesylindren være mindre berørt av prosessen med å løsne prøven i bunn.
- Selv kort lagringstid kan påvirke sylinterprøver negativt. Sylinterprøver bør derfor testes så kort tid som mulig etter opptak. Lagringshistorien til en prøve bør være en del av prøveresultatene, slik at nytteverdien av resultatene ved dimensjonering lettere kan bedømmes.
- Faktorer som tid og plassering i prøvesylindren har sannsynligvis hatt større innvirkning på prøveresultatene enn betydningen av valgt metode for løsning av prøven fra underliggende masser.
- Blokkprøver gir tydelig bedre resultater enn sylinterprøver. Blokkprøver av kvikkleire kan bli mindre sensitive ved lagring i tillegg til at styrke- og stivhetsegenskapene endres. Blokkprøver av kvikkleire som er lagret i lang tid viser fortsatt betraktelig bedre resultater enn sylinterprøver som er tester rett etter opptak.

## 10 VIDEREFØRING AV OPPGAVEN

Metode for å løse prøven før opptrekket ved sylinderprøvetaking bør studeres nærmere for å få en bedre forståelse av hvordan dette påvirker prøven. På samme måte som virkningen av penetrasjon og geometri tidligere er vurdert med analytiske metoder og elementmetoden, burde også siste del av prøvetakingen etter utskjæringen og før opptak modelleres. Dersom det blir funnet klart at enten rotasjon eller trekk er det beste for prøven, burde metoden bli standard metode for opptak av leire (med unntak av svært sensitive masser).

Dersom problemet skal undersøkes ytterligere i laboratoriet er det ønskelig å ha et stort antall prøver, slik at det er mulig å danne et statistisk grunnlag. Videre bør alle opptakene skje av samme borleder, og samme utstyr bør benyttes hver gang. Lagringstiden må kontrolleres, og det mest ønskelige ville vært om alle prøvene ble testet samme dag som opptak. Prøvetakingen bør foretas i et område og dybder det leiren er så homogen som mulig. Ved å tenke over alle fasene ved feltarbeidet, vil prøveforstyrrelsene som skyldes andre faktorer enn metode for løsning av prøven i bunn minimeres. Det blir da enklere å knytte ulik kvalitet av prøvesylindrene til metode benyttet.

Det er kjent at lagring er ødeleggende for en prøve, og lagring kan i mange tilfeller gjøre nytteverdien av laboratorieresultater svært lav. I hvilken grad lagringstiden påvirker prøven, og hvor lang tid prøven maksimalt kan lagres for at den skal gi tilfredsstillende resultater kan undersøkes. Dette vil være noe avhengig av egenskapene til jorda og forhold under lagringen. Et godt system som viser detaljene om lagringstiden for en prøve bør lages, slik at informasjon om lagringstid er tydelig og kan legges ved prøveresultatene, slik at den som skal benytte resultatene bedre kan vurdere nytteverdien.

Det kunne videre vært interessant å studere nærmere hva som skjer med prøven ved utskyvning, og spesielt etter lagring. Dette kunne gjøres ved å sette på en lastcelle på utskyvbenken, slik at kraften påsatt prøven kan følges. Deretter kan dette studeres videre med analyser, og utskyvningens påvirkning på prøven kan fastsettes. Forsøkene kan gjøres for prøver med ulik lagringstid, og en eventuell sammenheng for lagringstid og påførte forstyrrelser kan bestemmes.

---

## 11 REFERANSER

Andresen and Kolstad (1980). "The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials." NGI Publication **130**.

Baligh, M. M. (1985). "Strain path method." J.Geotech. Eng **111**(9).

Baligh, M. M., A. S. Azzouz, et al. (1987). "Disturbances due to "ideal" tube sampling." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE **113**: 739-757.

Bjerrum, L. (1973). Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clay. State -of-the-Art report ti Session IV, 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow.

Budhu, M. and C. S. Wu (1992). "Numerical analysis of sampling disturbance in clay soils." International journal for numerical and analytical methods in geomechanics.

Clayton, C. R. I., A. Siddique, et al. (1998). "Effects of sampler design on tube sampling disturbance- numerical and analytical investigations." Geotechnique **48**(6): 847-867.

D.W.Hight (2001). "Sampling Effects in Soft Clay: An Update on Ladd and Lambe (1963)." ASCE.

DeGroot, D. J., S. E. Poirier, et al. (2005). "Sample disturbance- soft clays." Studia Geotechnica et Mechanica **XXVII**.

Emdal, Grande, et al. Geoeknikk Beregningsmetoder, kompendium for bruk i emne TB 4105.

Gjengedal, I. A. and I. R. Holsdal (2011). Prøvetaking med sylindrerprøvetaker. Forskjellige metoders effekt på prøve kvalitet. NTNU, BAT.

Gylland, A. (2011). Arbeid i forbindelse med upublisert PhD, NTNU.

Hvorslev, M. J. (1949). Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes, ASCE.

Ladd, C. C. and D. J. DeGroot (2003). Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization. 12th Panamerican Conferende on Soil Mechnics and Geotechnical Engineering, Massachuttes Institute of Technology.

Ladd, C. C. and T. W. Lambe (1963). "The strength of undisturbed clay determined from undrained tests." Symp. on Laboratory Shear Tesing of Soils, ASTM **361**: 342-371.

Larsen, P. K. (2012). Dimensjonering av stålkonstruksjoner, Tapir Akademiske Forlag.

Lefebvre, G. and C. Poulin (1979). "A new method of sampling in sensitive clay." Can. Geotech.J **16**: 226-233.

Long, M., N. E. Hadj, et al. (2009). "Quality of conventional fixed piston samplers of Norwegian soft clay." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE **135**(2): 185-198.

Lunne, Berre, et al. (2006). "Effects of sample disturbance and consolidation procedures on merasured shear strength of soft marine Norwegian clys." Can. Geotech.J: 726-750.

Lunne, T., T. Berre, et al. (1997). Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. Recent Developments in Soil and Pacement Mechanics, Balkema, Rotterdam.

NGF (1997). Melding 11- Veilednig for prøvetaking, NGFs feltkomite.

NS-EN-1997-2:2007 (2008). NS-EN 1997-2:2007 Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering Del 2: Regler basert på grunnundersøkelser og laboratorieprøver, Standard Norge.

Vegdirektoratet (1997). Feltundersøkelser. Håndbok 015, Vegdirektoratet.

Vegdirektoratet (2010). Geoteknikk i vegbygging. Håndbok 016.

Vegdirektoratet (2010). Geoteknisk felthåndbok. Håndbok 280, Vegdirektoratet.

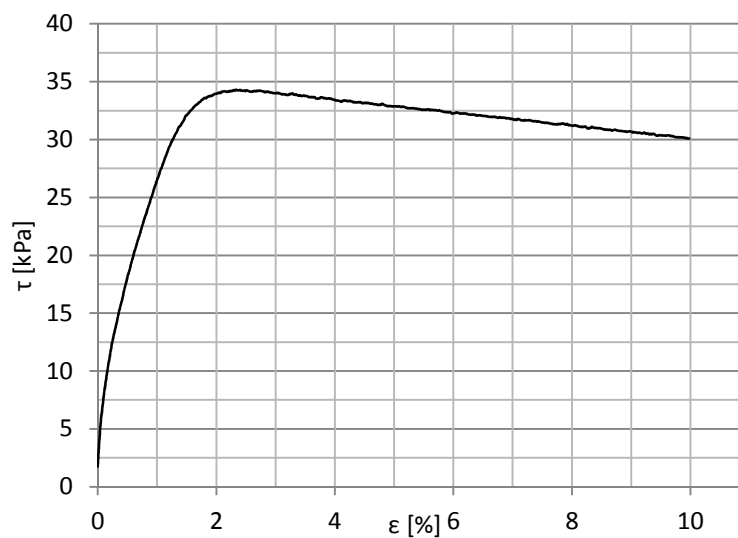
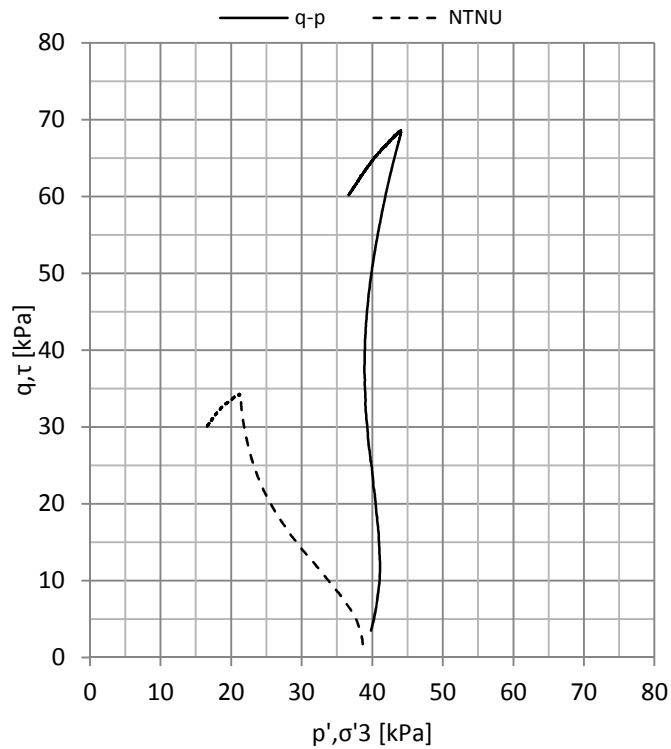
Wu, C.-S. (1991). Mechanics of sampling disturbance in clay soils. Department of civil engineering and engineering mechanics, The University of Arizona. **Ph.D.**

## **BILAG A – TREAKSIALFORSØK**

Bilag A 1: H\_R1\_5,35  
Bilag A 2: H\_R1\_5,25  
Bilag A 3: H\_T1\_5,60  
Bilag A 4: H\_T1\_5,45  
Bilag A 5: H\_T1\_5,30  
Bilag A 6: H\_T1\_6,55  
Bilag A 7: H\_T1\_6,45  
Bilag A 8: H\_T1\_6,35  
Bilag A 9: H\_T2\_9,50  
Bilag A 10: H\_T2\_9,30  
Bilag A 11: H\_T2\_9,20  
Bilag A 12: V\_R1\_5,55  
Bilag A 13: V\_R1\_5,35  
Bilag A 14: V\_R1\_5,25  
Bilag A 15: V\_R1\_6,50  
Bilag A 16: V\_R1\_6,37  
Bilag A 17: V\_R1\_6,20  
Bilag A 18: V\_R2\_5,55  
Bilag A 19: V\_R2\_5,40  
Bilag A 20: V\_R2\_5,27  
Bilag A 21: V\_R2\_6,53  
Bilag A 22: V\_R2\_6,37  
Bilag A 23: V\_R2\_6,23  
Bilag A 24: V\_T1\_5,53  
Bilag A 25: V\_T1\_5,38  
Bilag A 26: V\_T1\_5,24  
Bilag A 27: V\_T1\_6,56  
Bilag A 28: V\_T1\_6,36  
Bilag A 29: V\_T1\_6,24  
Bilag A 30: V\_T2\_5,50  
Bilag A 31: V\_T2\_5,34  
Bilag A 32: V\_T2\_5,20  
Bilag A 33: V\_T2\_6,51  
Bilag A 34: V\_T2\_6,35  
Bilag A 35: V\_T2\_6,22  
Bilag A 36: Blokk\_9,25







### Prøveforstyrrelser - Treaxialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_R1\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: H\_R1\_5,35

Dybde: 5,35m

Celletrykk: 38,7 kPa

su: 34,3 kPa

ε,brudd: 2,3 %

a: 16 kPa

φ: 28,4 °

D: 0,13

w: 34,3%

ε,vol: 1,1 %

Δe/e0: 0,022

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

07.11.2011

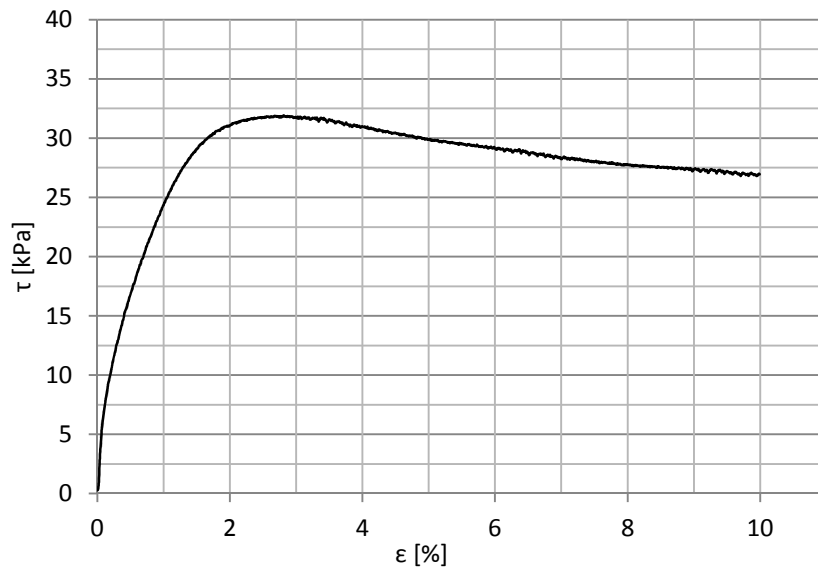
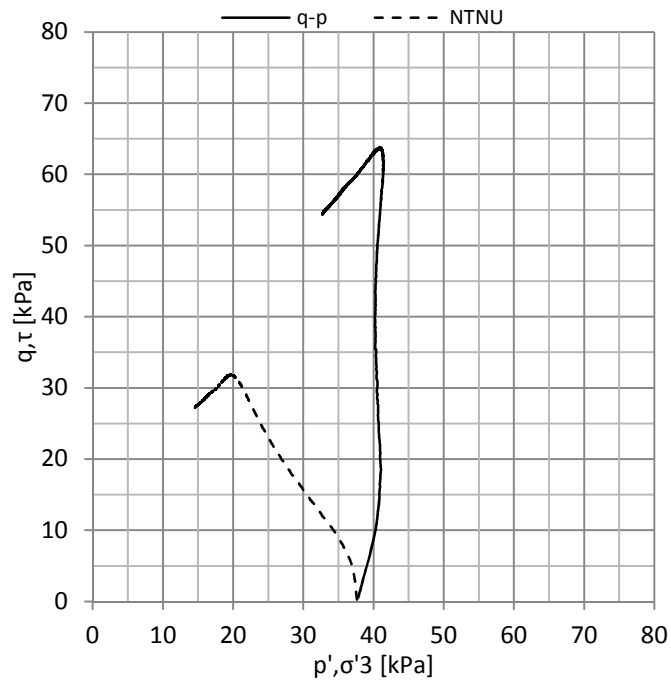
Dato prøveåpning:

07.11.2011

Dato forsøkskjøring:

08.11.2011

Bilag: A 1



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_R1\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: H\_R1\_5,25

Dybde: 5,25m

Celletrykk: 37,6 kPa

su: 32 kPa

ε,brudd: 2,8 %

a: 15 kPa

φ: 28,5 °

D: 0,03

w: 35 %

ε,vol: 1,1%

Δe/e0: 0,022

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

07.11.2011

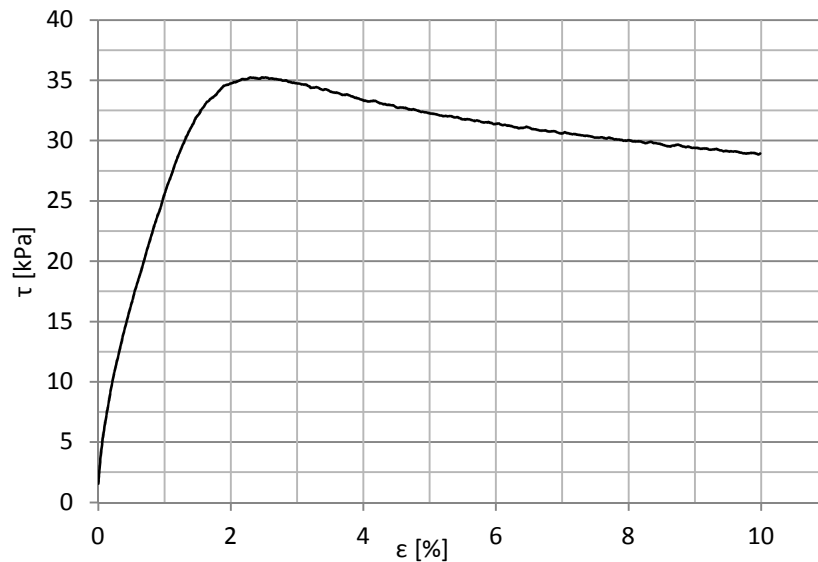
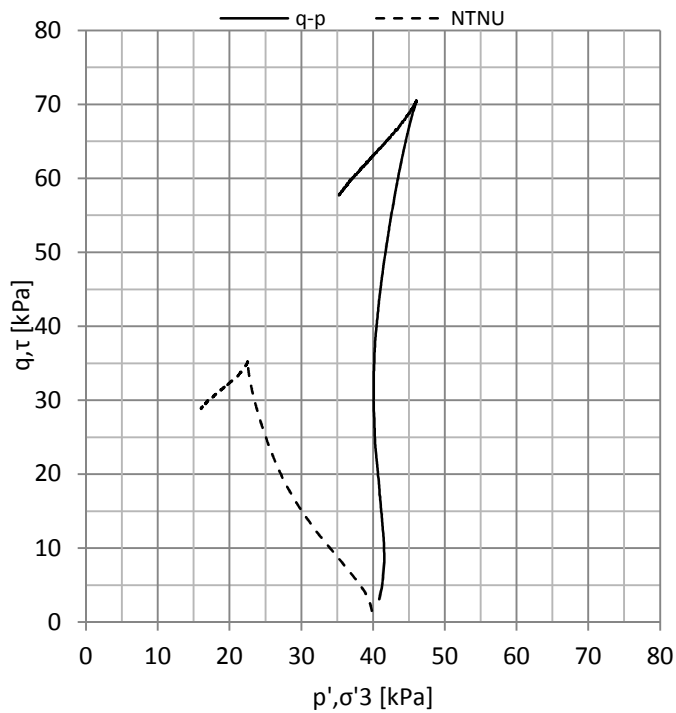
Dato prøveåpning:

07.11.2011

Dato forsøkskjøring:

08.11.2011

Bilag: A 2



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T1\_5m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T1\_5,60

Dybde: 5,60 m

Celletrykk: 40 kPa

su: 35,2 kPa

ε,brudd: 2,3 %

a: 13 kPa

φ: 30 °

D: 0,15

w: 33,8 %

ε,vol: 0,9 %

Δe/e0: 0,019

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

21.11.2011

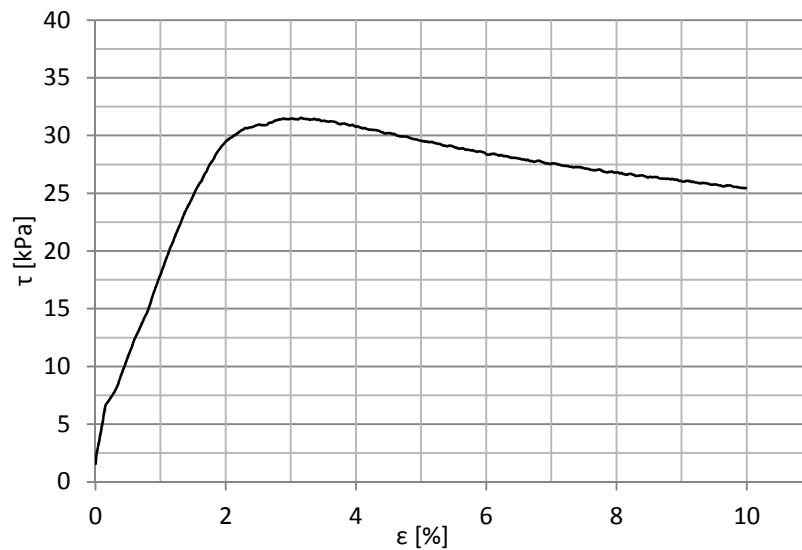
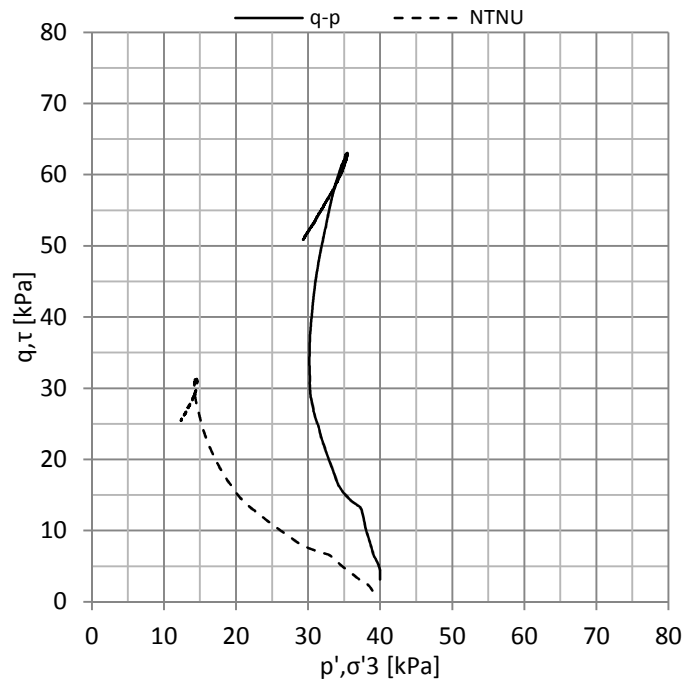
Dato prøveåpning:

21.11.2011

Dato forsøkskjøring:

21.11.2011

Bilag: A 3



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T1\_5m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T1\_5,45

Dybde: 5,45m

Celletrykk: 39,3 kPa

su: 31,5 kPa

ε,brudd: 3,1 %

a: kPa

φ: °

D: 0,2

w: 36 %

ε,vol: 4 %

Δe/e0: 0,082

Prøvekvalitet: Dårlig

Dato prøvetaking:

21.11.2011

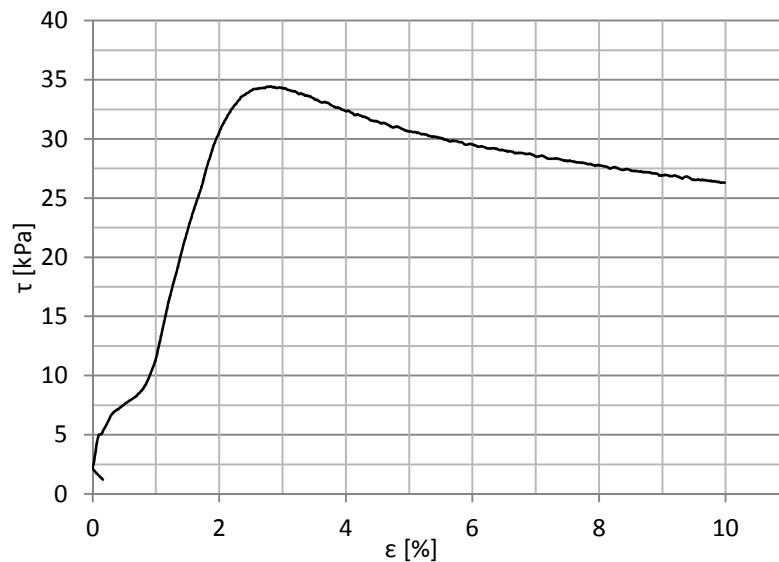
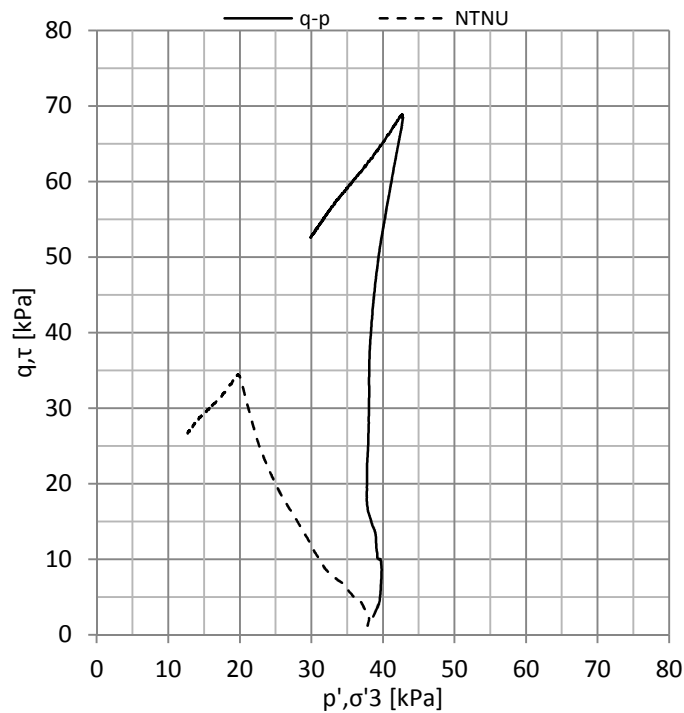
Dato prøveåpning:

21.11.2011

Dato forsøkskjøring:

22.11.2011

Bilag: A 4



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T1\_5m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T1\_5,30

Dybde: 5,30 m

Celletrykk: 38,2 kPa

su: 34,5 kPa

ε,brudd: 2,4 %

a: 10 kPa

φ: 32°

D: 0,13

w: 33%

ε,vol: 1,2%

Δe/e0: 0,027

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

21.11.2011

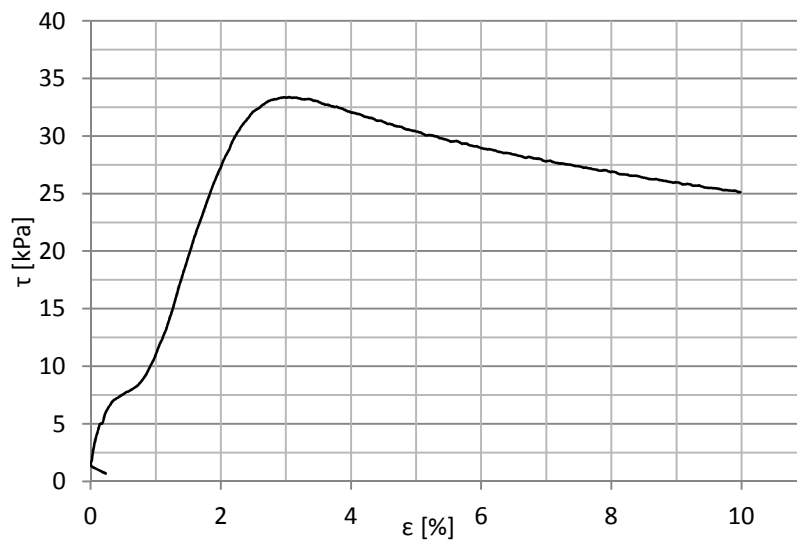
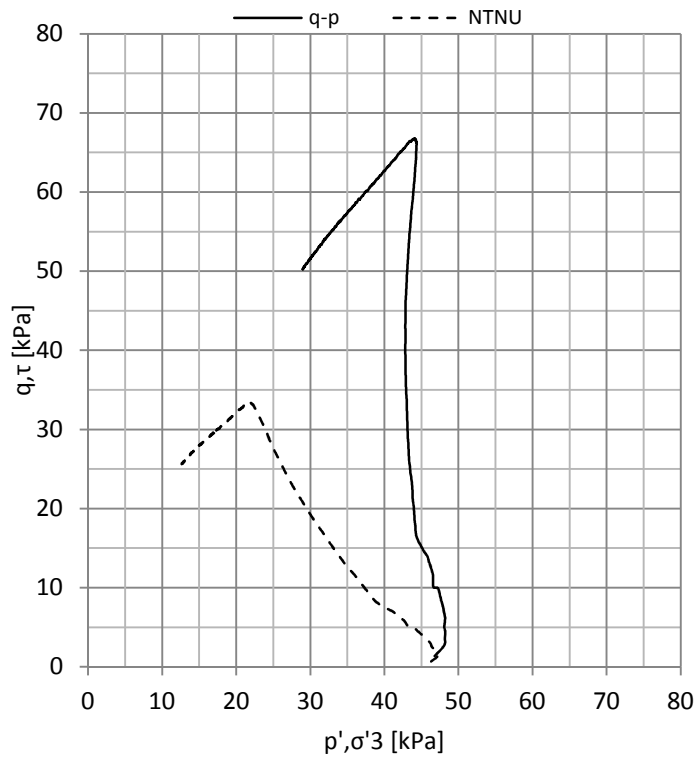
Dato prøveåpning:

21.11.2011

Dato forsøkskjøring:

22.11.2011

Bilag: A 5



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T1\_6m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T1\_6,55

Dybde: 6,55m

Celletrykk: 47,4 kPa

su: 33,3 kPa

ε,brudd: 2,6 %

a: 13kPa

φ: 30 °

D: 0,06

w: 38,3 %

ε,vol: 1,8 %

Δe/e0: 0,035

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

21.11.2011

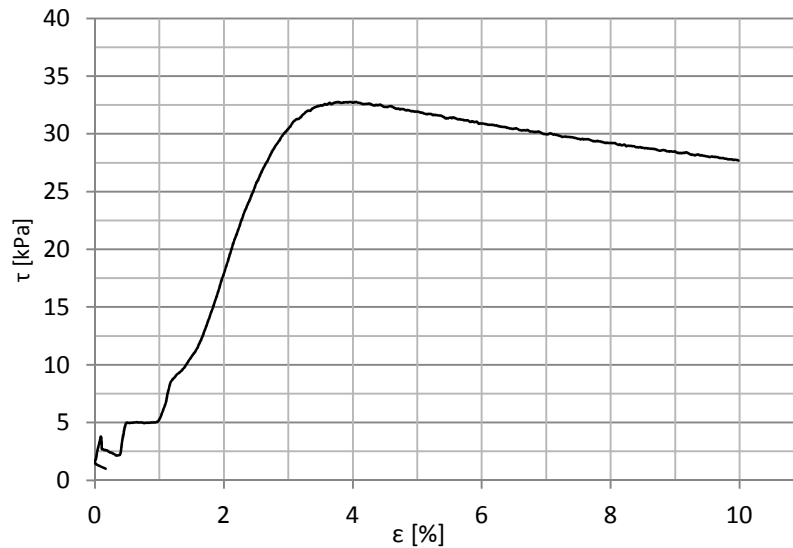
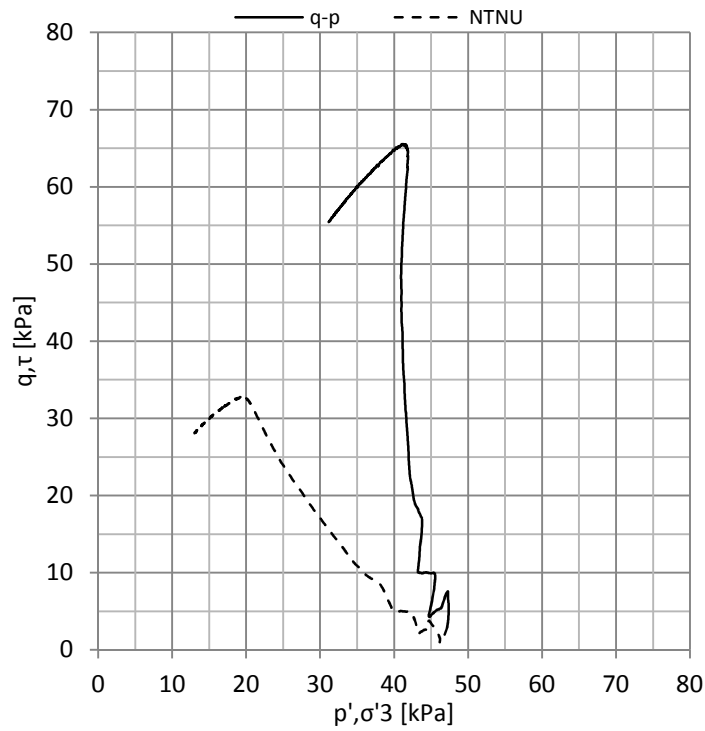
Dato prøveåpning:

23.11.2011

Dato forsøkskjøring:

23.11.2011

Bilag: A 6



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T1\_6m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T1\_6,45

Dybde: 6,45m

Celletrykk: 46,3kPa

su: 32,8 kPa

ε,brudd: 3,0 %

a: 12 kPa

φ: 30 °

D: 0,06

w: 33,4 %

ε,vol: 1,9 %

Δe/e0: 0,039

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

21.11.2011

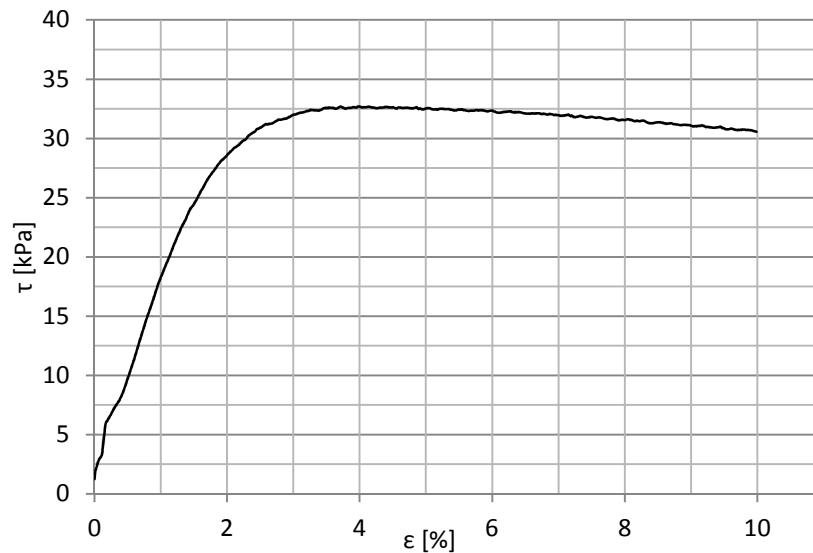
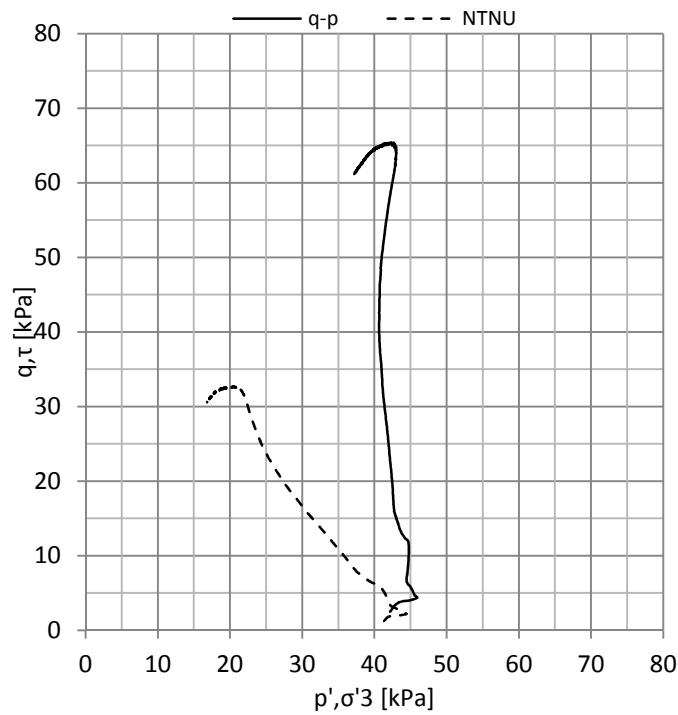
Dato prøveåpning:

23.11.2011

Dato forsøkskjøring:

23.11.2011

Bilag: A 7



### Prøveforstyrrelser - Treaxsialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T1\_6m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T1\_6,35

Dybde: 6,35 m

Celletrykk: 41,2 kPa

su: 32,7 kPa

ε,brudd: 4,4%

a: 10 kPa

φ: 31 °

D: 0,08

w: 33,4 %

ε,vol: 1,6 %

Δe/e0: 0,033

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

21.22.2011

Dato prøveåpning:

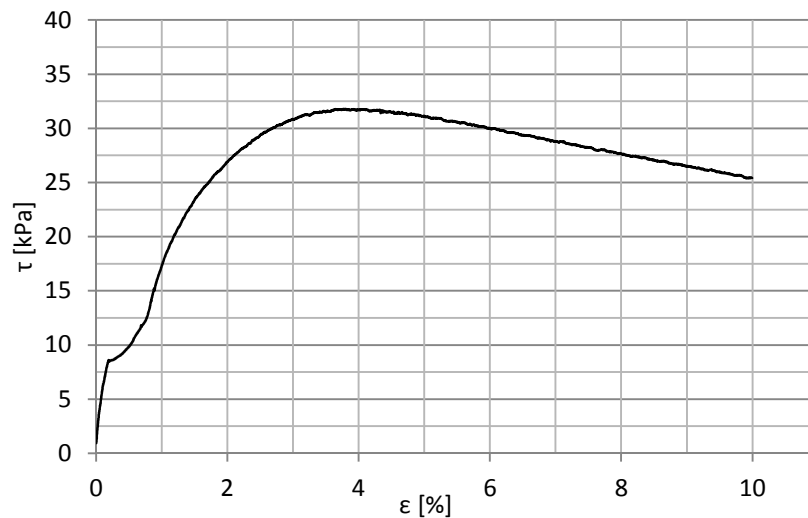
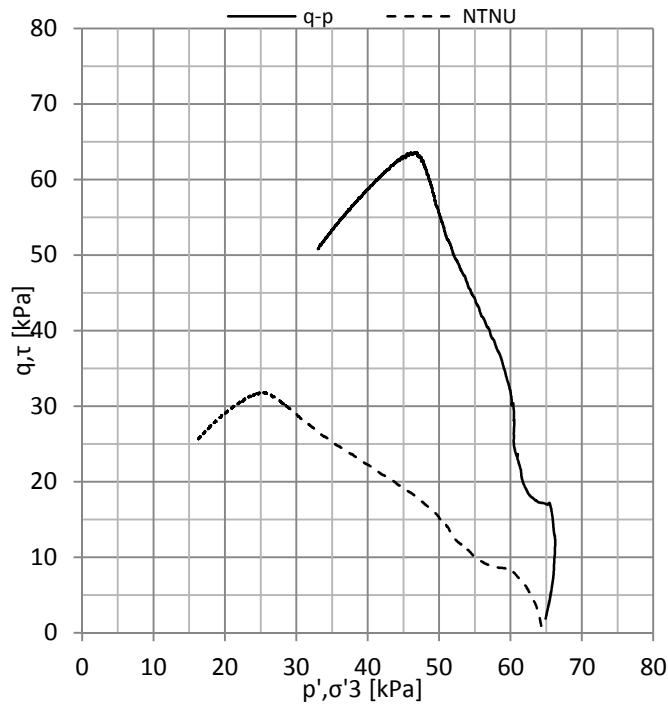
23.11.2011

Dato forsøkskjøring:

24.11.2011

Bilag: A 8





### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T2\_9m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T2\_9,50

Dybde: 9,50 m

Celletrykk: 64,3kPa

su: 31,8 kPa

ε,brudd: 3,7 %

a: 10 kPa

φ: 29 °

D: -0,42

w: 35,9 %

ε,vol: 1,9 %

Δe/e0: 0,038

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

15.11.2011

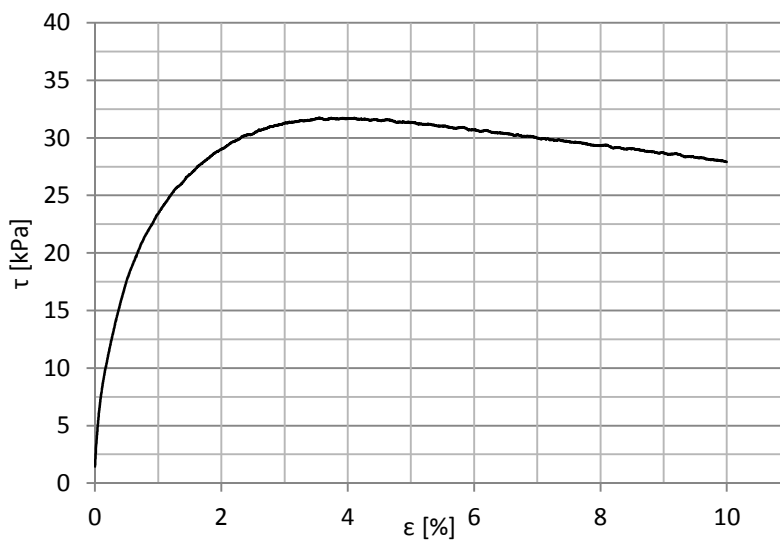
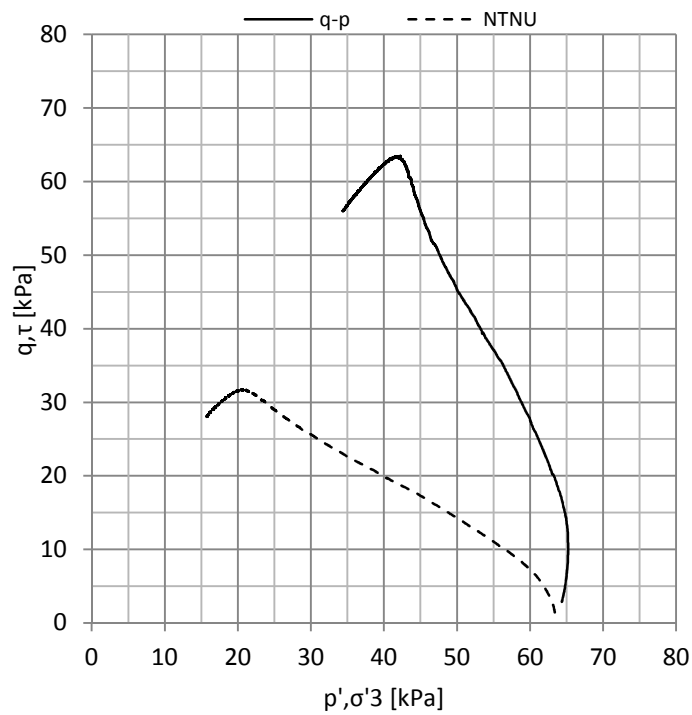
Dato prøveåpning:

15.11.2011

Dato forsøkskjøring:

16.11.2011

Bilag: A 9



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T2\_9m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T2\_9,30

Dybde: 9,30 m

Celletrykk: 63,4 kPa

su: 31,7kPa

ε,brudd: 3,6 %

a: 15kPa

φ: 28 °

D: -0,55

w: 38,4 %

ε,vol: 3,1 %

Δe/e0: 0,061

Prøvekvalitet: Dårlig

Dato prøvetaking:

15.11.2011

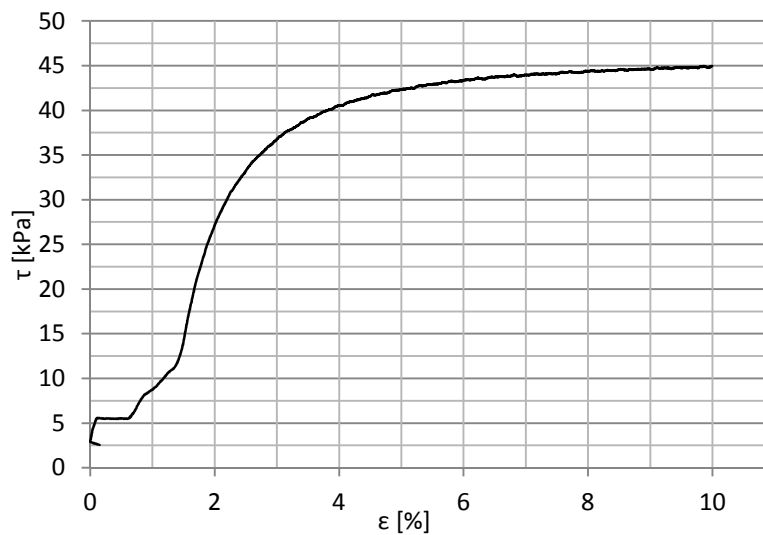
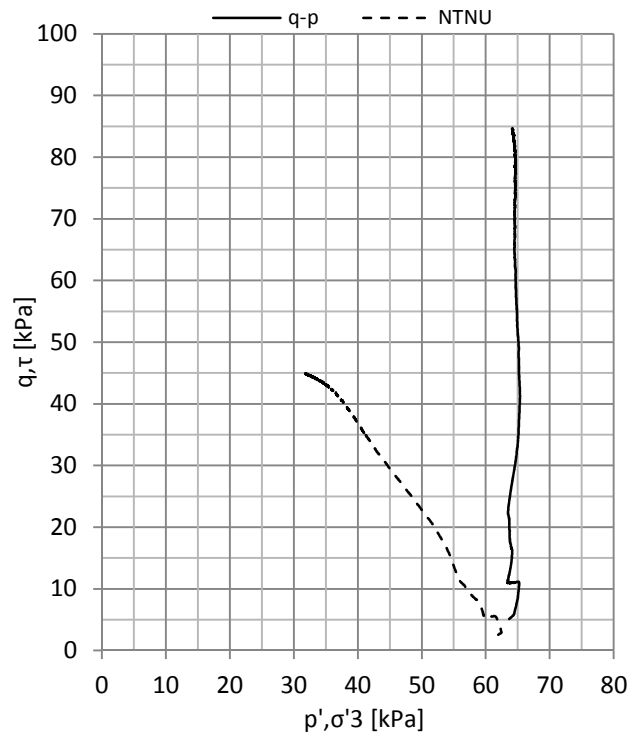
Dato prøveåpning:

15.11.2011

Dato forsøkskjøring:

15.11.2011

Bilag: A 10



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: H\_T2\_9m

Metode: Trekk

Prøve: H\_T2\_9,20

Dybde: 9,20 m

Celletrykk: 62,5kPa

su: - kPa

$\epsilon$ ,brudd: %

a: kPa

$\phi$ : °

D:

w: 30 %

$\epsilon$ ,vol: 0,8 %

$\Delta e/e0$ : 0,017

Prøvekvalitet: Meget bra\*

Dato prøvetaking:

15.11.2011

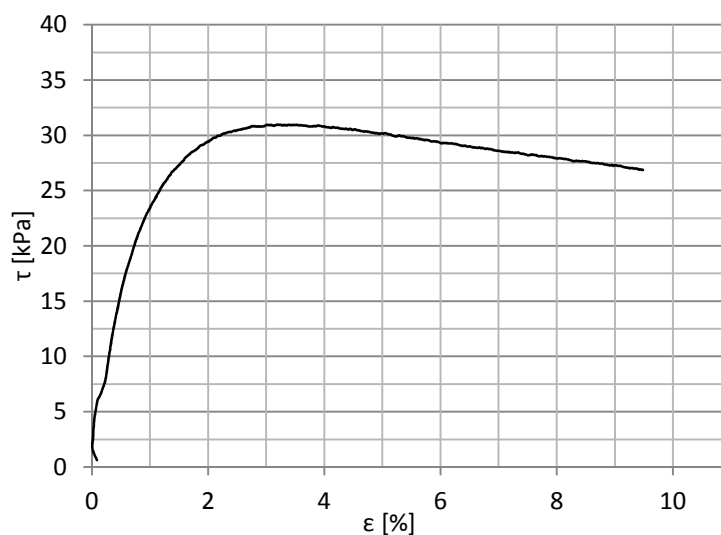
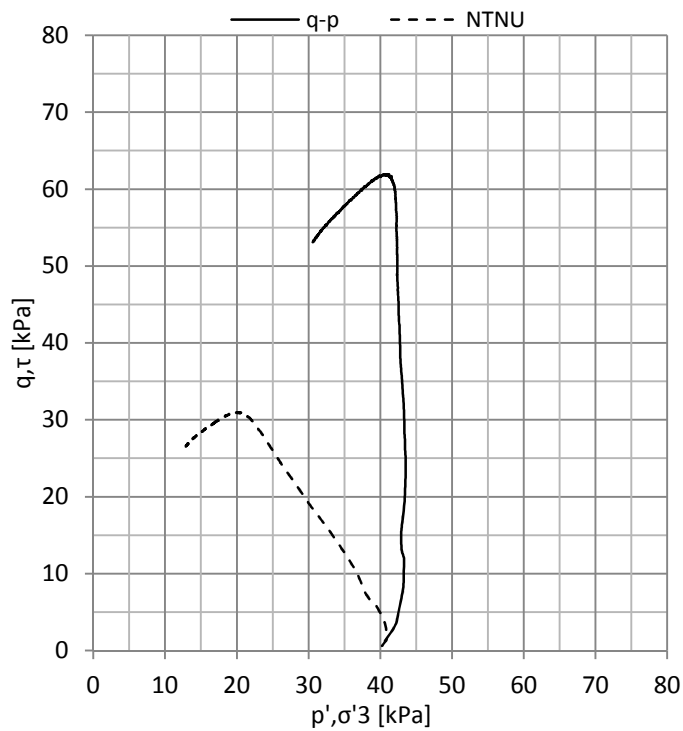
Dato prøveåpning:

15.11.2011

Dato forsøkskjøring:

15.11.2011

Bilag: A 11



### Prøveforstyrrelser - Treaxialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R1\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R1\_5m

Dybde: 5,55m

Celletrykk: 41,1 kPa

su: 31 kPa

ε,brudd: 3,2 %

a: 13 kPa

φ: 32,5 °

D: -0,05

w: 35 %

ε,vol: 1,4 %

Δe/e0: 0,029

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

02.05.2012

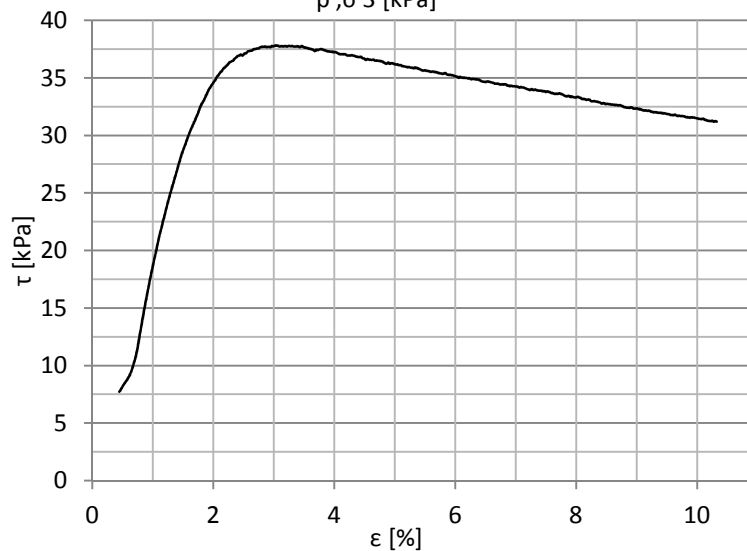
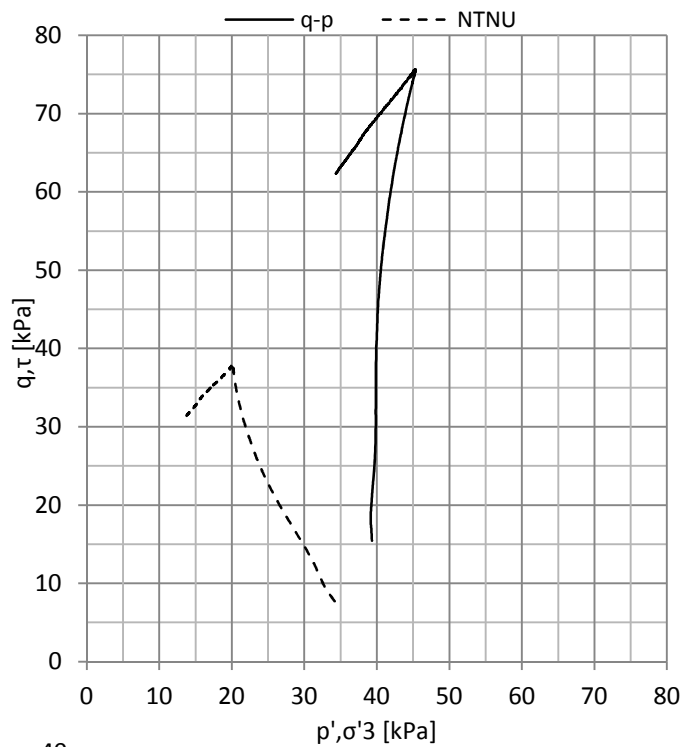
Dato prøveåpning:

02.05.2012

Dato forsøkskjøring:

02.05.2012

Bilag: A 12



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R1\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R1\_5,35

Dybde: 5,35m

Celletrykk: 39 kPa

su: 37,8 kPa

ε,brudd: 2,6 %

a: 15 kPa

φ: 30,5 °

D: 0,14

w: 30,9 %

ε,vol: 1,3 %

Δe/e0: 0,029

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

02.05.2012

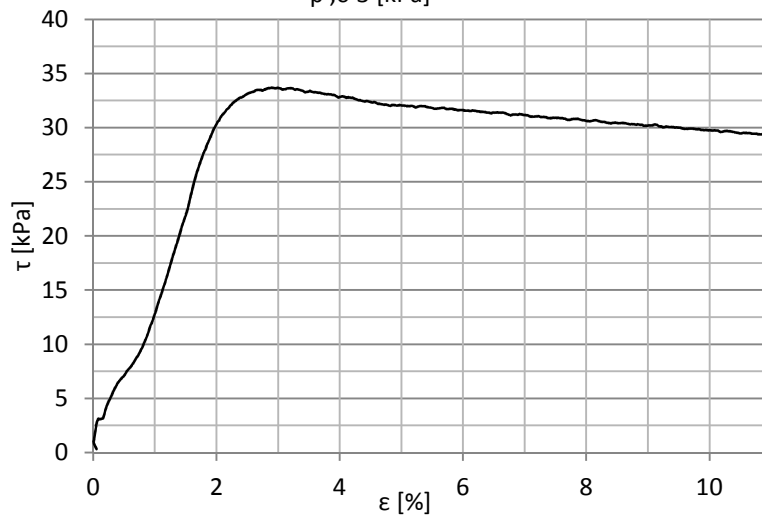
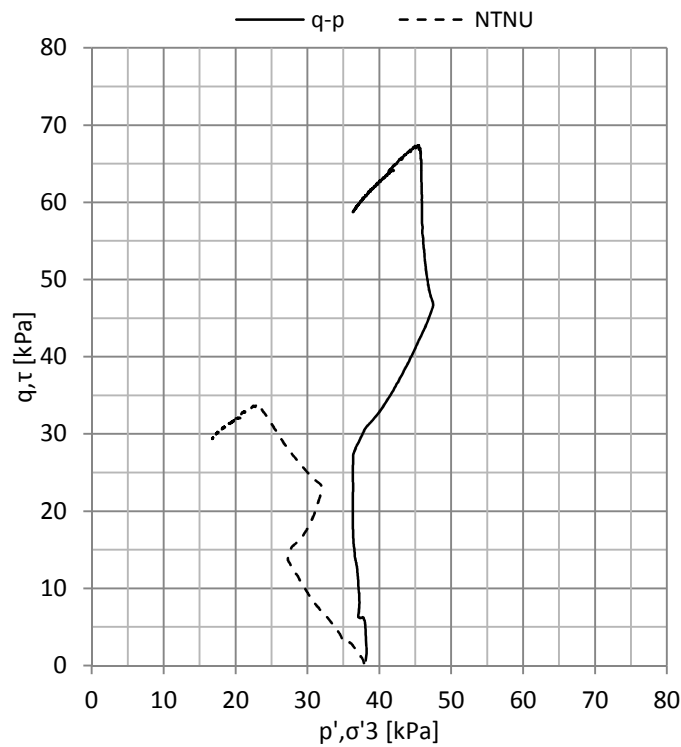
Dato prøveåpning:

02.05.2012

Dato forsøkskjøring:

03.05.2012

Bilag: A 13



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R1\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R1\_5,25

Dybde: 5,25m

Celletrykk: 38,1 kPa

su: 33,7 kPa

ε,brudd: 2,6 %

a: kPa

φ: °

D:

w: 36 %

ε,vol: 1,3%

Δe/e0: 0,027

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

02.05.2012

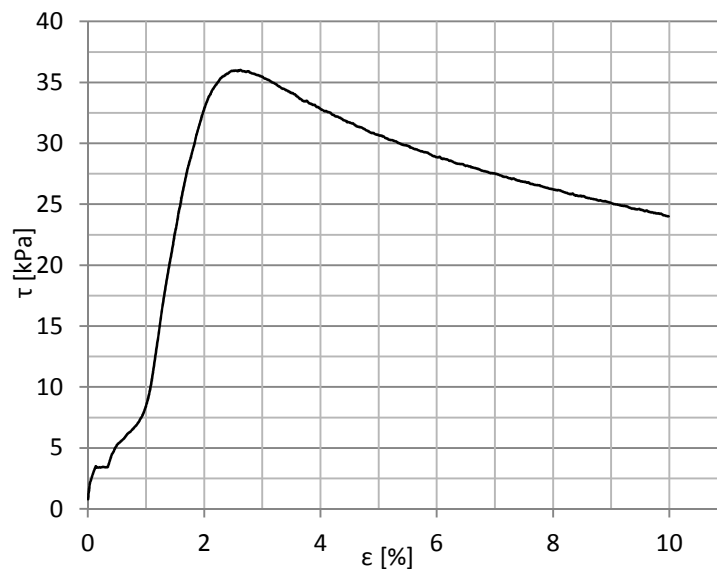
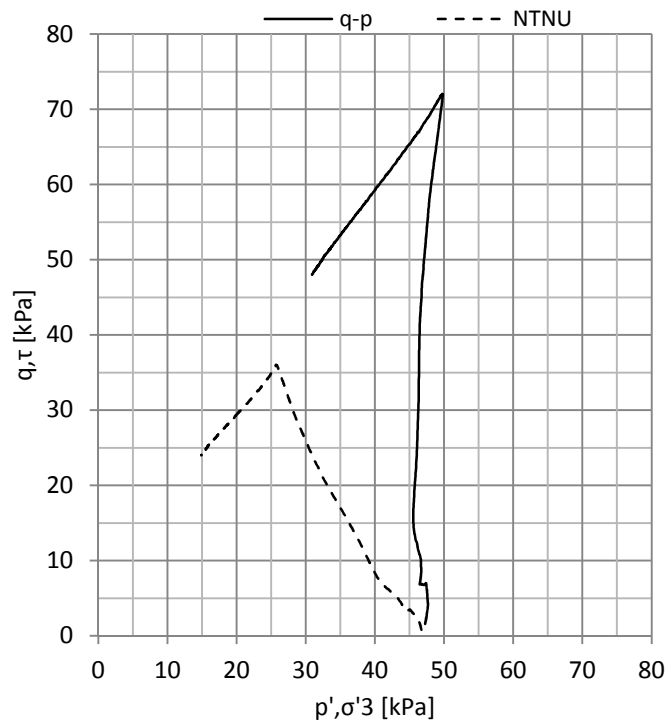
Dato prøveåpning:

02.05.2012

Dato forsøkskjøring:

04.05.2012

Bilag: A 14



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R1\_6m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R1\_6,50

Dybde: 6,50m

Celletrykk: 46,8 kPa

su: 36 kPa

$\epsilon$ ,brudd: 1,9 %

a: 8,4 kPa

$\phi$ : 31 °

D: 0,09

w: 37 %

$\epsilon$ ,vol: 1,6 %

$\Delta e/e_0$ : 0,033

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

05.05.2012

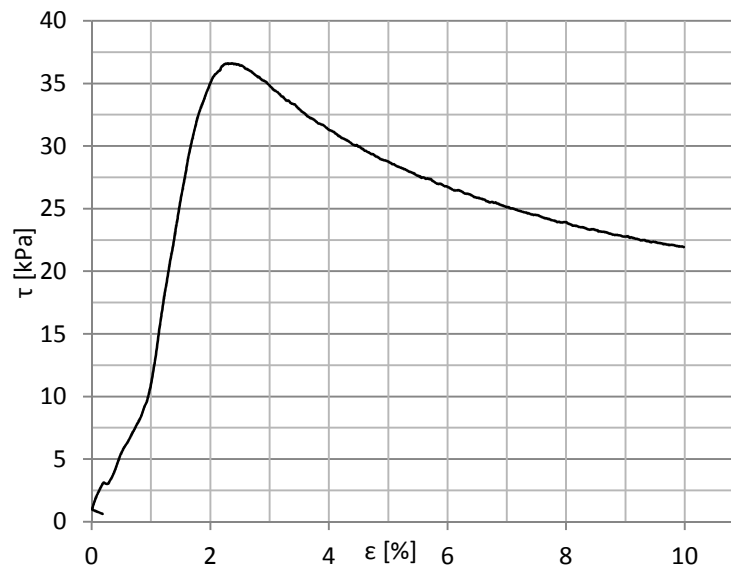
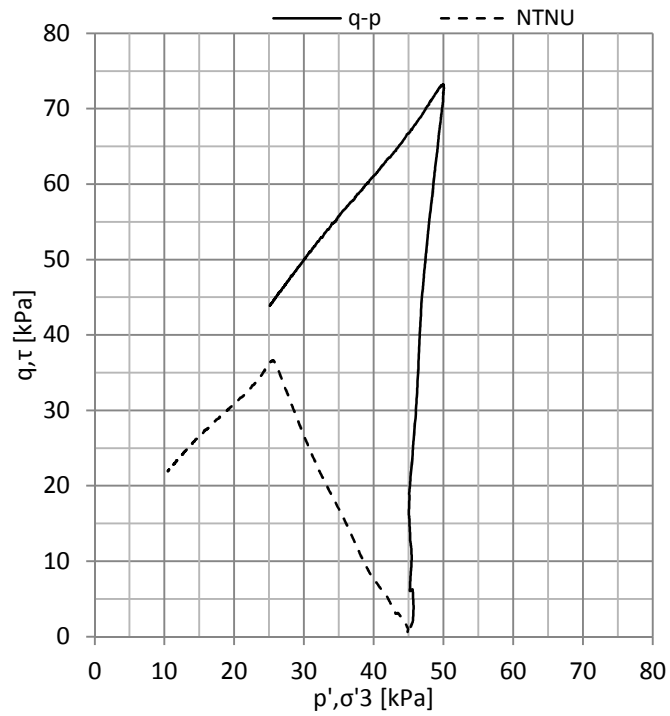
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

04.05.2012

Bilag: A 15



### Prøveforstyrrelser -treksial test R1\_6,37

**CIU**

Sylinder: V\_R1\_6m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R1\_6,37

Dybde: 6,37m

Celletrykk: 45 kPa

su: 36,6 kPa

ε,brudd: 1,7 %

a: 11 kPa

φ: 30 °

D: 0,07

w: 36,7%

ε,vol: 2,3 %

Δe/e0: 0,047

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

02.05.2012

Dato prøveåpning:

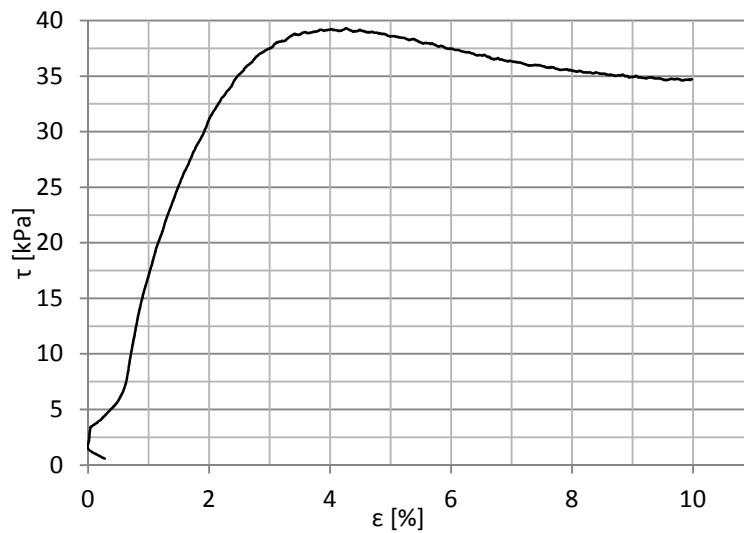
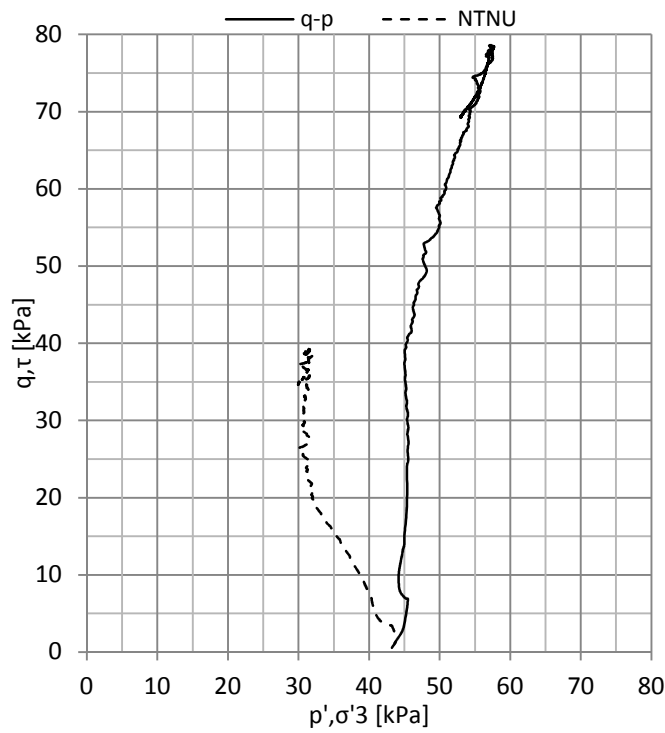
04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

05.05.2012

Bilag: A 16





### Prøveforstyrrelser - Treaxialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R1\_6m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R1\_6,20

Dybde: 6,20 m

Celletrykk: 43,9 kPa

su: 39,3 kPa

ε,brudd: 3,9 %

a:kPa

φ: °

D:

w: 34,7 %

ε,vol: 1,7 %

Δe/e0: 0,036

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

02.05.2012

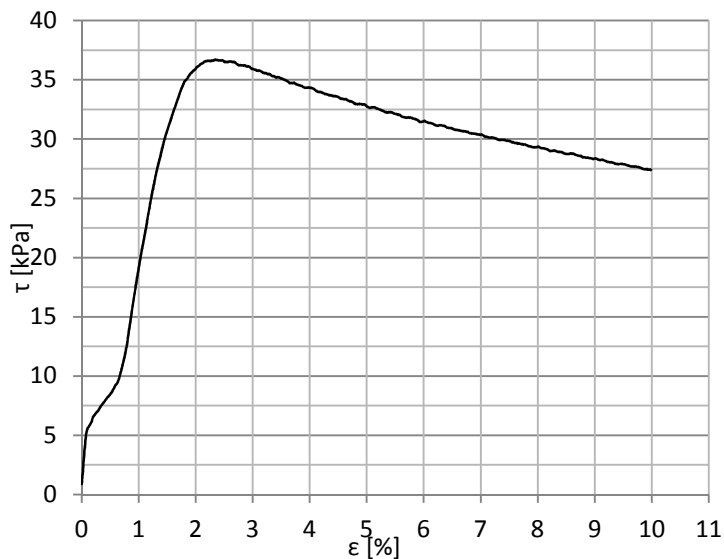
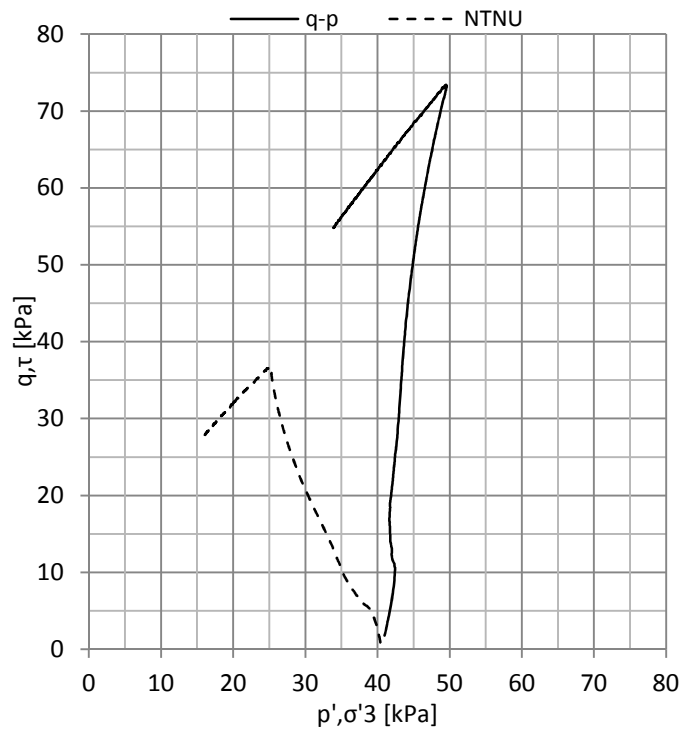
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

06.05.2012

Bilag: A 17



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R2\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R2\_5,55

Dybde: 5,55m

Celletrykk: 40,4 kPa

su: 36,7 kPa

$\epsilon$ ,brudd: 2 %

a: 10 kPa

$\phi$ : 30,8 °

D: 0,08

w:25\*

$\epsilon$ ,vol: 1,2 %

$\Delta e/e_0$ : 0,031

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

03.05.2012

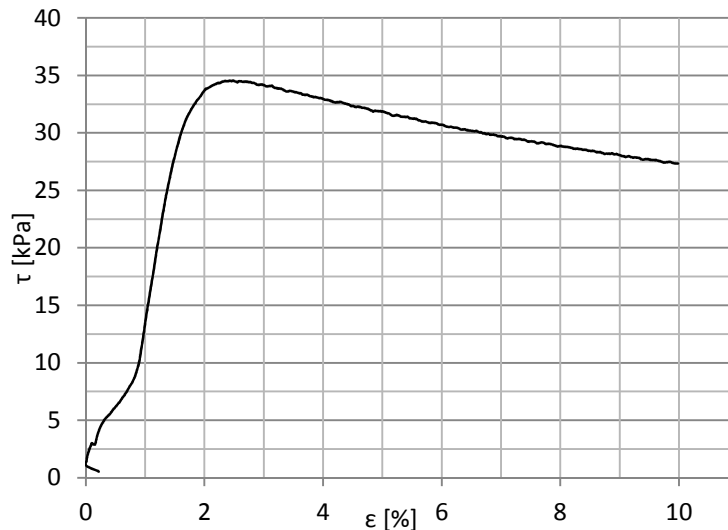
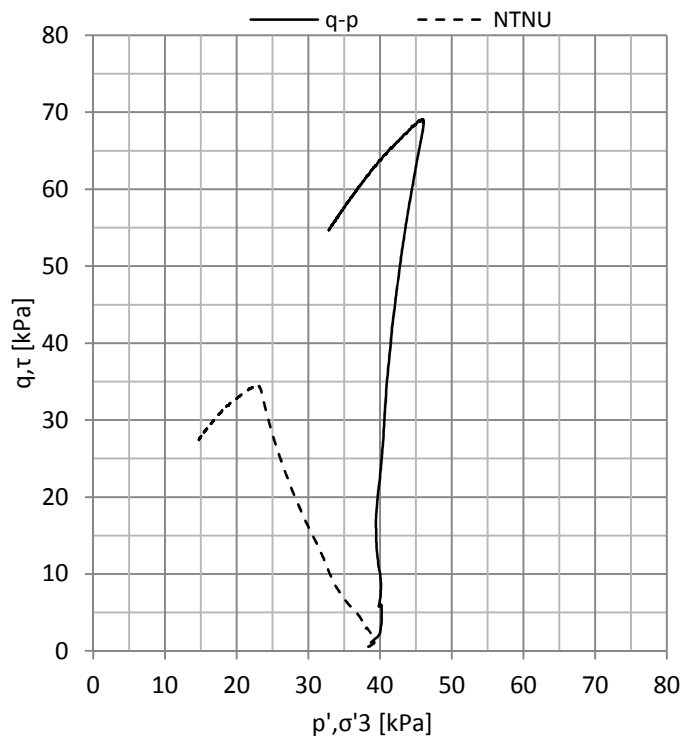
Dato prøveåpning:

03.05.2012

Dato forsøkskjøring:

03.05.2012

Bilag: A 18



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R2\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R2\_5,40

Dybde: 5,40m

Celletrykk: 39,2 kPa

su: 34,5 kPa

ε,brudd: 1,9 %

a: 10 kPa

φ: 33°

D: 0,11

w:37 %

ε,vol: 1,3 %

Δe/e0: 0,026

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

03.05.2012

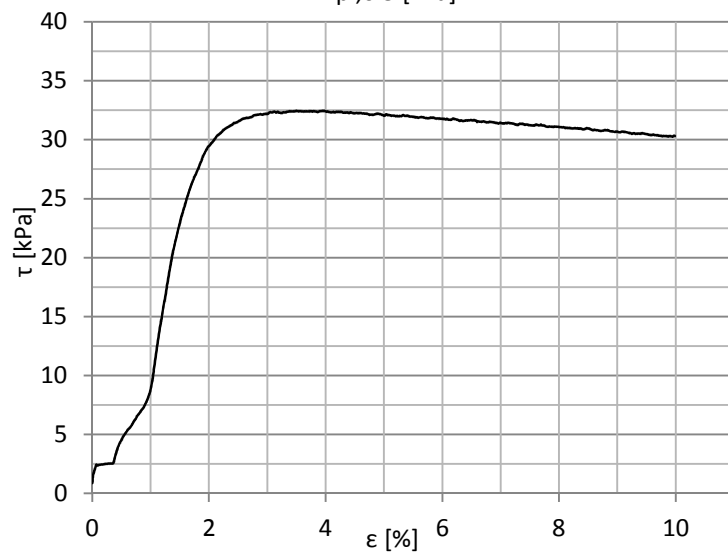
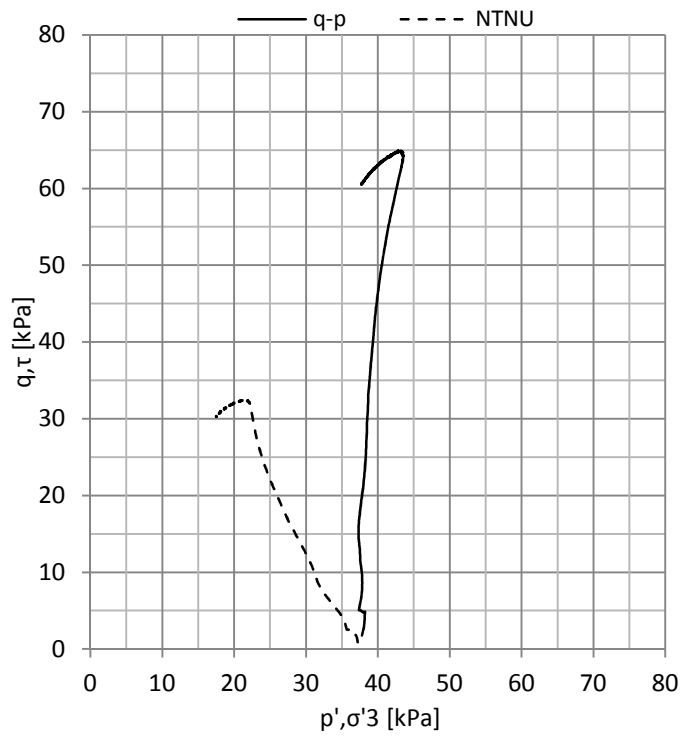
Dato prøveåpning:

03.05.2012

Dato forsøkskjøring:

03.05.2012

Bilag: A 19



### Prøveforstyrrelser - Treaxialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R2\_5m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R2\_5,27

Dybde: 5,27m

Celletrykk: 37,2 kPa

su: 32,5 kPa

ε,brudd: 3,3 %

a: 8 kPa

φ: 33°

D: 0,12

w: 28,8 %

ε,vol: 1,6 %

Δe/e0: 0,038

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

03.05.2012

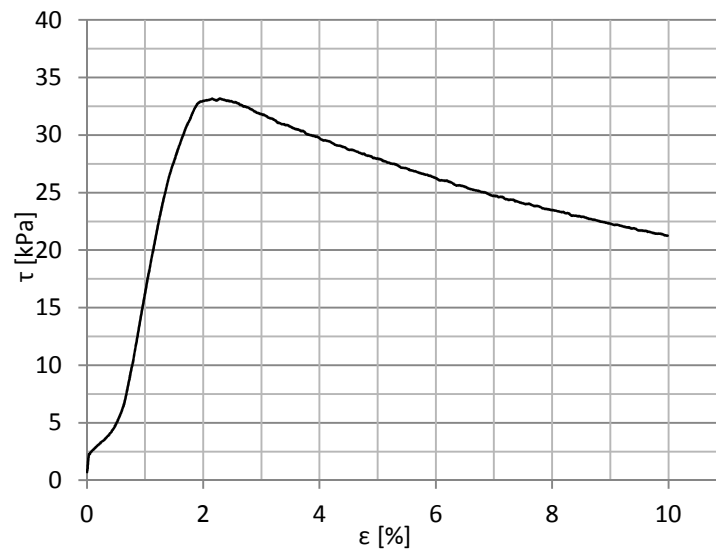
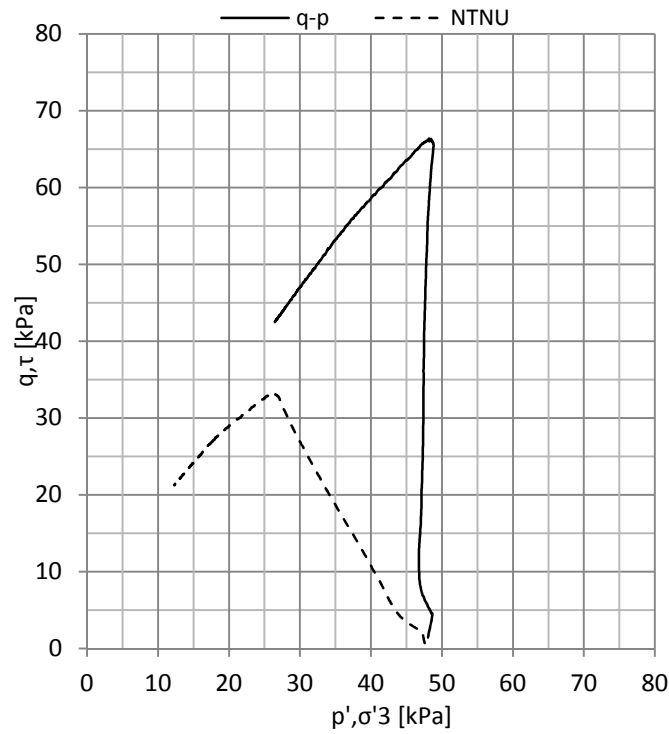
Dato prøveåpning:

03.05.2012

Dato forsøkskjøring:

06.05.2012

Bilag: A 20



### Prøveforstyrrelser - Treaxialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R2\_6m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R2\_6,53

Dybde: 6,53m

Celletrykk: 47,6 kPa

su: 33,2 kPa

ε,brudd: 1,9 %

a: 6 kPa

φ: 31,4 °

D: 0,04

w: 37 %

ε,vol: 1,6 %

Δe/e0: 0,046

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

03.05.2012

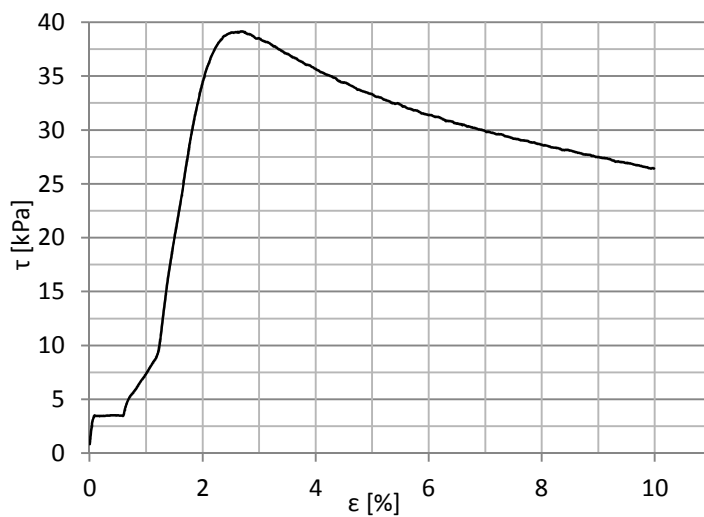
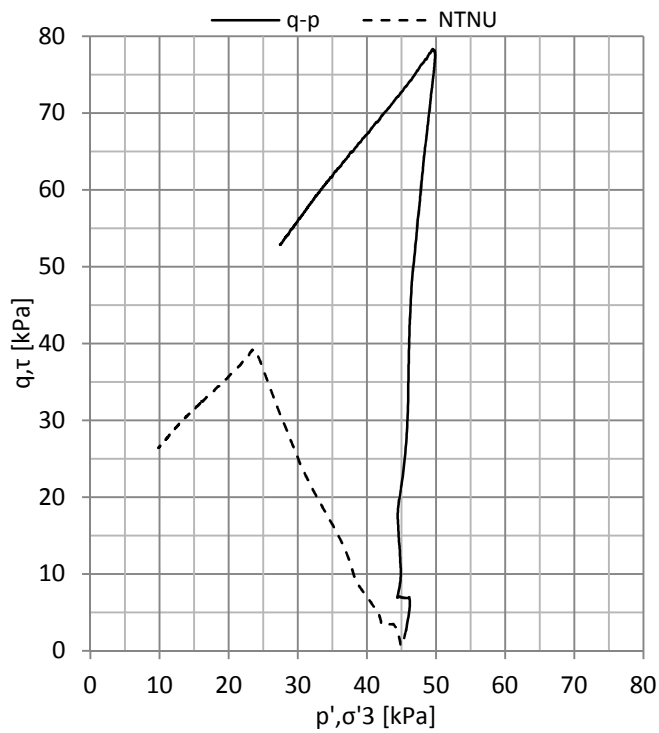
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

04.05.2012

Bilag: A 21



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R2\_6m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R2\_6,37

Dybde: 6,37m

Celletrykk: 44,9 kPa

su: 39,2 kPa

ε,brudd: 1,7 %

a: 13 kPa

φ: 31 °

D: 0,09

w: 35,6 %

ε,vol: 1,3 %

Δe/e0: 0,026

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

03.05.2012

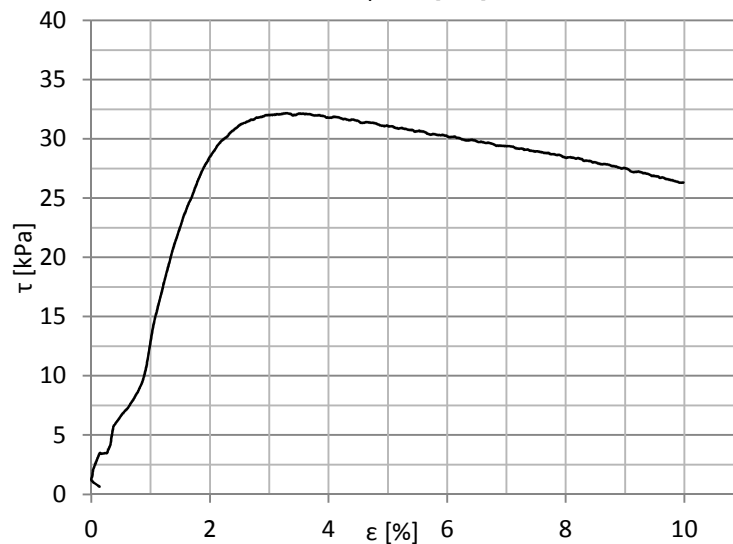
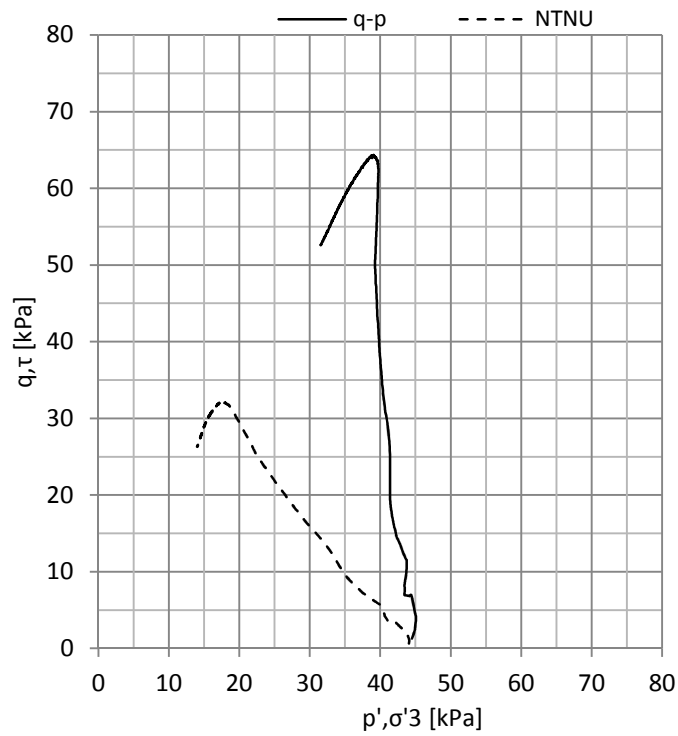
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

05.05.2012

Bilag: A 22



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_R2\_6m

Metode: Rotasjon

Prøve: V\_R2\_6,23

Dybde: 6,23m

Celletrykk: 44,2 kPa

su: 32,2 kPa

ε,brudd: 3 %

a: 5 kPa

φ: 36 °

D: 0

w: 33 %

ε,vol: 1,7 %

Δe/e0: 0,037

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

03.05.2012

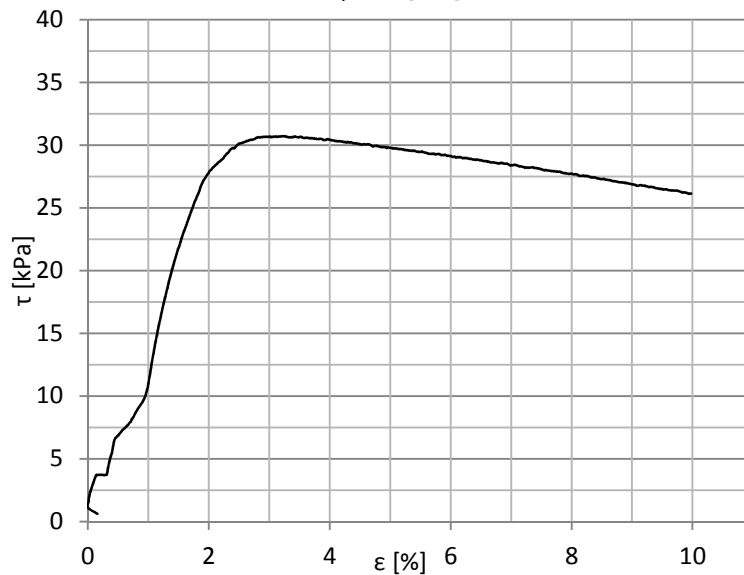
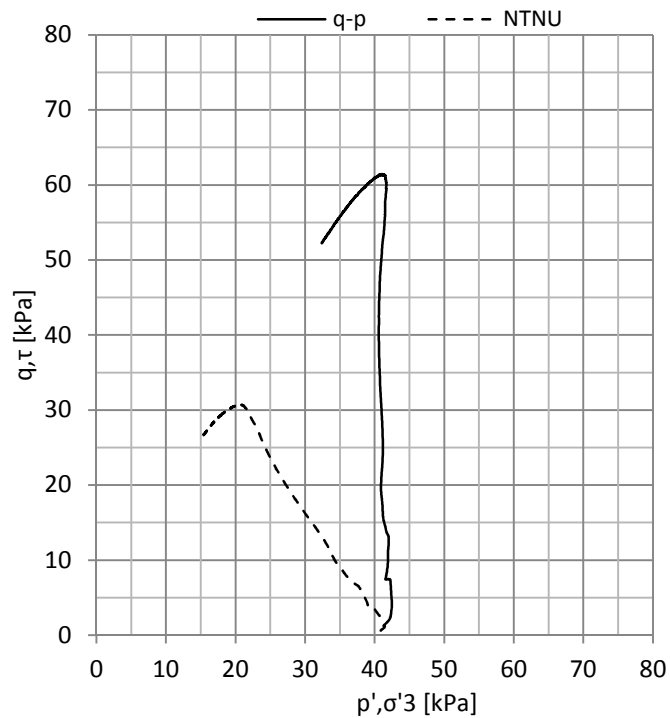
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

06.05.2012

Bilag: A 23



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T1\_5m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T1\_5,53

Dybde: 5,53 m

Celletrykk: 41,5 kPa

su: 30,7 kPa

ε,brudd: 2,8 %

a: 8,8 kPa

φ: 31°

D: 0,05

w: 34,5 %

ε,vol: 1,4 %

Δe/e0: 0,030

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

10.05.2012

Dato prøveåpning:

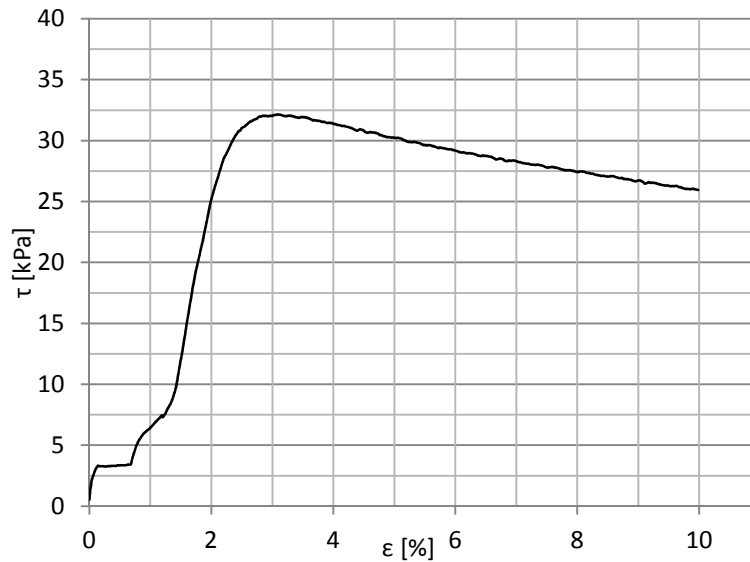
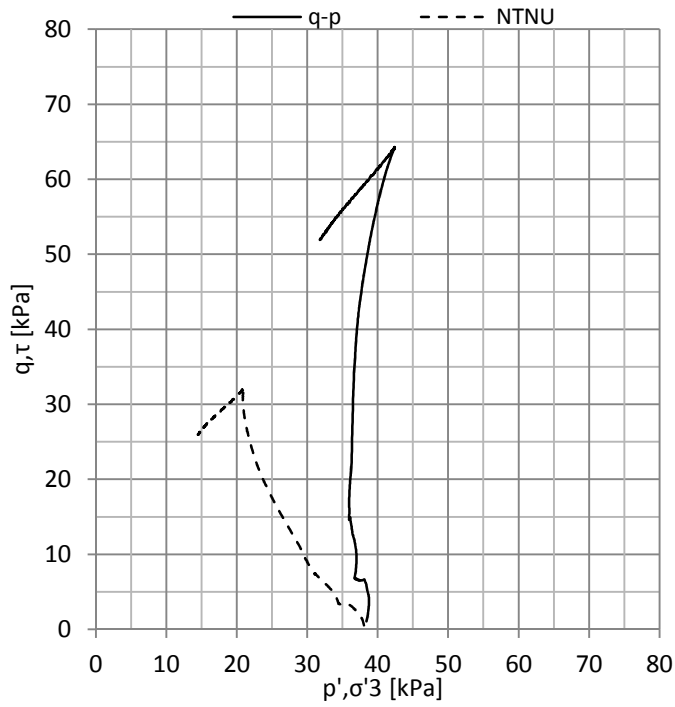
11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

11.05.2012

Bilag: A 24





### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T1\_5m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T1\_5,38

Dybde: 5,38 m

Celletrykk: 38,1 kPa

su: 32,2 kPa

ε,brudd: 2,1 %

a: 13 kPa

φ: 29 °

D: 0,2

w: 35 %

ε,vol: 1,2 %

Δe/e0: 0,025

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

10.05.2012

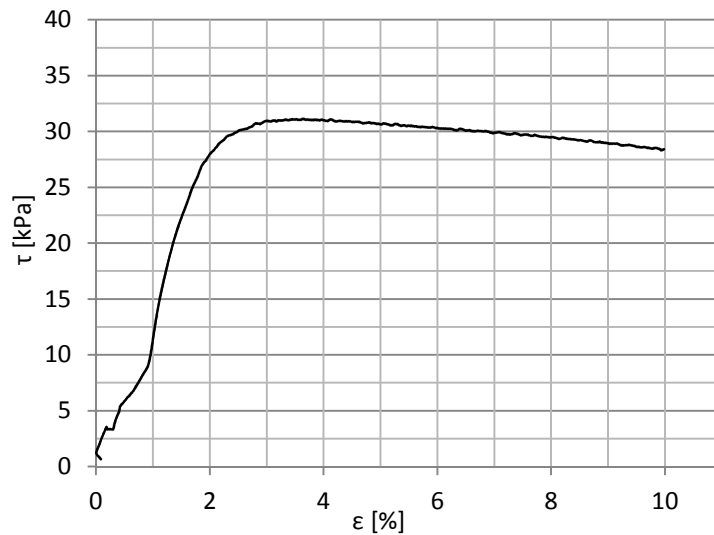
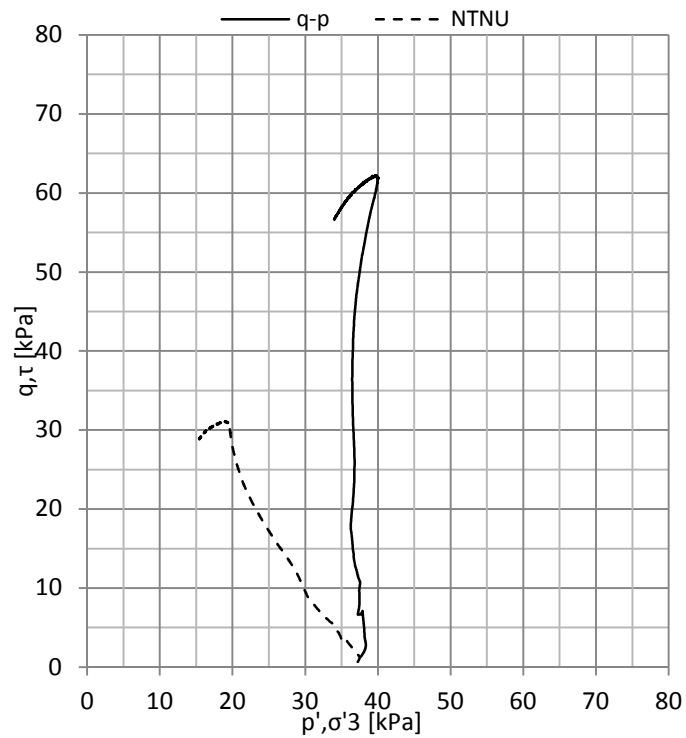
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

12.05.2012

Bilag: A 25



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T1\_5m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T1\_5,24

Dybde: 5,24m

Celletrykk: 37,6 kPa

su: 31,1 kPa

ε,brudd: 3,0 %

a: 12 kPa

φ: 32 °

D: 0,15

w: 24\*

ε,vol: 1,1%

Δe/e0: 0,024\*

Prøvekvalitet:

Dato prøvetaking:

10.,05.2012

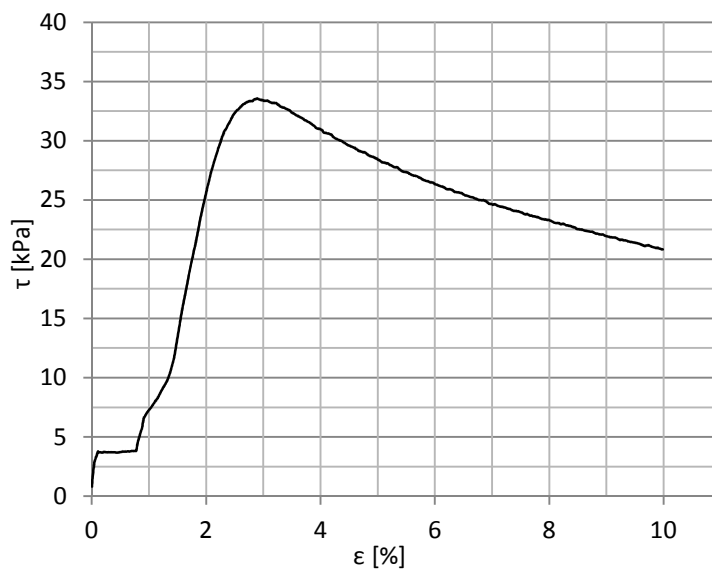
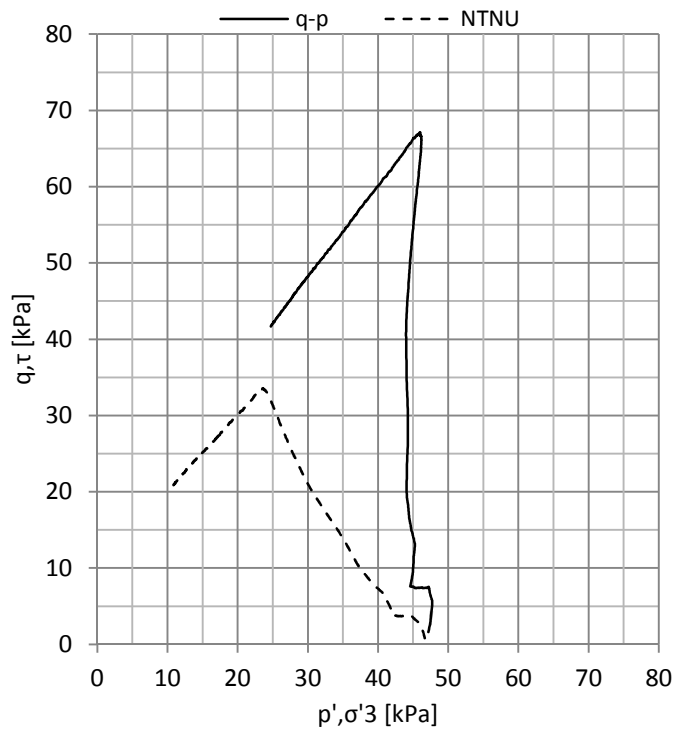
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

13.05.2012

Bilag: A 26



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T1\_6m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T1\_6,56

Dybde: 6,56m

Celletrykk: 46,7 kPa

su: 33,6 kPa

ε,brudd: 1,9 %

a: 10 kPa

φ: 30 °

D: 0

w: 37 %

ε,vol: 1,8 %

Δe/e0: 0,036

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

10.05.2012

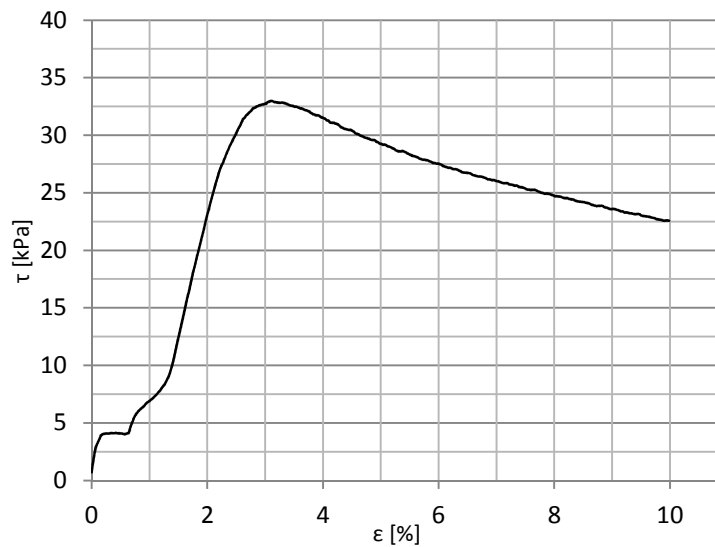
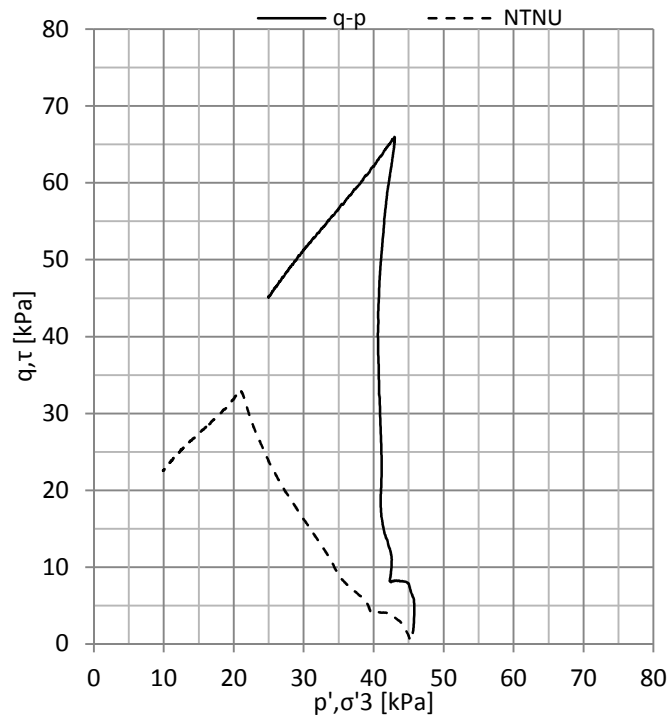
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

11.05.2012

Bilag: A 27



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T1\_6m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T1\_6,36

Dybde: 6,36m

Celletrykk: 45,2 kPa

su: 32,9 kPa

ε,brudd: 2,7 %

a: 14 kPa

φ: 29 °

D: 0,07

w: 36,7 %

ε,vol: 1,5 %

Δe/e0: 0,031

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

10.05.2012

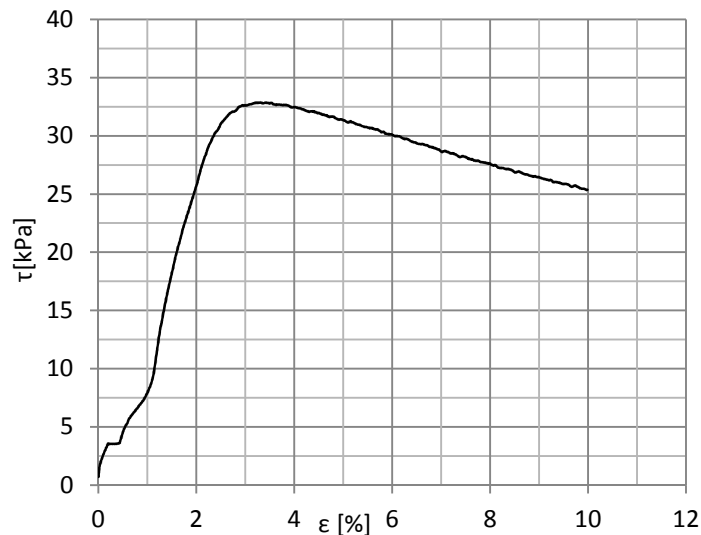
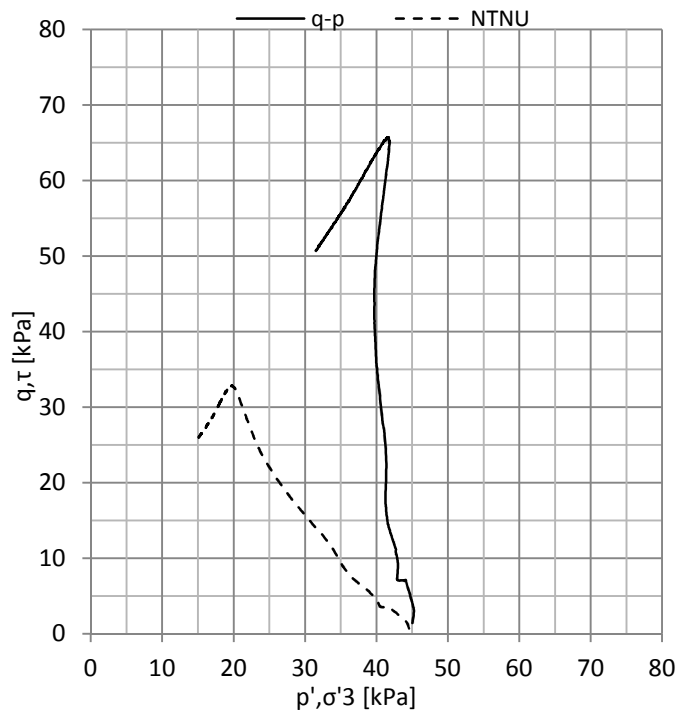
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring

12.05.2012

Bilag: A 28



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T1\_6m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T1\_6,24

Dybde: 6,24 m

Celletrykk: 44,6 kPa

su: 33,0 kPa

ε,brudd: 2,2 %

a: 3,5 kPa

φ: 37 °

D: 0,08

w: 34,4 %

ε,vol: 1,8 %

Δe/e0: 0,043

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

10.05.2012

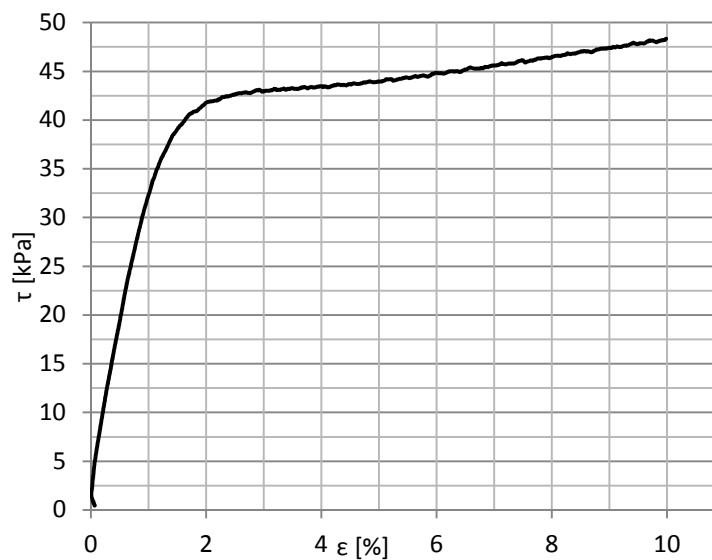
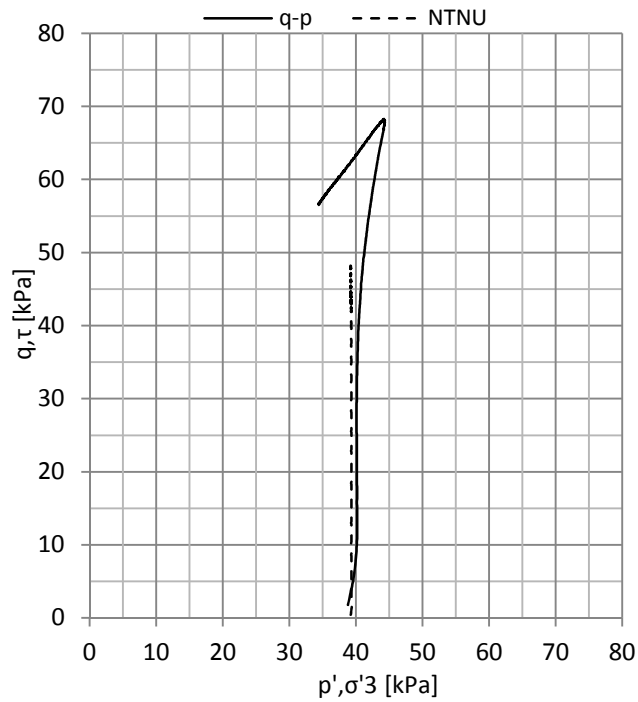
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring

14.05.2012

Bilag: A 29



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CID\***

Sylinder: V\_T2\_5m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T2\_5,50

Dybde: 5,50m

Celletrykk: 39,4 kPa

su: kPa

ε,brudd: %

a:kPa

φ: °

D:

w: %

ε,vol: 1,4 %

Δe/e0: 0,031

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

29.05.2012

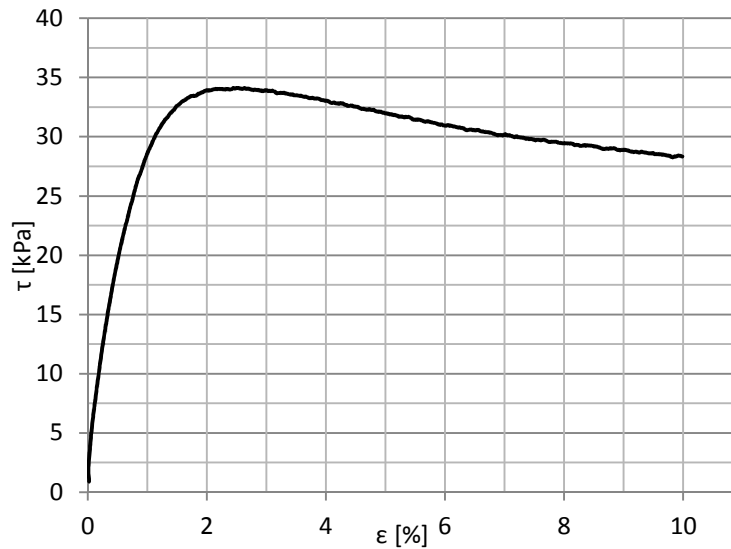
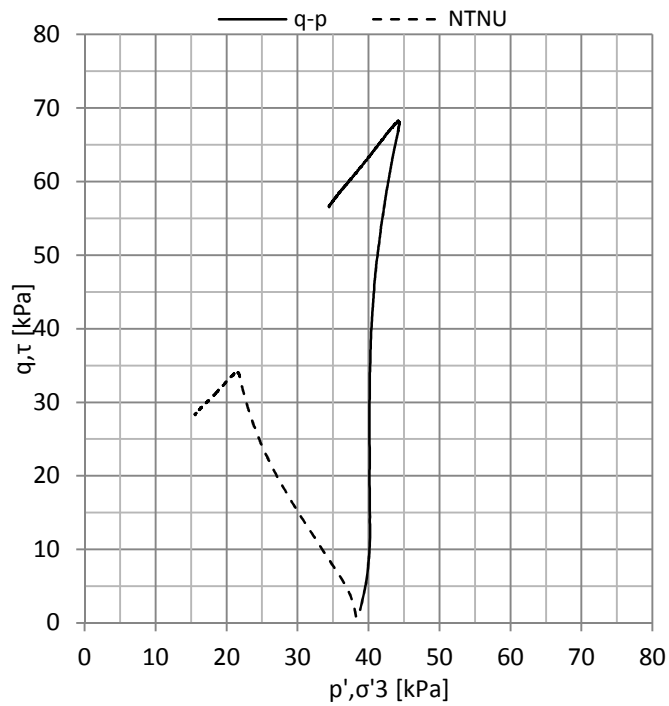
Dato prøveåpning:

29.05.2012

Dato forsøkskjøring

29.05.2012

Bilag: A 30



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T2\_5m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T2\_5,34

Dybde: 5,34m

Celletrykk: 38,2 kPa

$s_u$ : 34,1 kPa

$\epsilon$ ,brudd: 2,5 %

$a$ : 12 kPa

$\phi$ : 30 °

$D$ : 0,15

$w$ : 31,7 %

$\epsilon$ ,vol: 1,8 %

$\Delta e/e_0$ : 0,026

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

29.05.2012

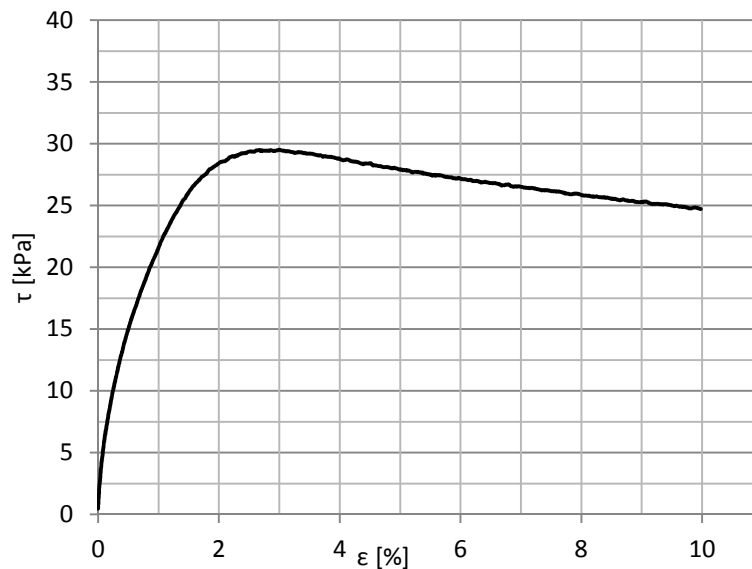
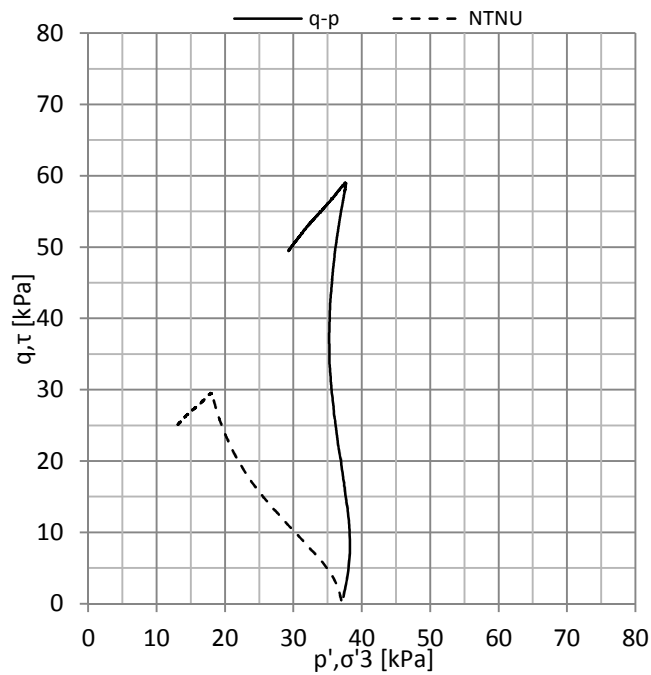
Dato prøveåpning:

29.05.2012

Dato forsøkskjøring

29.05.2012

Bilag: A 31



### Prøveforstyrrelser - Treaxialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T2\_5m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T2\_5,20

Dybde: 5,20 m

Celletrykk: 37,6 kPa

su: 29,5 kPa

ε,brudd: 3 %

a: 11 kPa

φ: 30 °

D: 0,16

w: 35,1 %

ε,vol: 2,0 %

Δe/e0: 0,040

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

29.05.2012

Dato prøveåpning:

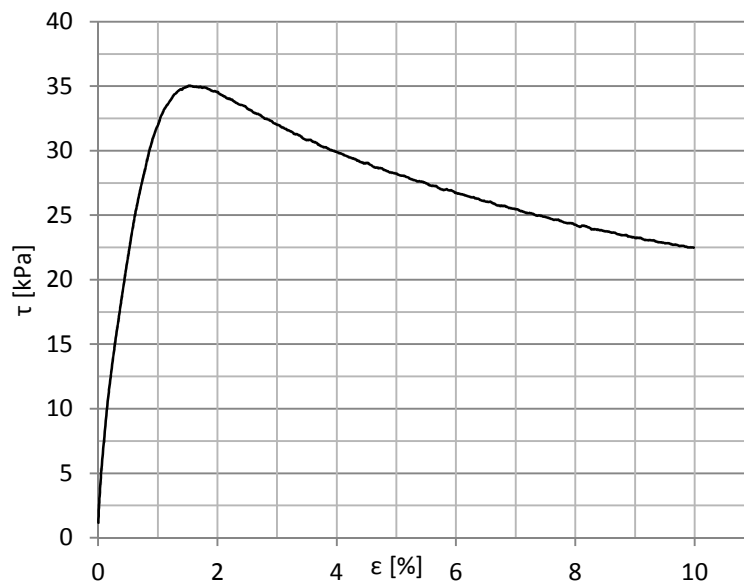
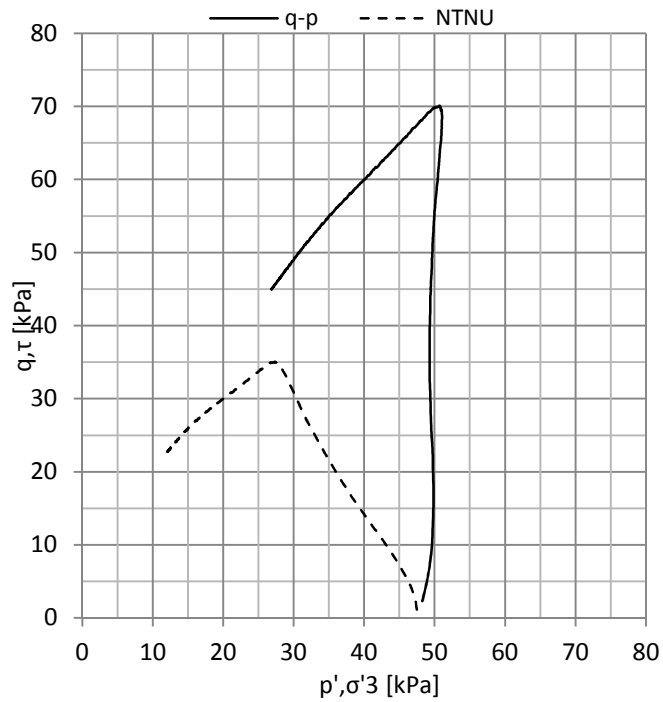
29.05.2012

Dato forsøkskjøring

30.05.2012

Bilag: A 32





### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T2\_6m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T2\_6,51

Dybde: 6,51 m

Celletrykk: 47,5 kPa

su: 35 kPa

ε,brudd: 1,5 %

a: 14 kPa

φ: 28,3 °

D: 0,05

w: 36,6 %

ε,vol: 1,5 %

Δe/e0: 0,030

Prøvekvalitet: Meget god

Dato prøvetaking:

29.05.2012

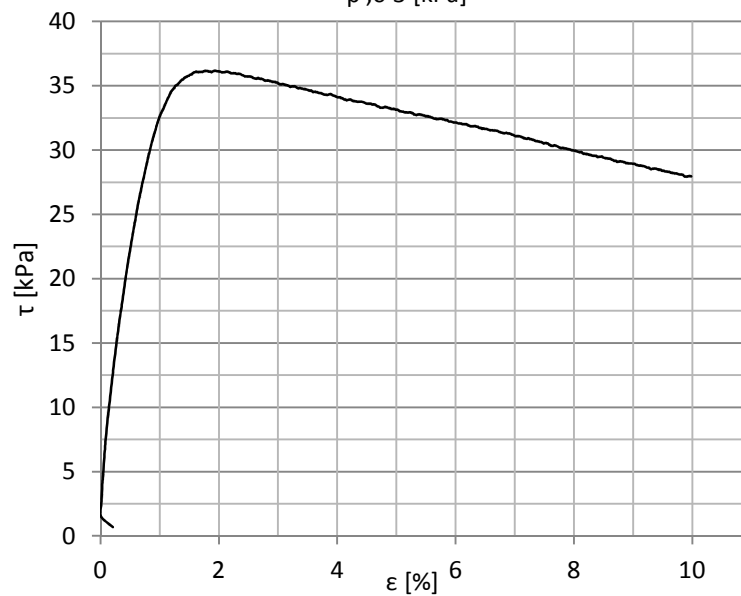
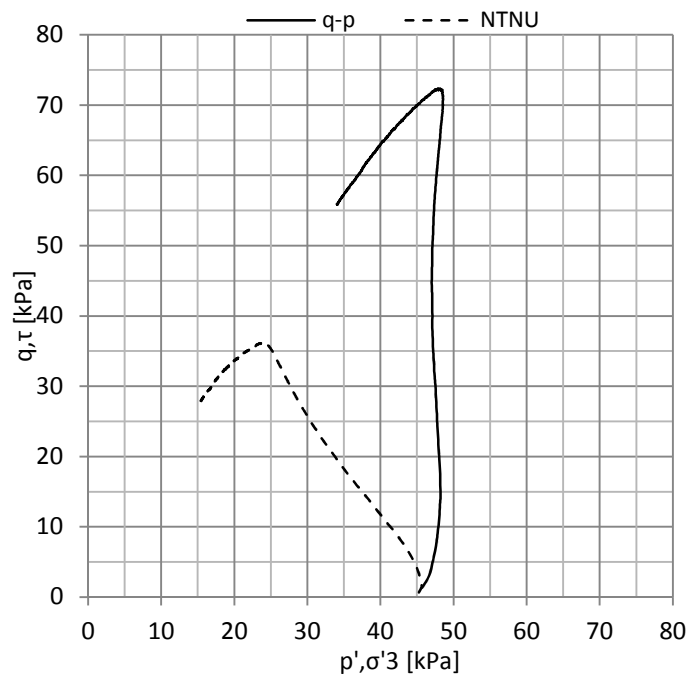
Dato prøveåpning:

30.05.2012

Dato forsøkskjøring

30.05.2012

Bilag: A 33



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T2\_6m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T2\_6,35

Dybde: 6,35m

Celletrykk: 45,8 kPa

su: 36,2 kPa

ε,brudd: 1,9 %

a: 7 kPa

φ: 33,7 °

D: 0,05

w: 35,5 %

ε,vol: 1,6 %

Δe/e0: 0,036

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

29.05.2012

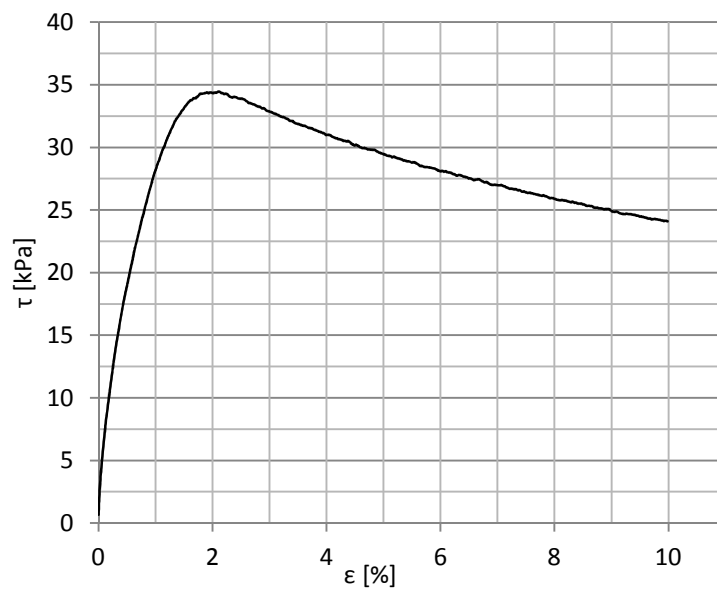
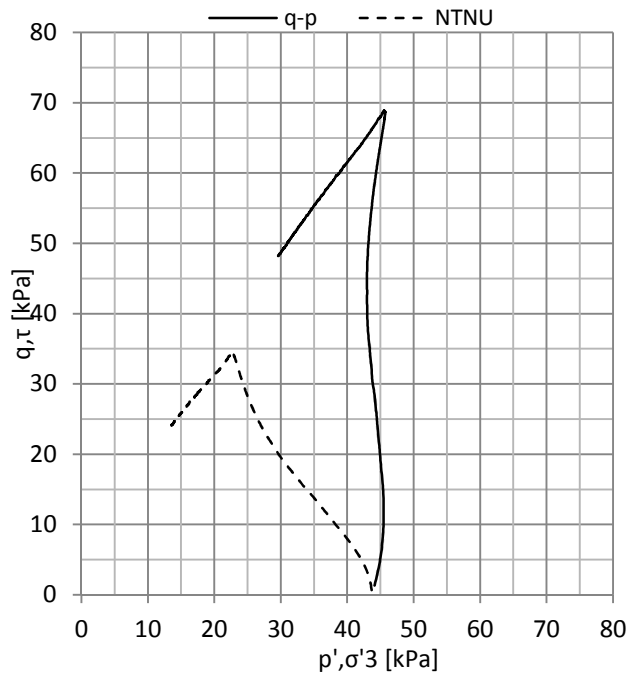
Dato prøveåpning:

30.05.2012

Dato forsøkskjøring

30.05.2012

Bilag: A 34



### Prøveforstyrrelser - Treksialforsøk

**CIU**

Sylinder: V\_T2\_6m

Metode: Trekk

Prøve: V\_T2\_6,22

Dybde: 6,22 m

Celletrykk: 43,7 kPa

su: 34,3 kPa

ε,brudd: 2,1 %

a: 10 kPa

φ: 28,4 °

D: 0,08

w: 35,1%

ε,vol: 1,2 %

Δe/e0: 0,036

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

29.05.2012

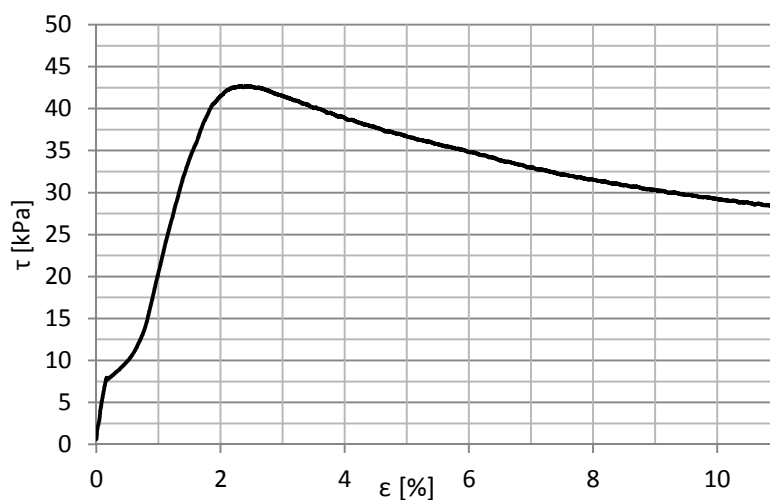
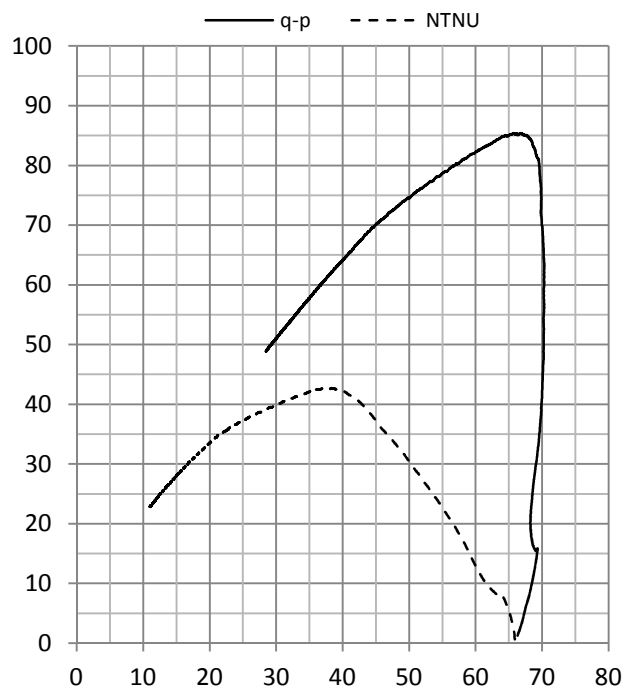
Dato prøveåpning:

30.05.2012

Dato forsøkskjøring

31.05.2012

Bilag: A 35



### Prøveforstyrrelser - Treaksialforsøk

**CIU**

Blokkprøve

Metode: Blokk

Prøve: Blokk\_9,20

Dybde: 9,20 m

Celletrykk: 66,7 kPa

su: 42,7 kPa

$\epsilon$ ,brudd: 2,3%

a: 14 kPa

$\phi$ : 27°

D:

w: 36 %

$\epsilon$ ,vol: 2,1 %

$\Delta e/e_0$ : 0,042

Prøvekvalitet: God

Dato prøvetaking:

06.06.2011

Dato prøveåpning:

07.02.2012

Dato forsøkskjøring:

07.02.2012

Bilag: A 36

## **BILAG B – ØDOMETERFORSØK**

Bilag B 1: H\_R1\_5,30

Bilag B 2: H\_R1\_5,60

Bilag B 3: H\_T1\_5,40

Bilag B 4: H\_T1\_5,70

Bilag B 5: H\_T1\_6,40

Bilag B 6: H\_T1\_6,65

Bilag B 7: H\_T2\_9,40

Bilag B 8: H\_T2\_9,60

Bilag B 9: V\_R1\_5,40

Bilag B 10: V\_R1\_5,65

Bilag B 11: V\_R1\_6,28

Bilag B 12: V\_R1\_6,60

Bilag B 13: V\_R2\_5,30

Bilag B 14: V\_R2\_5,65

Bilag B 15: V\_R2\_6,30

Bilag B 16: V\_R2\_6,59

Bilag B 17: V\_T1\_5,30

Bilag B 18: V\_T1\_5,61

Bilag B 19: V\_T1\_6,30

Bilag B 20: V\_T1\_6,69

Bilag B 21: V\_T2\_5,27

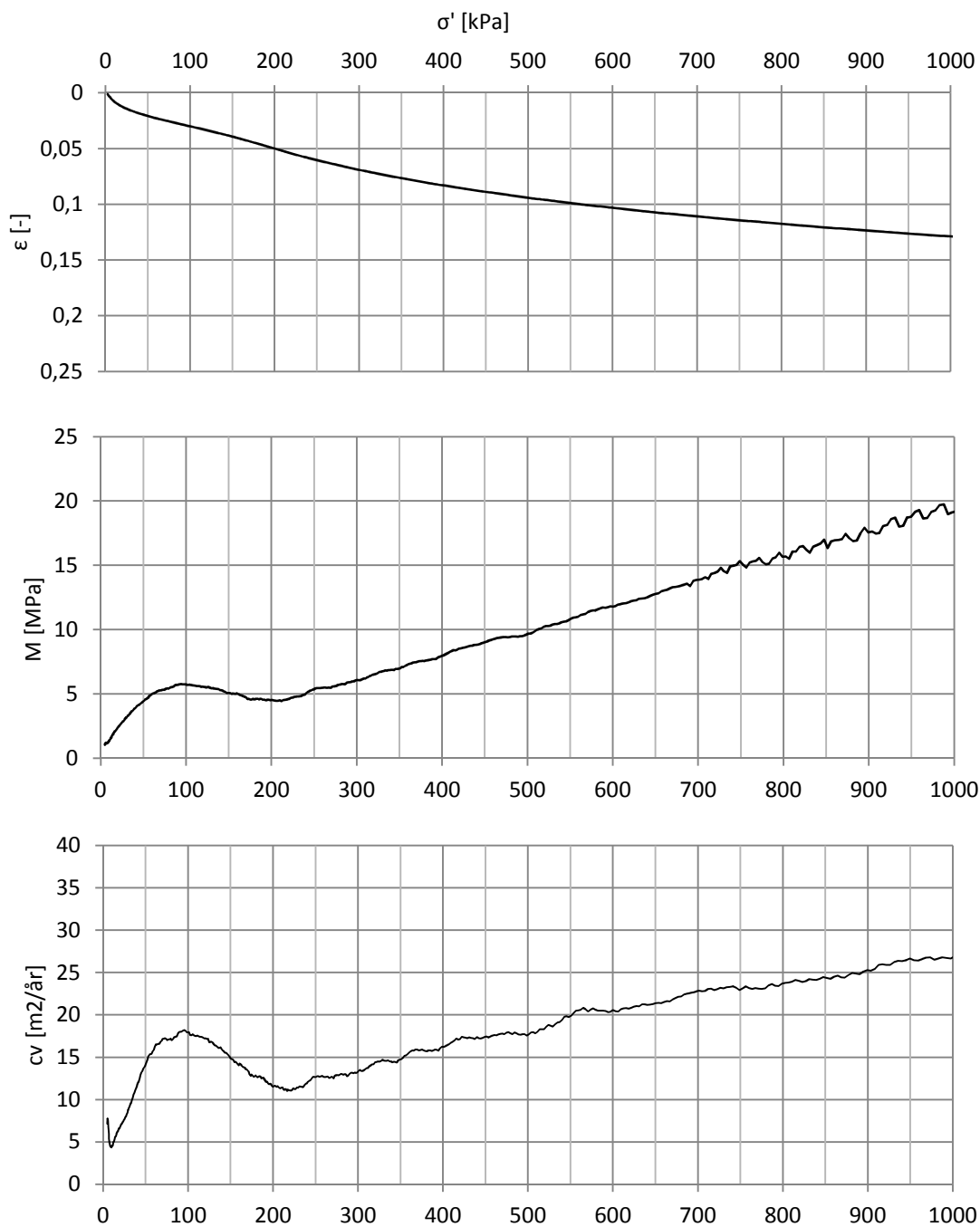
Bilag B 22: V\_T2\_5,56

Bilag B 23: V\_T2\_6,28

Bilag B 24: V\_T2\_6,56

Bilag B 25: Blokk\_9,2





### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_R1\_5m

Metode : Rotasjon

Prøve: H\_R1\_5,30

Dybde: 5,30m

$p'_c$  :120 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 0 kPa

M: 5,5 MPa

cv: 17,5

w: 29,9

$\Delta e/e_0$ : 0,066

Deformasjonshastighet:  
0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

07.11.11

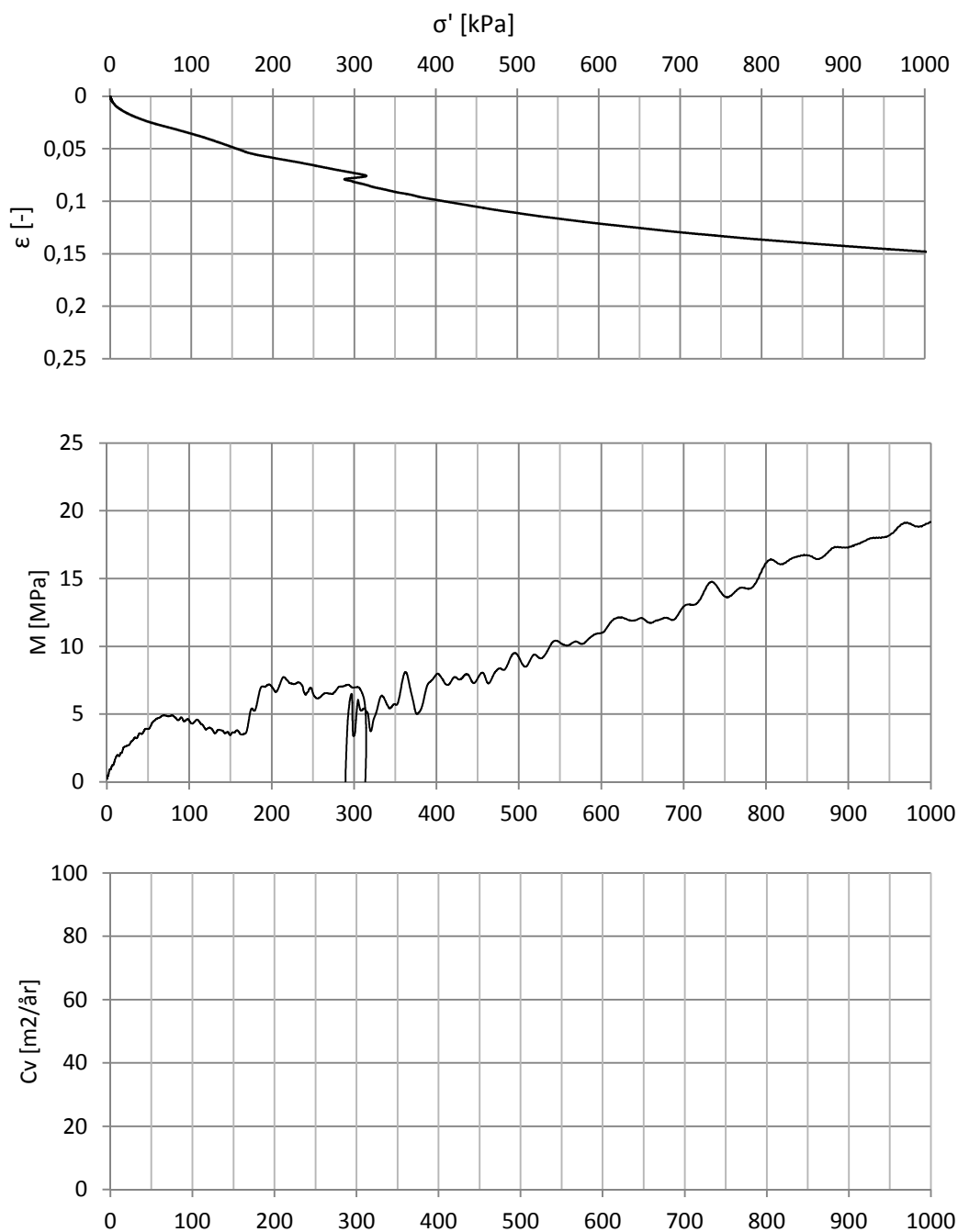
Dato prøveåpning:

07.11.11

Dato forsøkskjøring

07.11.11

Bilag: B 1



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_R1\_5m

Metode : Rotasjon

Prøve: H\_R1\_5,60

Dybde: 5,60m

$p'_c$  :120 kPa

m:

$p'_{ref}$ :

M:

cv:

w: 29,7

$\Delta e/e_0$ : 0,054

Deformasjonshastighet:  
0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

07.11.11

Dato prøveåpning:

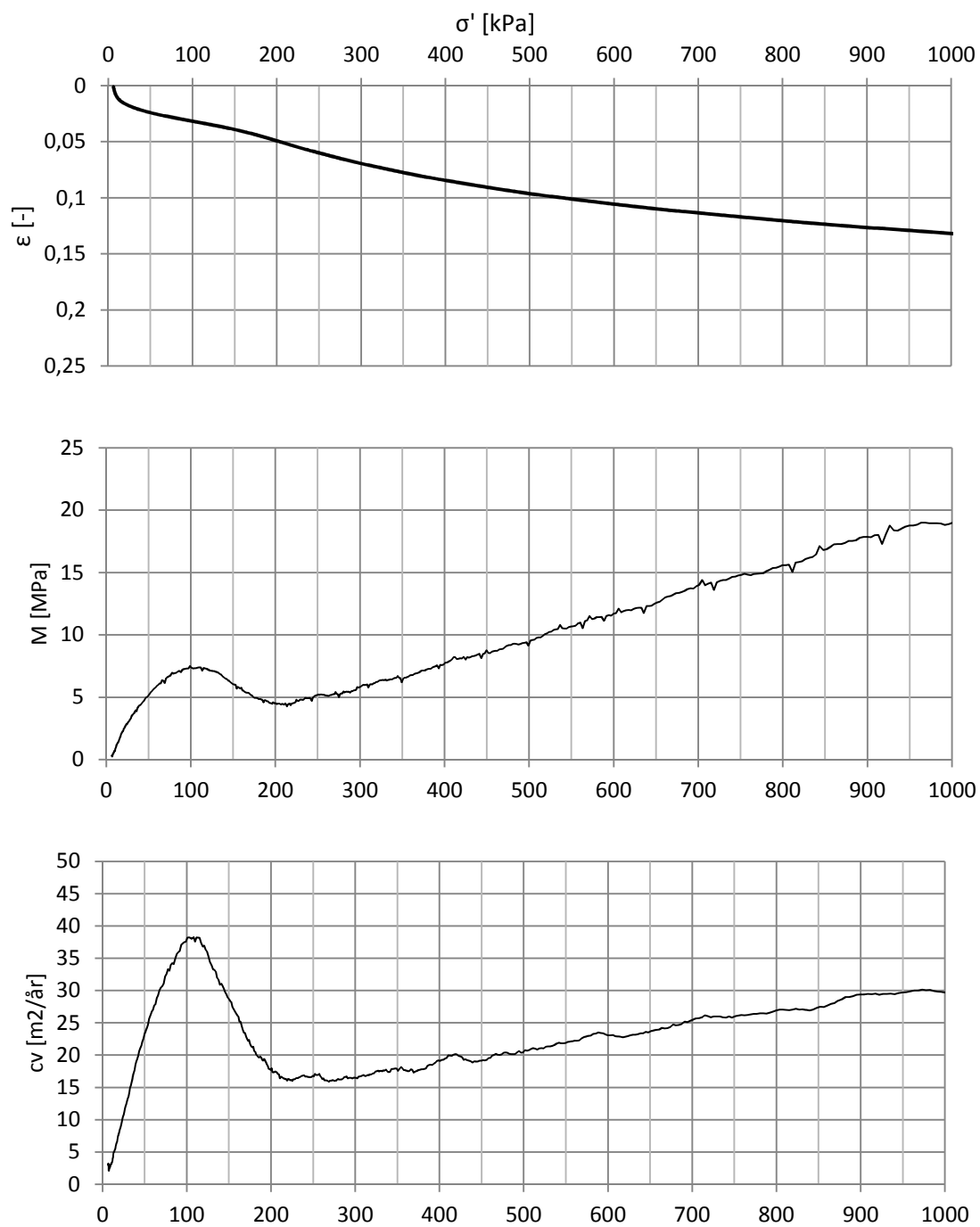
07.11.11

Dato forsøkskjøring:

07.11.11

Bilag: B 2





### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_T1\_5m

Metode : Trekk

Prøve: H\_R1\_5,40

Dybde: 5,40m

$p'_c$  :140 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 0 kPa

M: 7 MPa

cv: 38

w: 29,7%

$\Delta e/e_0$ : 0,060

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

21.11.11

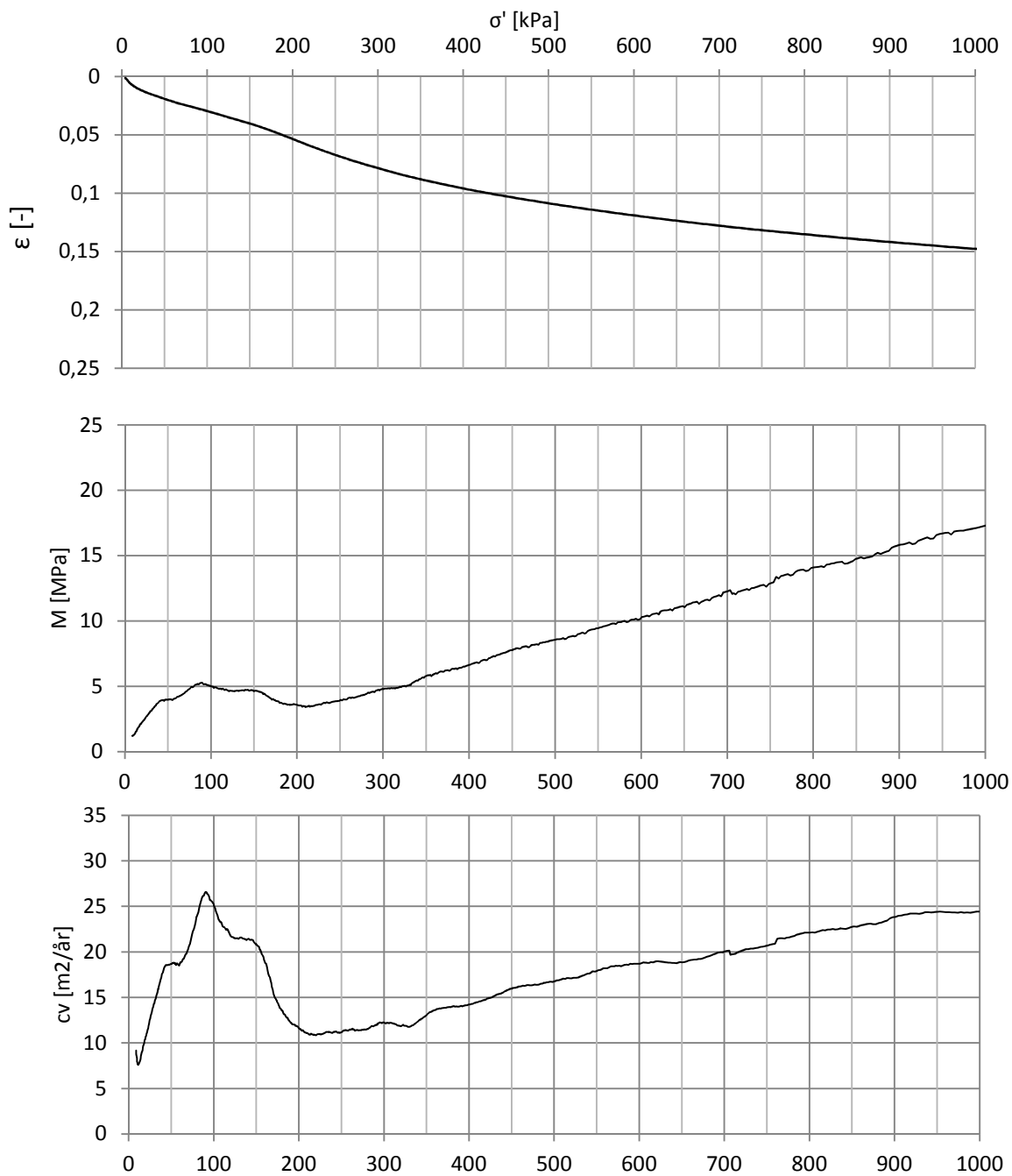
Dato prøveåpning:

21.11.11

Dato forsøkskjøring:

21.11.11

Bilag: B 3



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_T1\_5m

Metode : Trekk

Prøve: H\_T1\_5,70

Dybde: 5,70m

$p'_c$  :140 kPa

m: 18

$p'_{ref}$ : 60 kPa

M: 5 MPa

cv: 26

w: 32,7 %

$\Delta e/e_0$ : 0,045

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

21.11.11

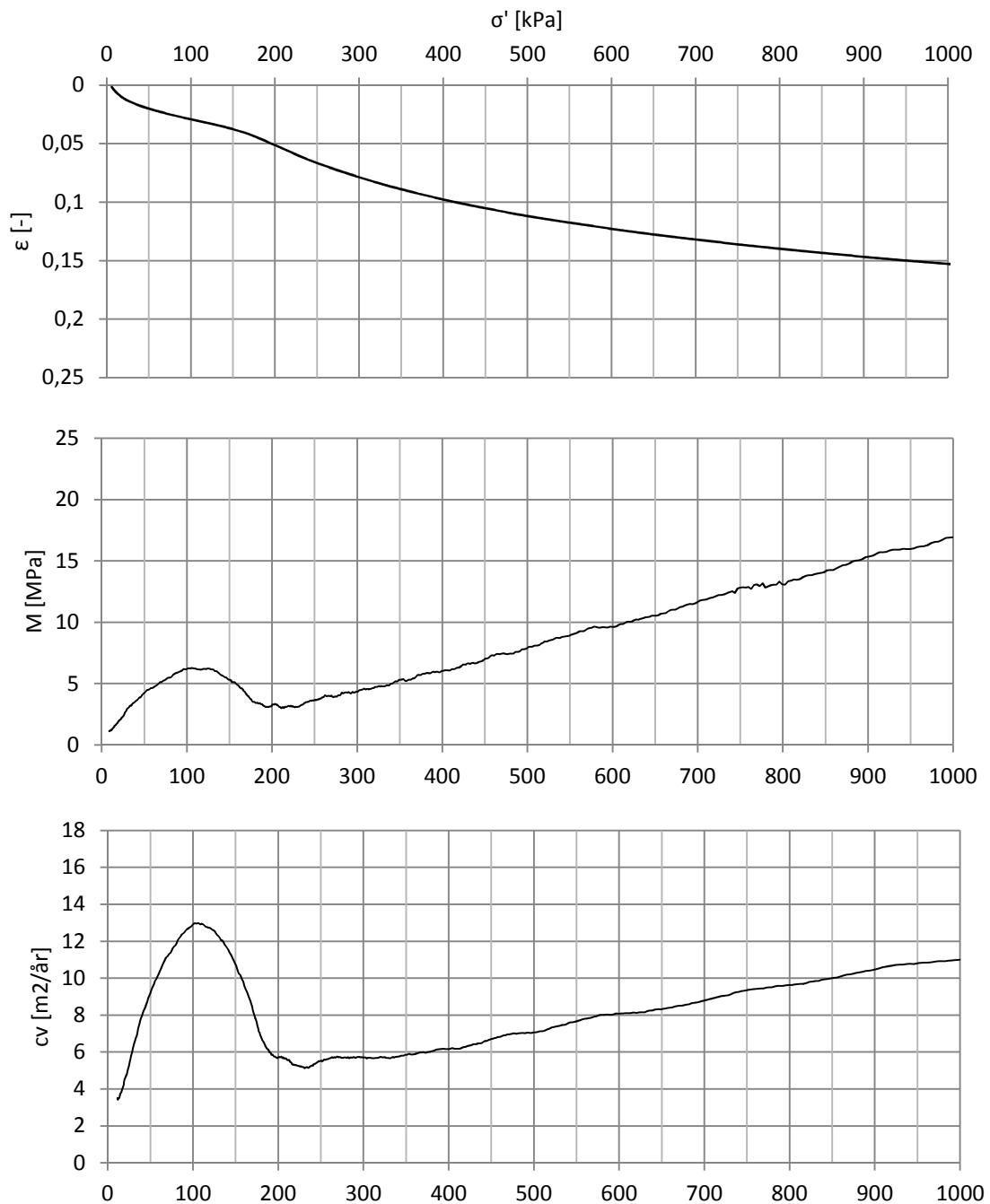
Dato prøveåpning:

21.11.11

Dato forsøkskjøring:

21.11.11

Bilag: B 4



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_T1\_6m

Metode : Trekk

Prøve: H\_T1\_6,40

Dybde: 6,40 m

$p'_c$ : 150 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 50 kPa

M: 6 MPa

cv: 13

w: 33,1

$\Delta e/e_0$ : 0,053

Deformasjonshastighet:  
0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

21.11.11

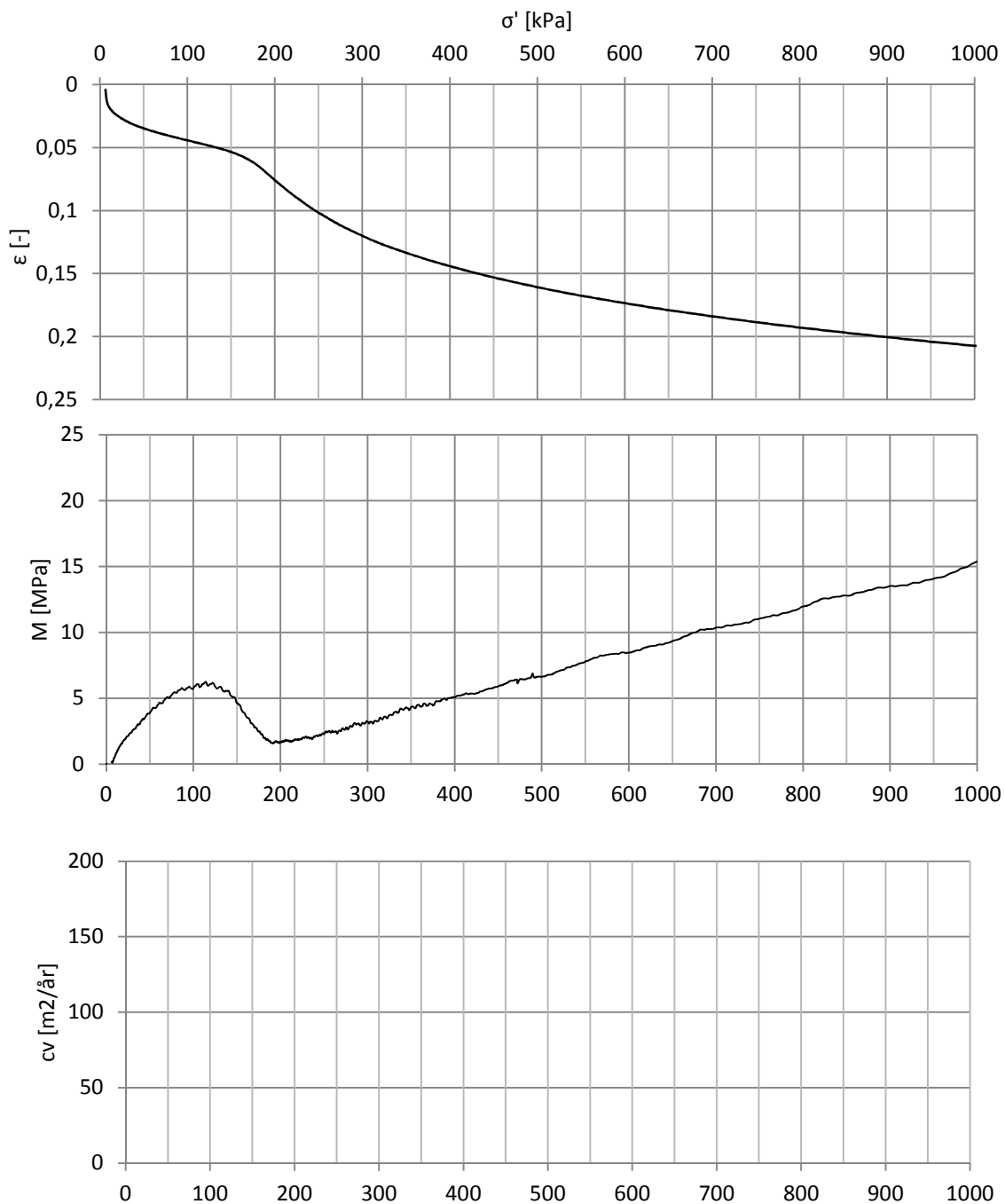
Dato prøveåpning:

23.11.11

Dato forsøkskjøring:

23.11.11

Bilag: B 5



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_T1\_6m

Metode : Trekk

Prøve: H\_T1\_6,65

Dybde: 6,65m

$p'_c$  :165 kPa

m: 17

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 6 MPa

$c_v$ :

w: 42,6 %

$\Delta e/e_0$ : 0,071

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

21.11.11

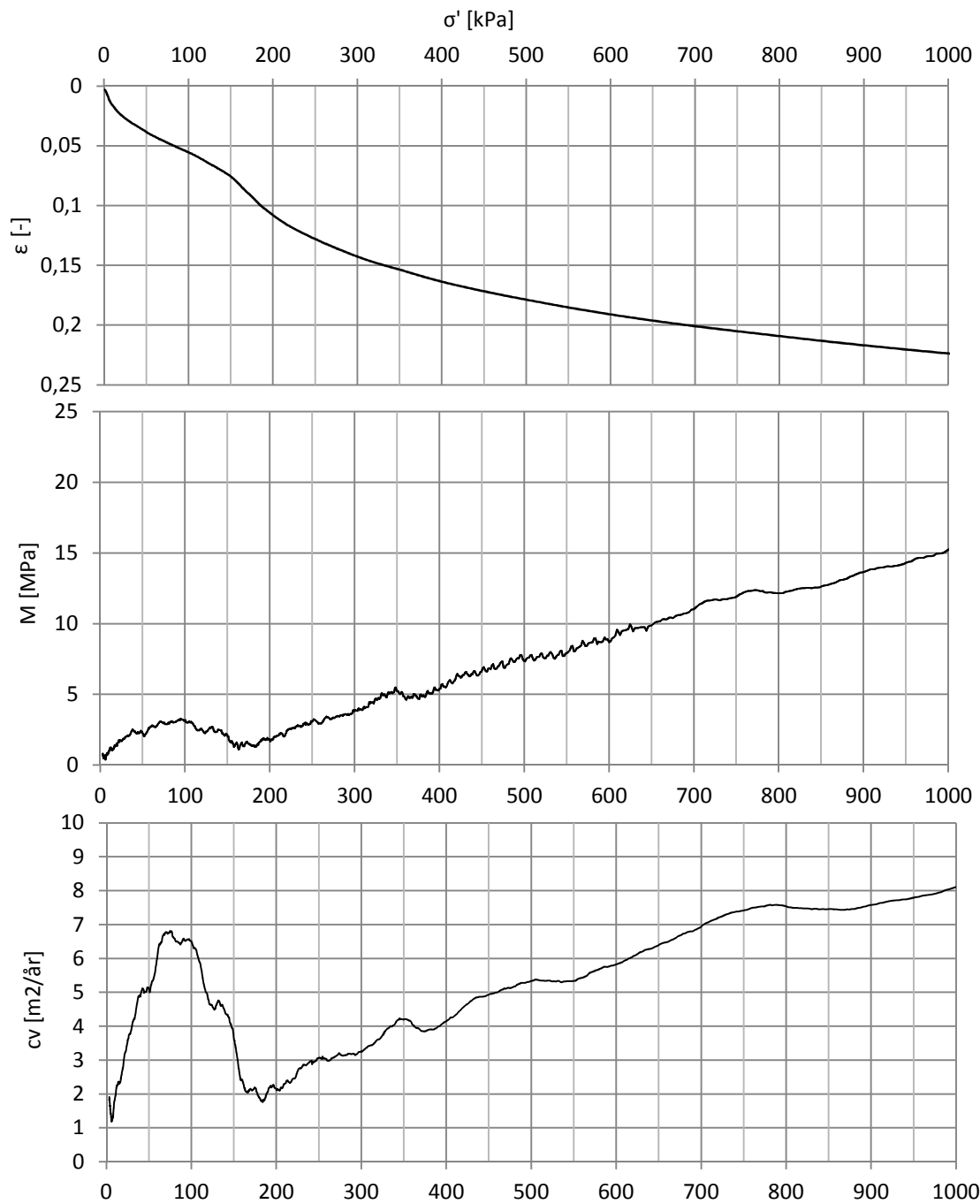
Dato prøveåpning:

23.11.11

Dato forsøkskjøring:

23.11.11

Bilag: B 6



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_T2\_9m

Metode : Trekk

Prøve: H\_T1\_9,40

Dybde: 9,40 m

$p'_c$  :140 kPa

m: 17

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 3,5 MPa

cv: 6,7

w: 40 %

$\Delta e/e_0$ : 0,092

Deformasjonshastighet:

0,004 mm/min

Dato prøvetaking:

15.11.11

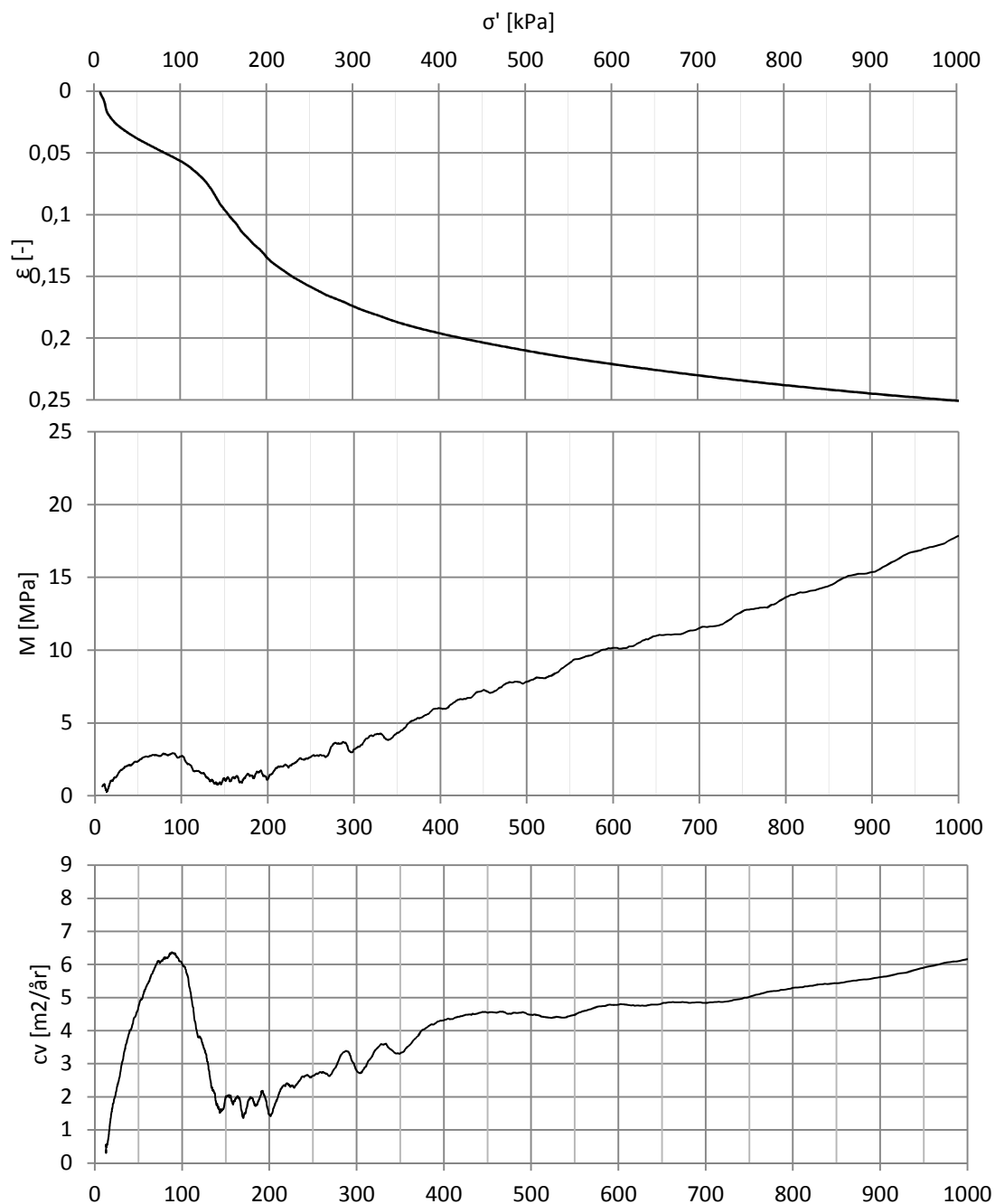
Dato prøveåpning:

15.11.11

Dato forsøkskjøring:

15.11.11

Bilag: B 7



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: H\_T2\_9m

Metode : Trekk

Prøve: H\_T2\_9,60

Dybde: 9,60 m

$p'_c$  :130 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 150 kPa

M: 2,5 MPa

cv: 6,4

w: 40 %

$\Delta e/e_0$ : 0,103

Deformasjonshastighet:

0,004 mm/min

Dato prøvetaking:

15.11.11

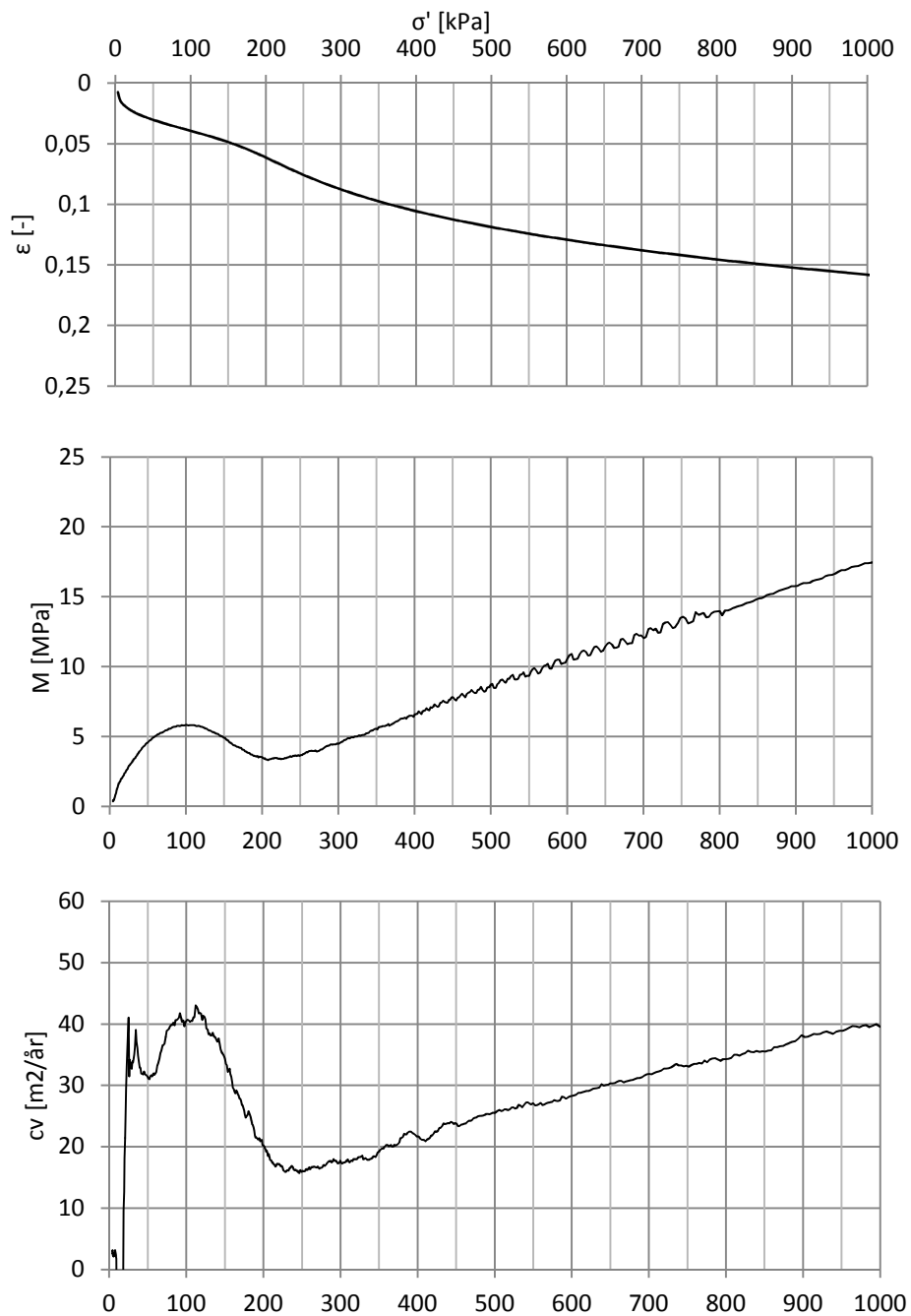
Dato prøveåpning:

15.11.11

Dato forsøkskjøring:

15.11.11

Bilag: B 8



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R1\_5m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R1\_5,40

Dybde: 5,40 m

$p'_c$  : 150 kPa

m: 19

$p'_{ref}$ : 50kPa

M: 5,8 MPa

cv: -

w: 34 %

$\Delta e/e_0$ : 0,076

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

02.05.2012

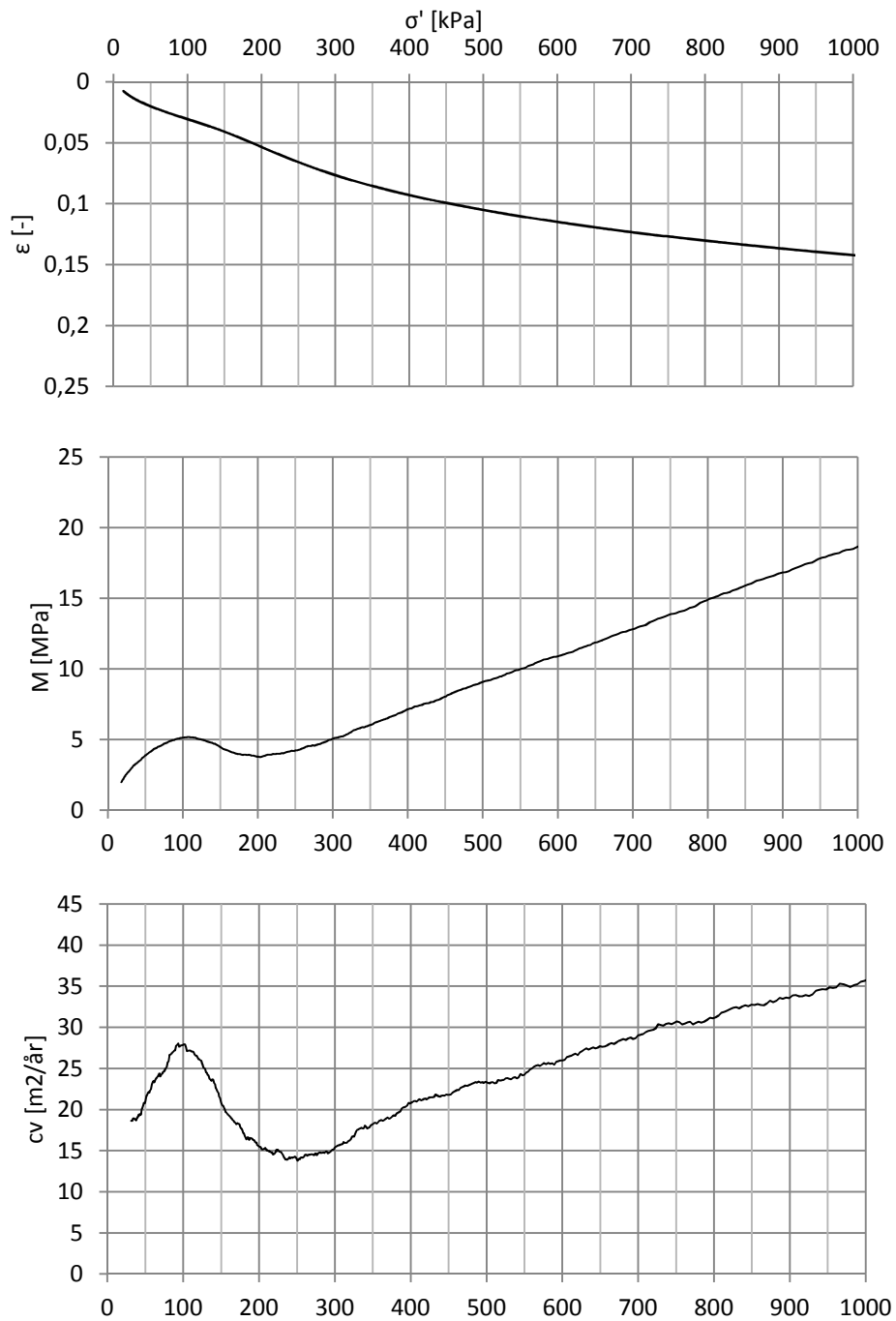
Dato prøveåpning:

02.05.2012

Dato forsøkskjøring:

02.05.2012

Bilag: B 9



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R1\_5m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R1\_5,65

Dybde: 5,65m

$p'_c$ : 150 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 25 kPa

M: 5,1 MPa

cv: 28

w: 32,6

$\Delta e/e_0$ : 0,057

Deformasjonshastighet:  
0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

02.05.2012

Dato prøveåpning:

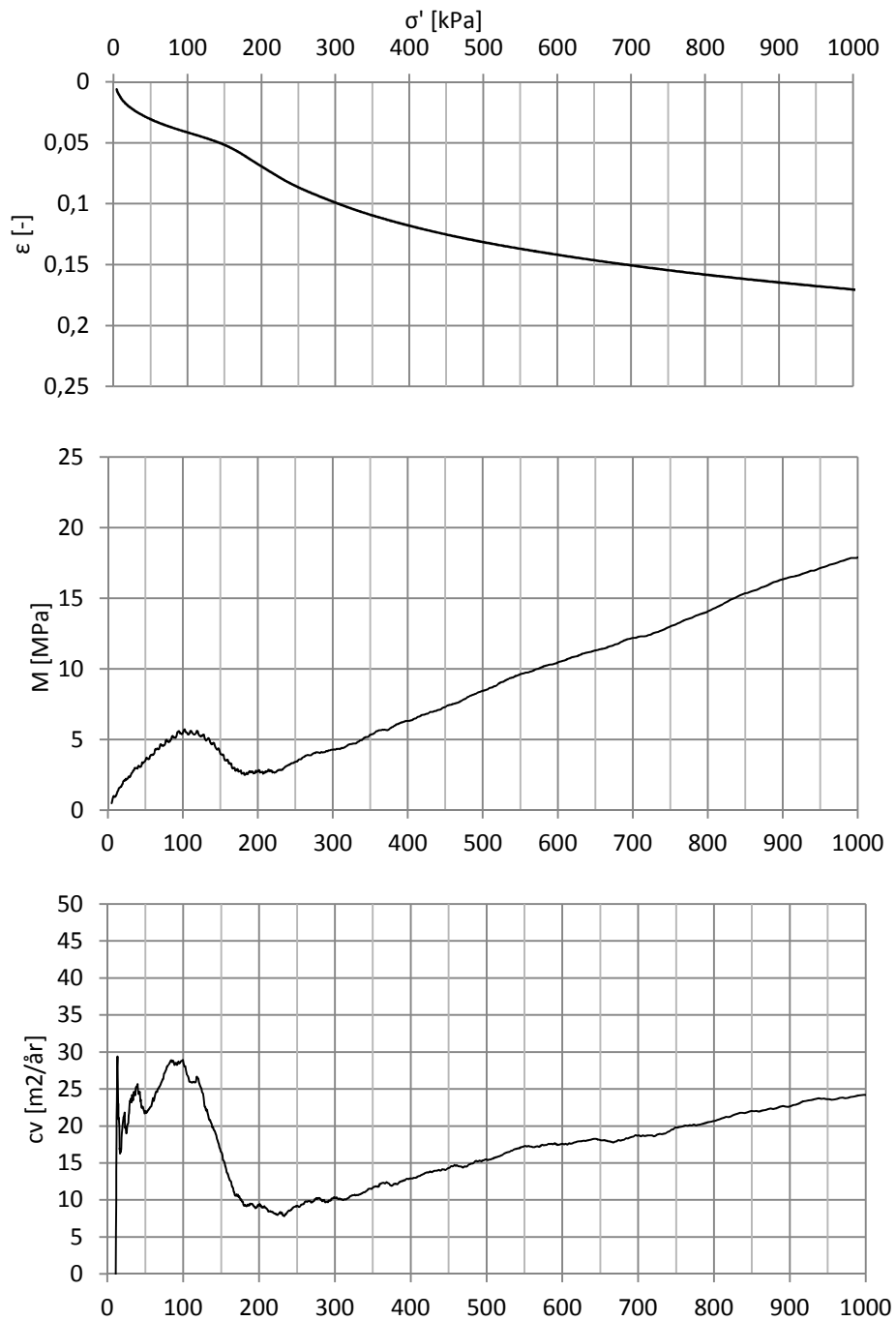
02.05.2012

Dato forsøkskjøring:

02.05.2012

Bilag: B 10





### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R1\_6m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R1\_6,28

Dybde: 6,28 m

$p'_c$  : 155 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 5,4 MPa

cv: -

w: 35,5

$\Delta e/e_0$ : 0,076

Deformasjonshastighet:  
0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

02.05.2012

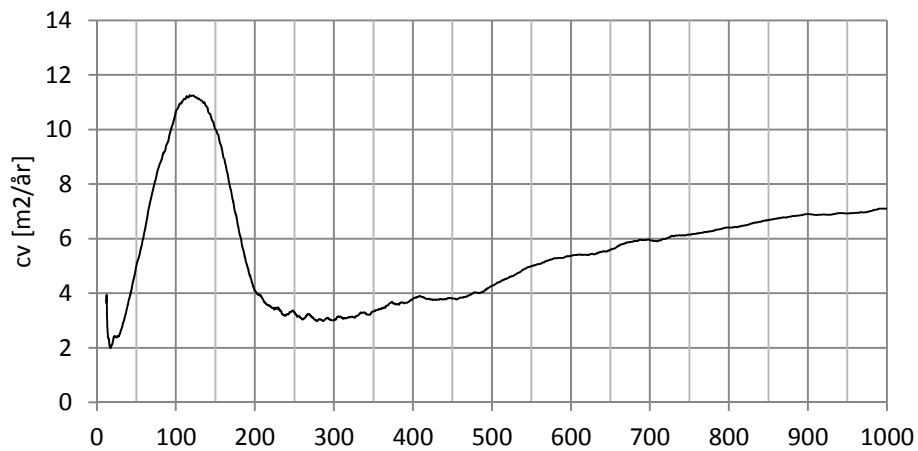
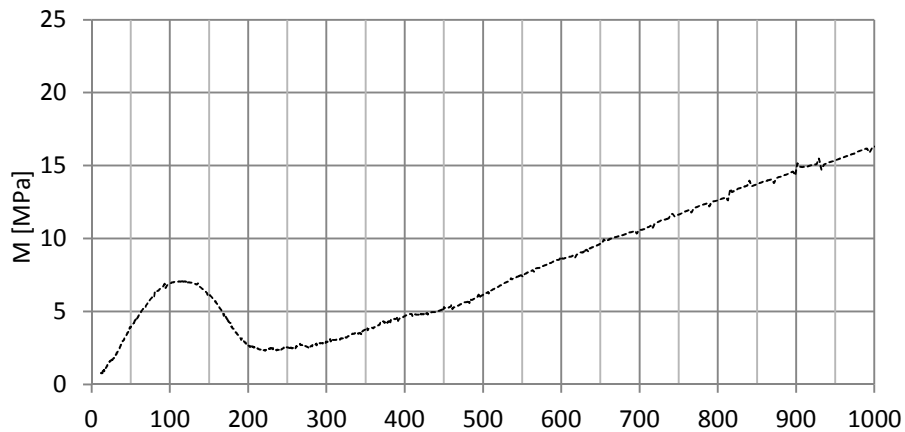
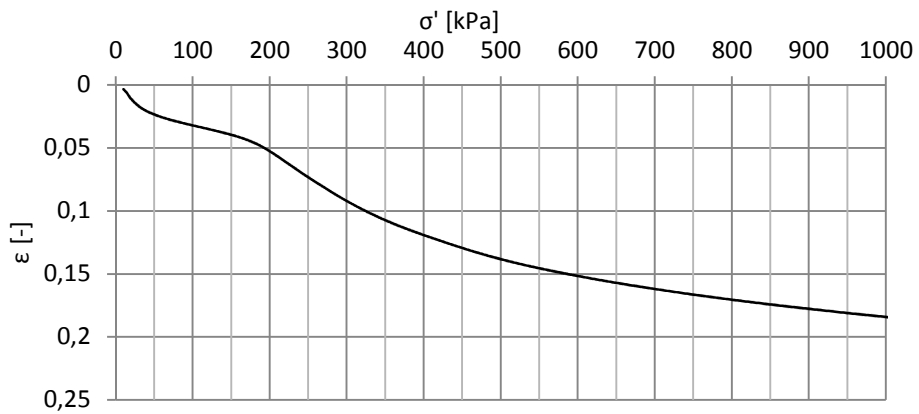
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

04.05.2012

Bilag: B 11



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R1\_6m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R1\_6,60

Dybde: 6,60 m

$p'_c$  :175 kPa

m:20

$p'_{ref}$ : 150kPa

M: 7 MPa

cv: 11,1

w: 38 %

$\Delta e/e_0$ : 0,062

Deformasjonshastighet:  
0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

02.05.2012

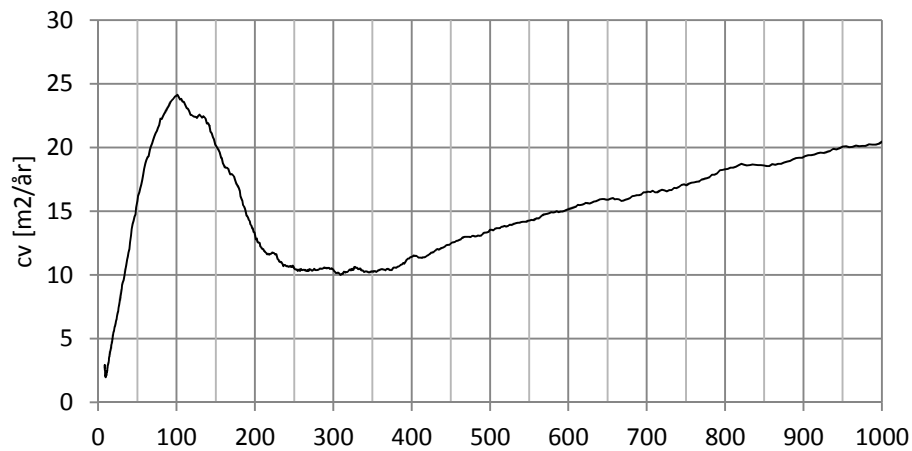
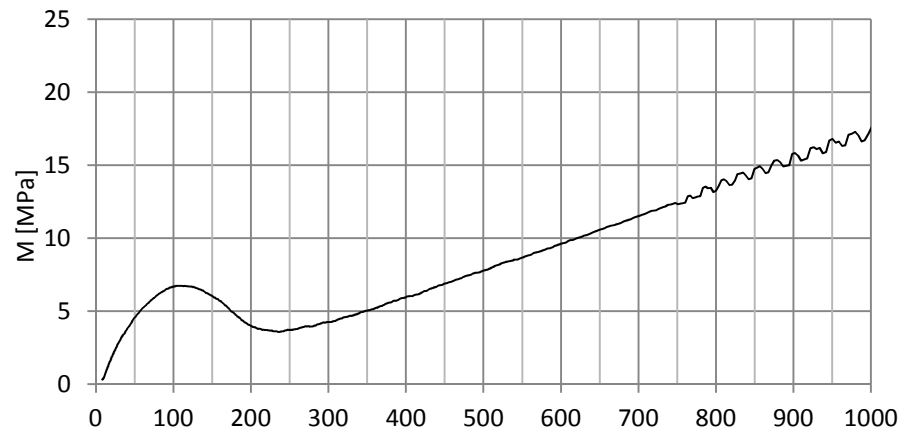
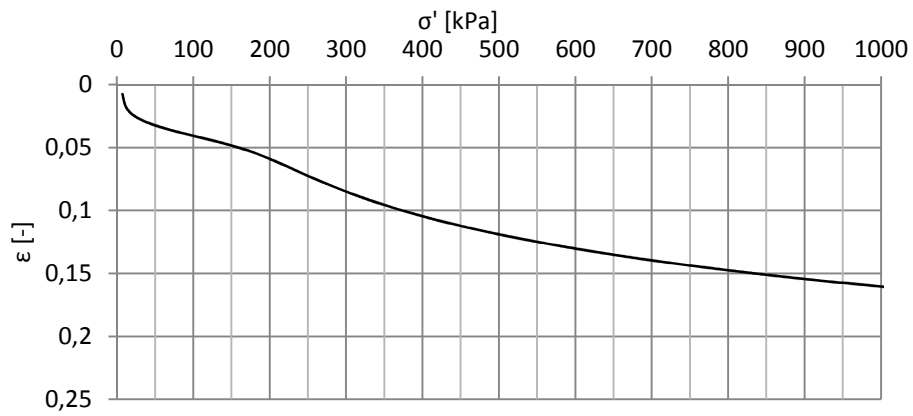
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

04.05.2012

Bilag: B 12



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R2\_5m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R2\_5,30

Dybde: 5,30m

$p'_c$  :160 kPa

m: 19

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 6,6 MPa

cv: 24

w: 33,5 %

$\Delta e/e_0$ : 0,081

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

03.05.2012

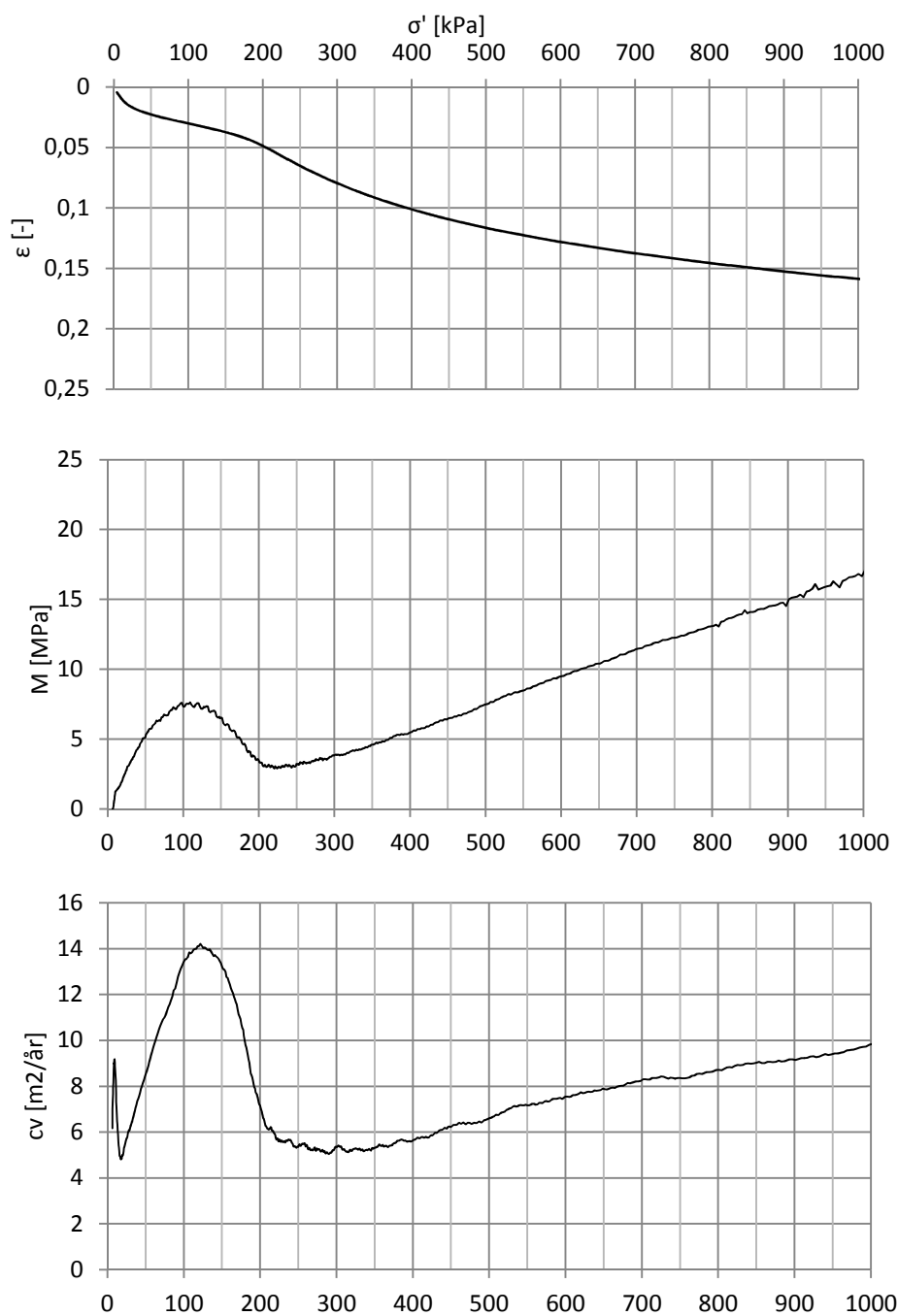
Dato prøveåpning:

03.05.2012

Dato forsøkskjøring:

03.05.2012

Bilag: B 13



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R2\_5m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R1\_5,65

Dybde: 5,65m

$p'_c$  : 165 kPa

m: 19

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 7,4 MPa

cv:14

w: 35 %

$\Delta e/e_0$ : 0,063

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

03.05.2012

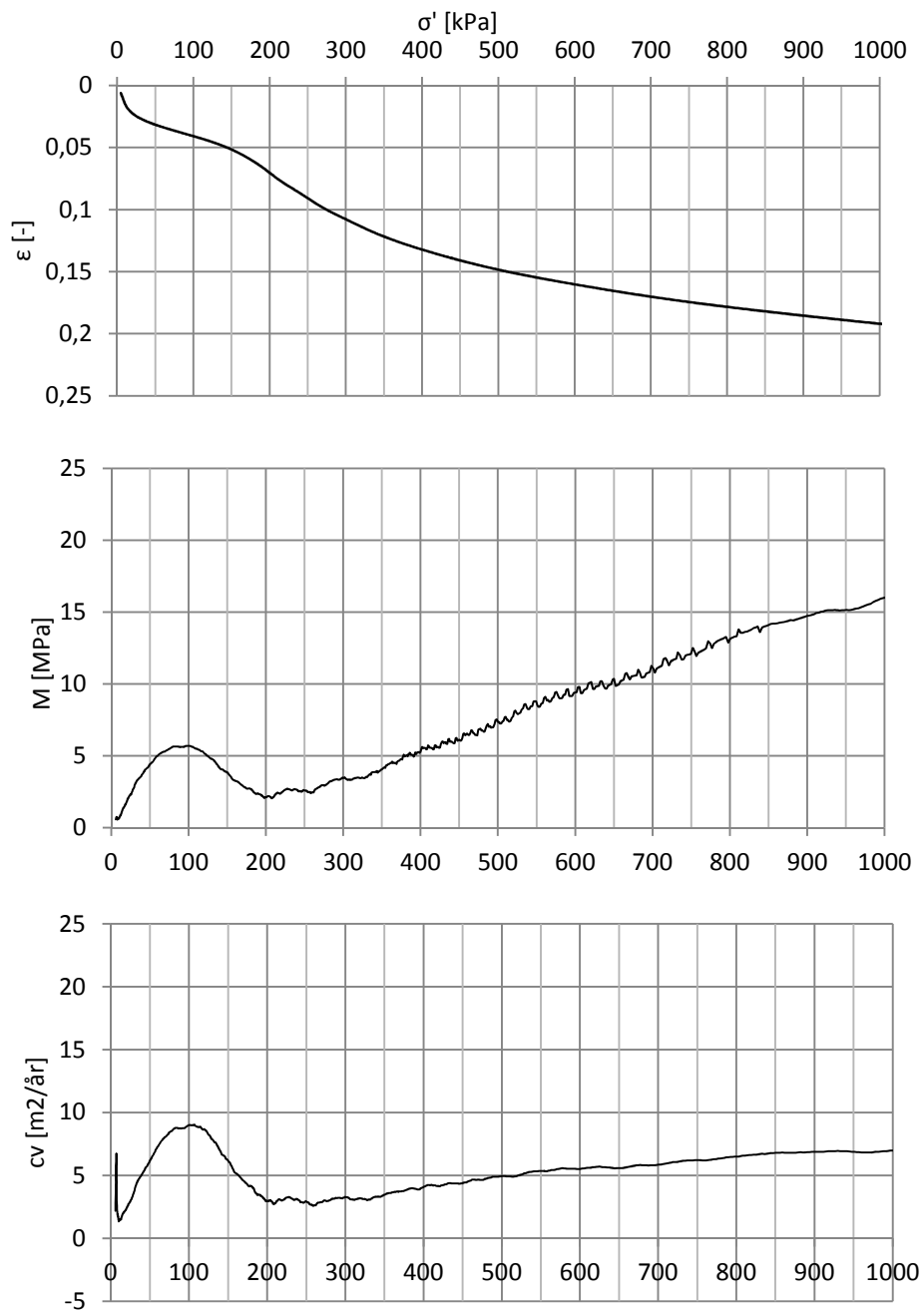
Dato prøveåpning:

03.05.2012

Dato forsøkskjøring:

03.05.2012

Bilag: B 14



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R2\_6m

Metode : Rotsjon

Prøve: V\_R2\_6,30

Dybde: 6,30 m

$p'_c$  : 157 kPa

m:20

$p'_{ref}$ : 150 kPa

M: 5,8 MPa

cv: 9

w: 39,1 %

$\Delta e/e_0$ : 0,074

Deformasjonshastighet:  
0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

03.05.2012

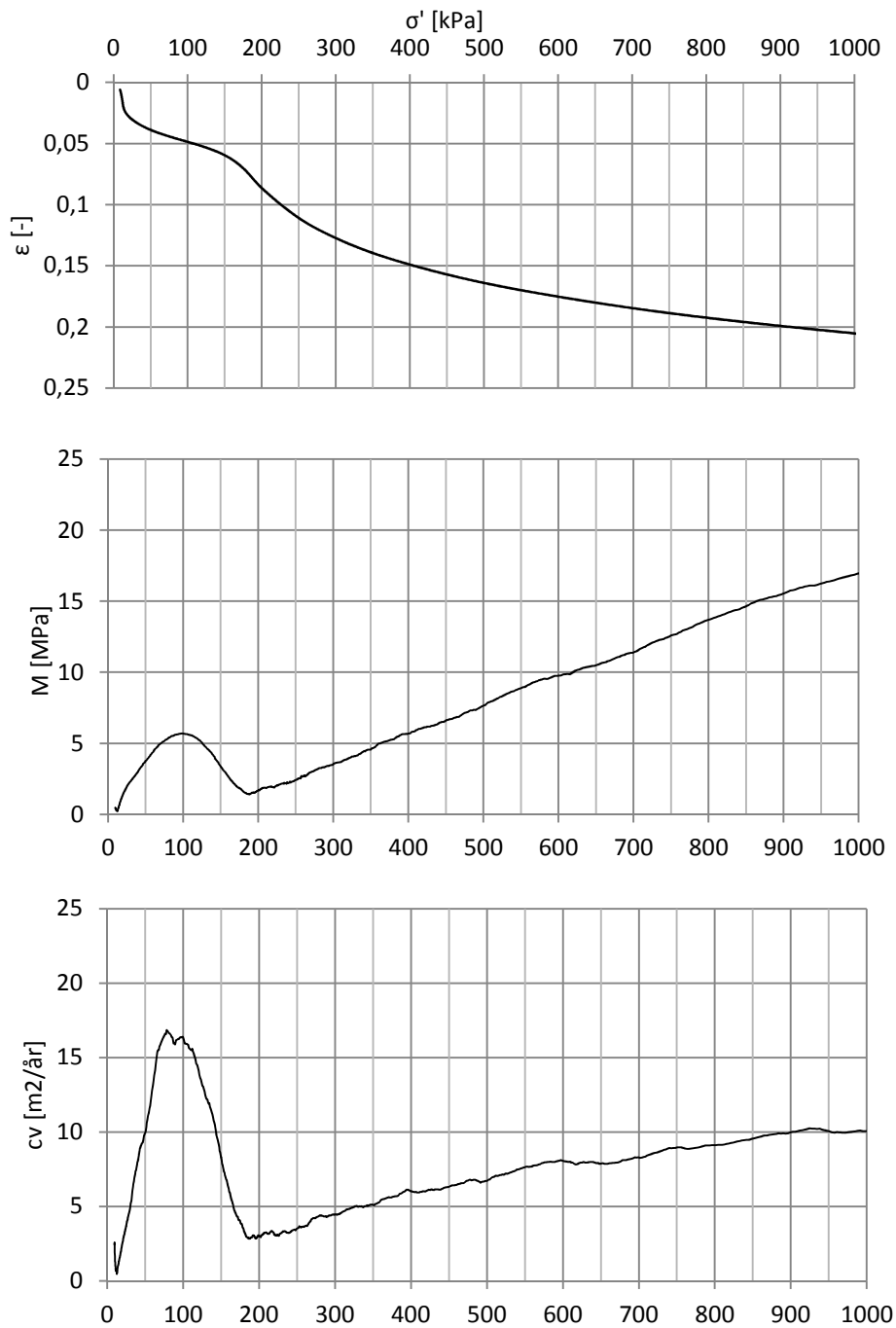
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

05.05.2012

Bilag: B 15



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_R2\_6m

Metode : Rotasjon

Prøve: V\_R1\_6,59

Dybde: 6,59 m

$p'_c$  : 165 kPa

m:20

$p'_{ref}$ : 130 kPa

M: 5,8 MPa

cv: 16

w: 37,9 %

$\Delta e/e_0$ : 0,091

Deformasjonshastighet:  
0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

03.05.2012

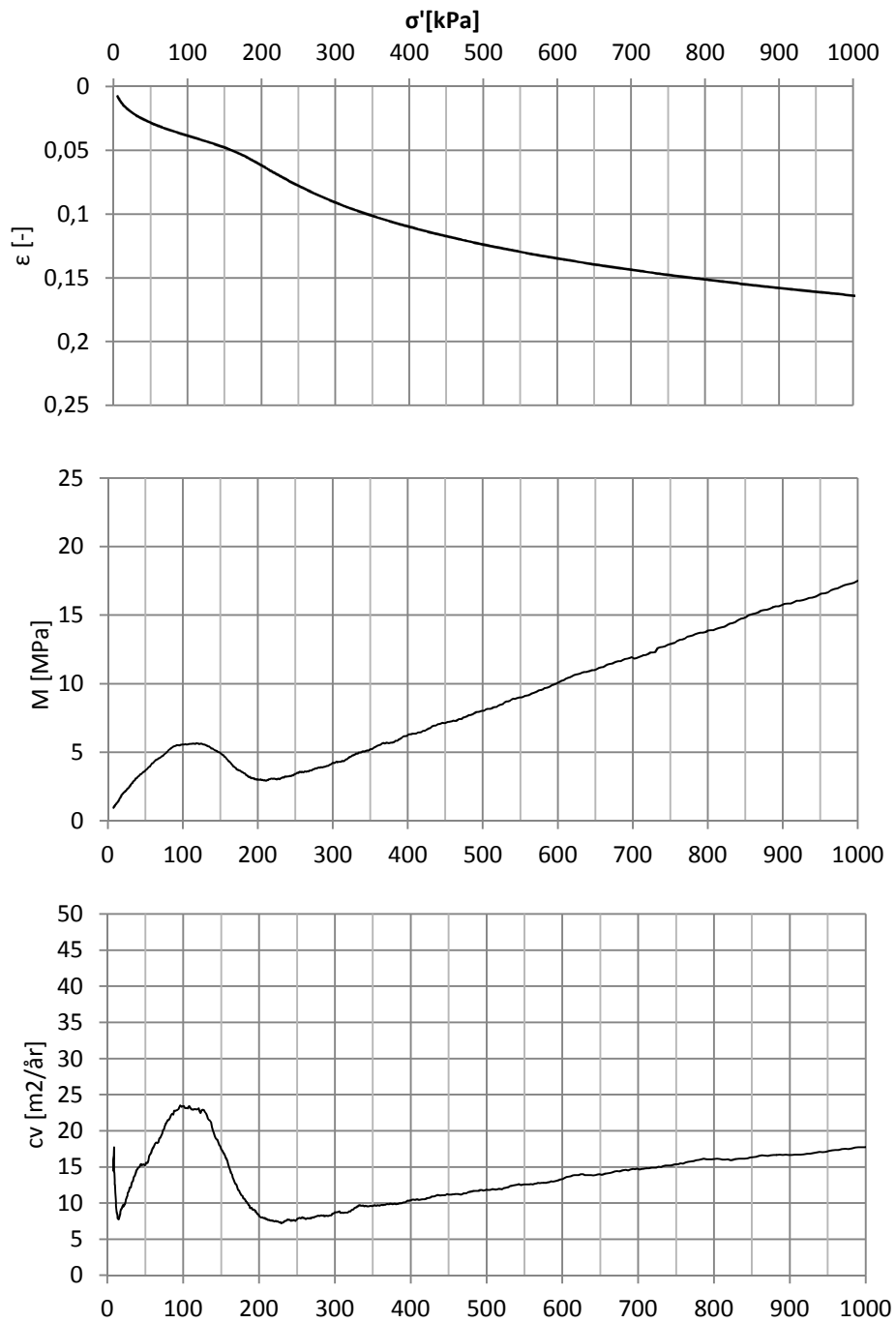
Dato prøveåpning:

04.05.2012

Dato forsøkskjøring:

05.05.2012

Bilag: B 16



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T1\_5m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T1\_5,30

Dybde: 5,30m

$p'_c$  : 155 kPa

m: 20,

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 5,5 MPa

cv: 23,5

w: 32,9 %

$\Delta e/e_0$ : 0,075

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

10.05.2012

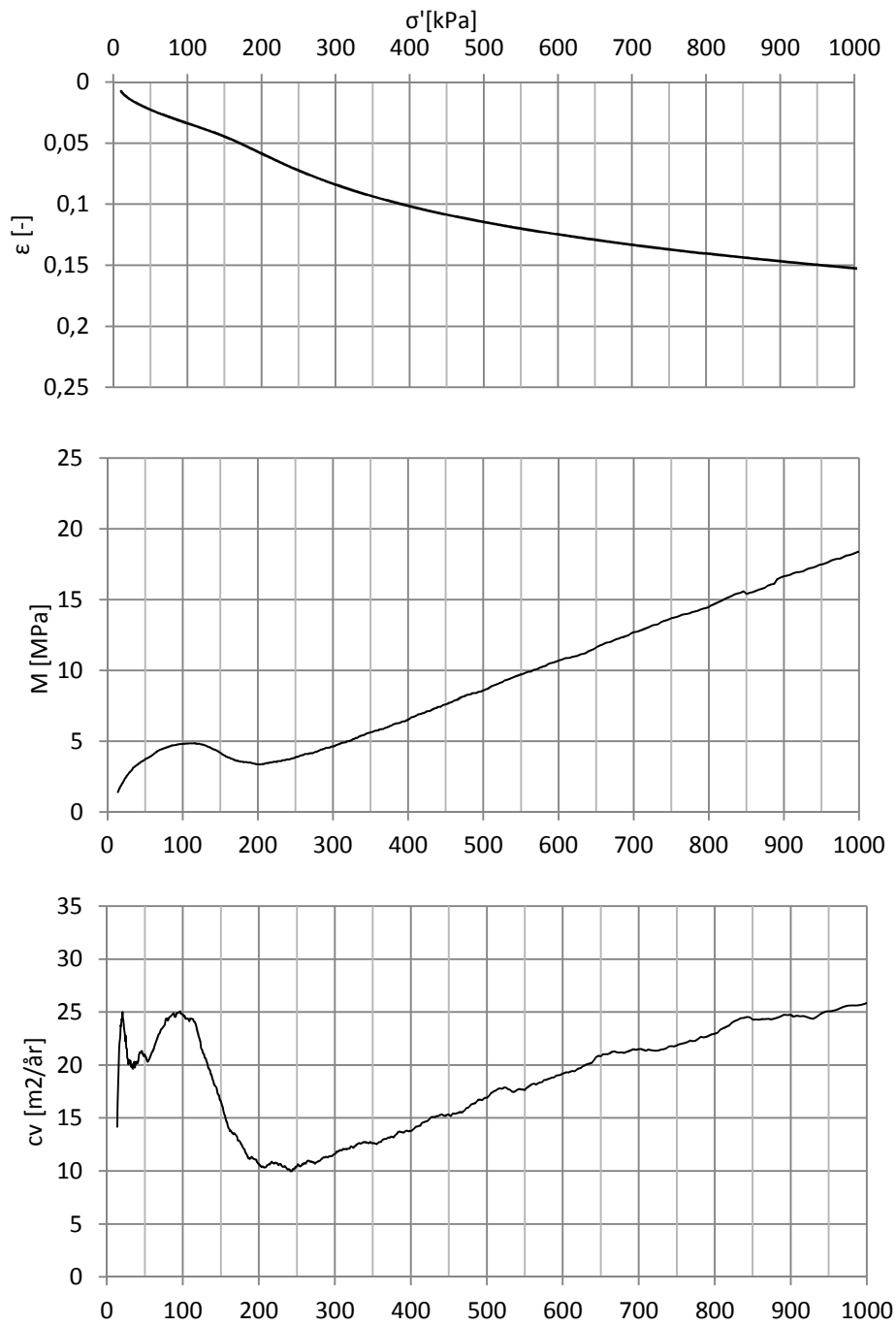
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

11.05.2012

Bilag: B 17



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T1\_5m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T1\_5,61

Dybde: 5,61m

$p'_c$  : 160 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 80 kPa

M: 4,9 MPa

cv: 25

w: 32,9 %

$\Delta e/e_0$ : 0,063

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

10.05.2012

Dato prøveåpning:

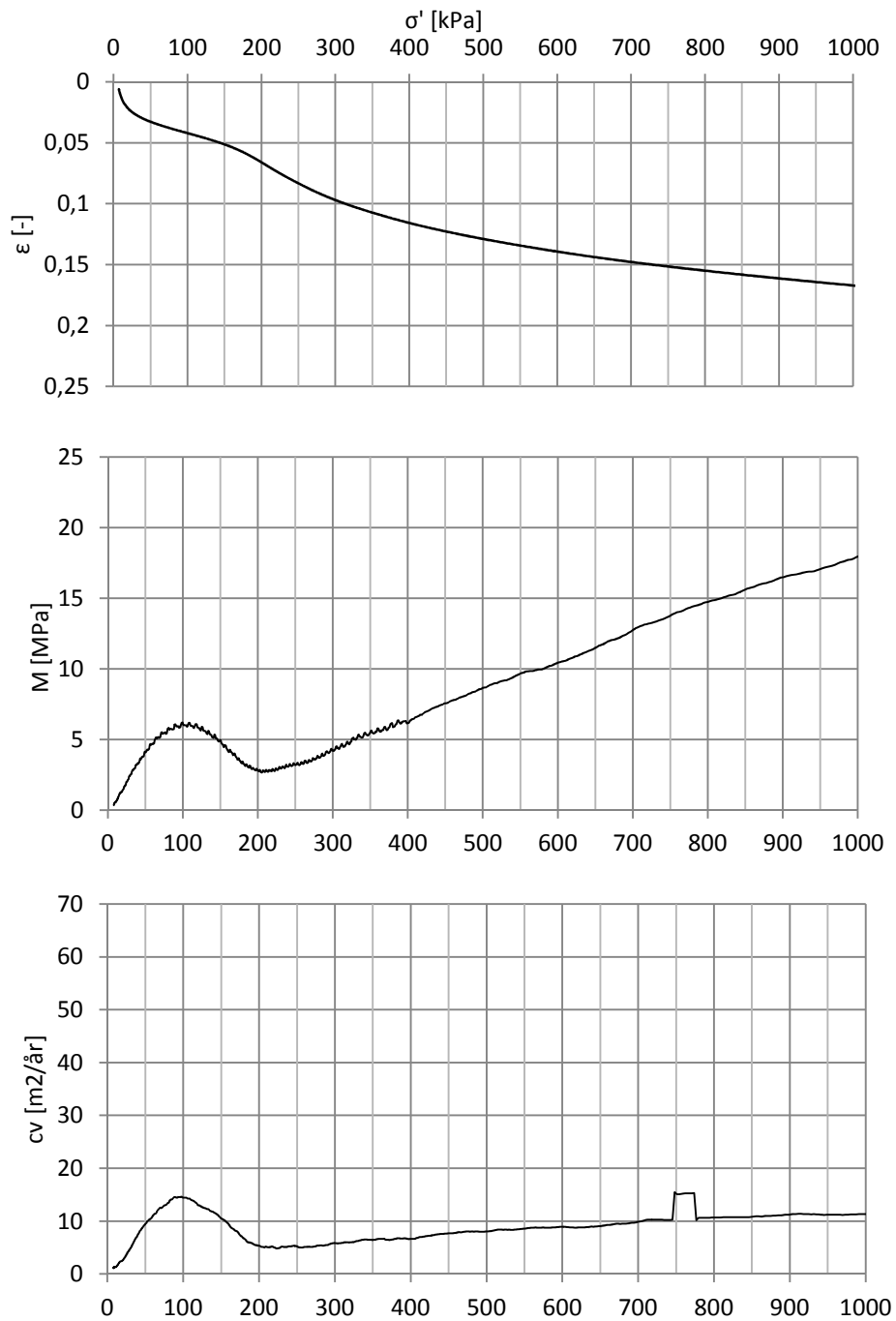
11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

11.05.2012

Bilag: B 18





### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T1\_6m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T1\_6,3

Dybde: 6,30 m

$p'_c$  : 160 kPa

m: 21

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 6,1 MPa

cv: 14,5

w: 34,3 %

$\Delta e/e_0$ : ,081

Deformasjonshastighet:  
0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

10.05.2012

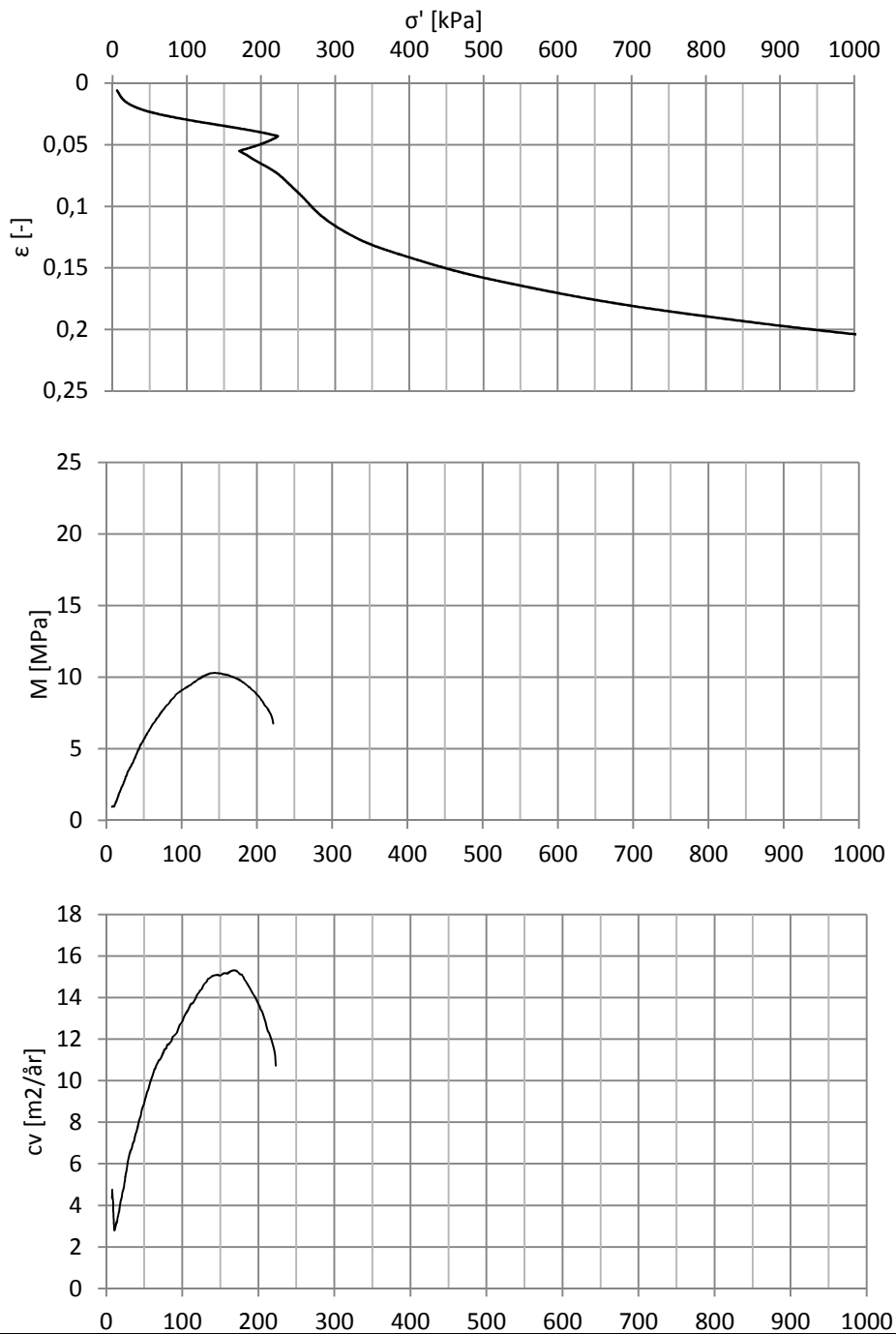
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

12.05.2012

Bilag: B 19



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T1\_6m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T1\_6,69

Dybde: 6,69m

$p'_c$  :

m:

M:

cv:

w: 40,2 %

$\Delta e/e_0$ : 0,059

Deformasjonshastighet:

0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

10.05.2012

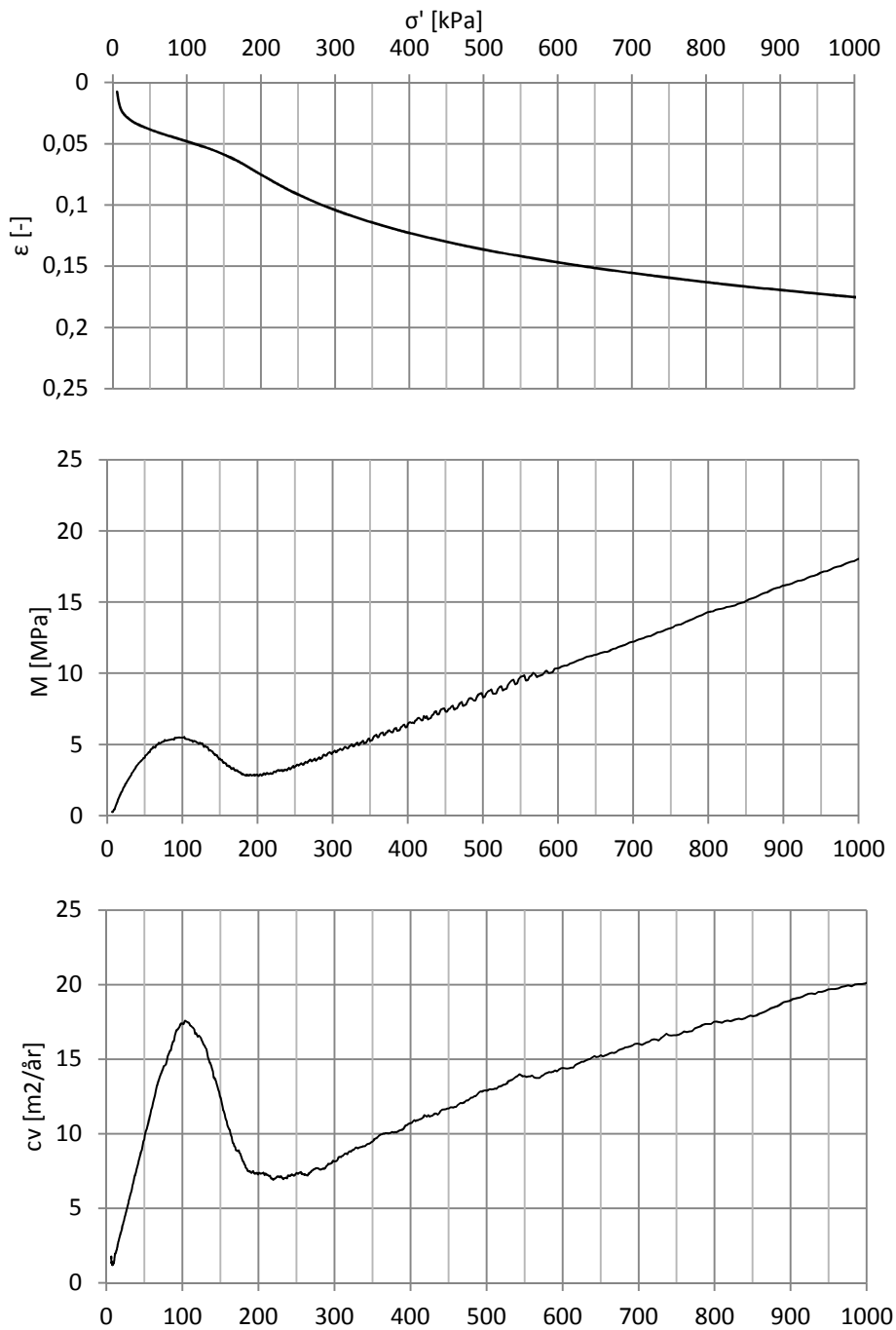
Dato prøveåpning:

11.05.2012

Dato forsøkskjøring:

12.05.2012

Bilag: B 20



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T2\_5m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T1\_5,27

Dybde: 5,27 m

$p'_c$  :150 kPa

m:17

$p'_{ref}$ : 0 kPa

M:5,5 MPa

cv: 17

w: 38,2 %

$\Delta e/e_0$ : 0,087

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

29.05.2012

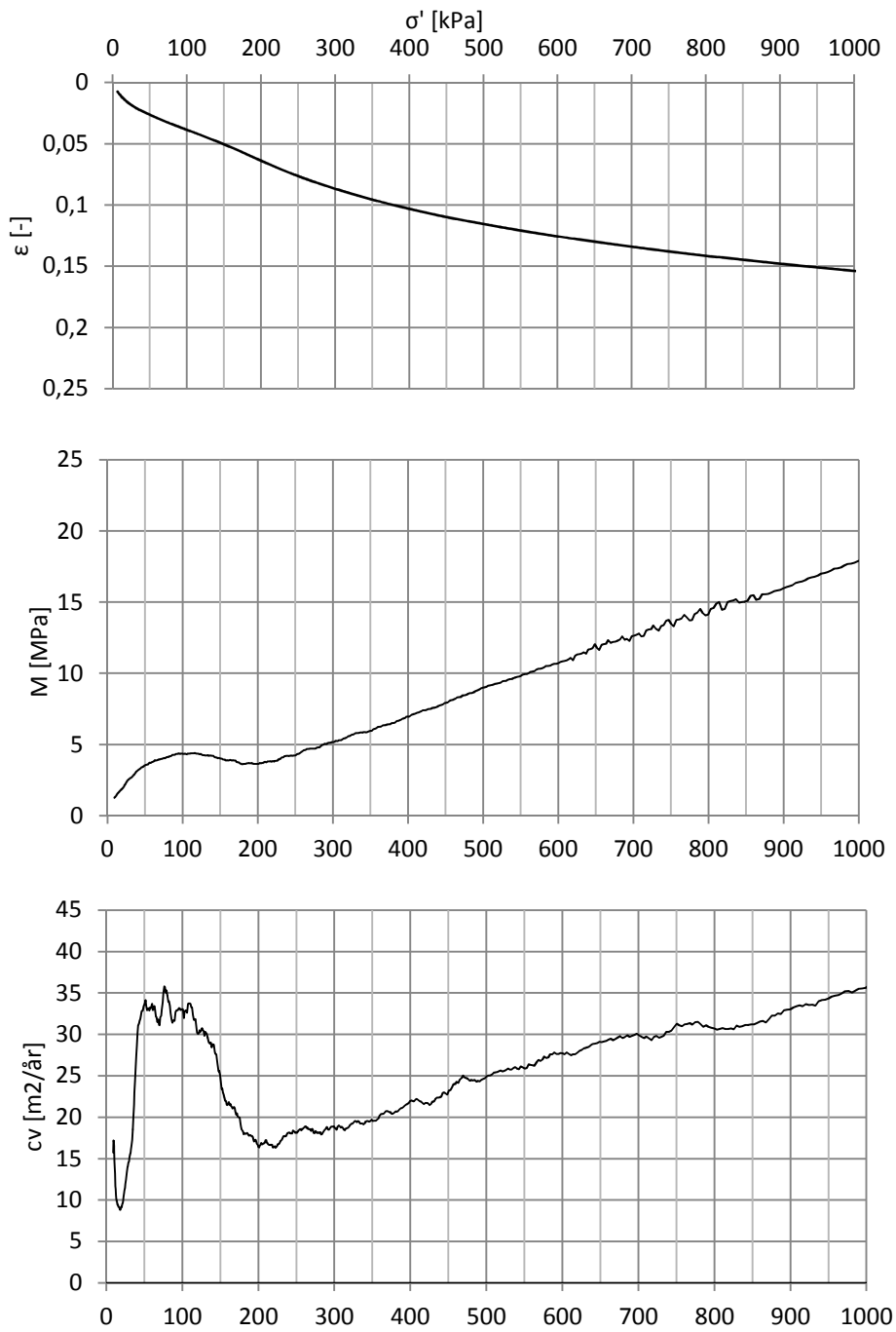
Dato prøveåpning:

29.05.2012

Dato forsøkskjøring:

29.05.2012

Bilag: B 21



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T2\_5m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T1\_5,56

Dybde: 5,56m

$p'_c$  : 150 kPa

m:17

$p'_{ref}$ : 0 kPa

M: 4 MPa

cv: 35

w: 34,6 %

$\Delta e/e_0$ : 0,067

Deformasjonshastighet:

0,005 mm/min

Dato prøvetaking:

29.05.2012

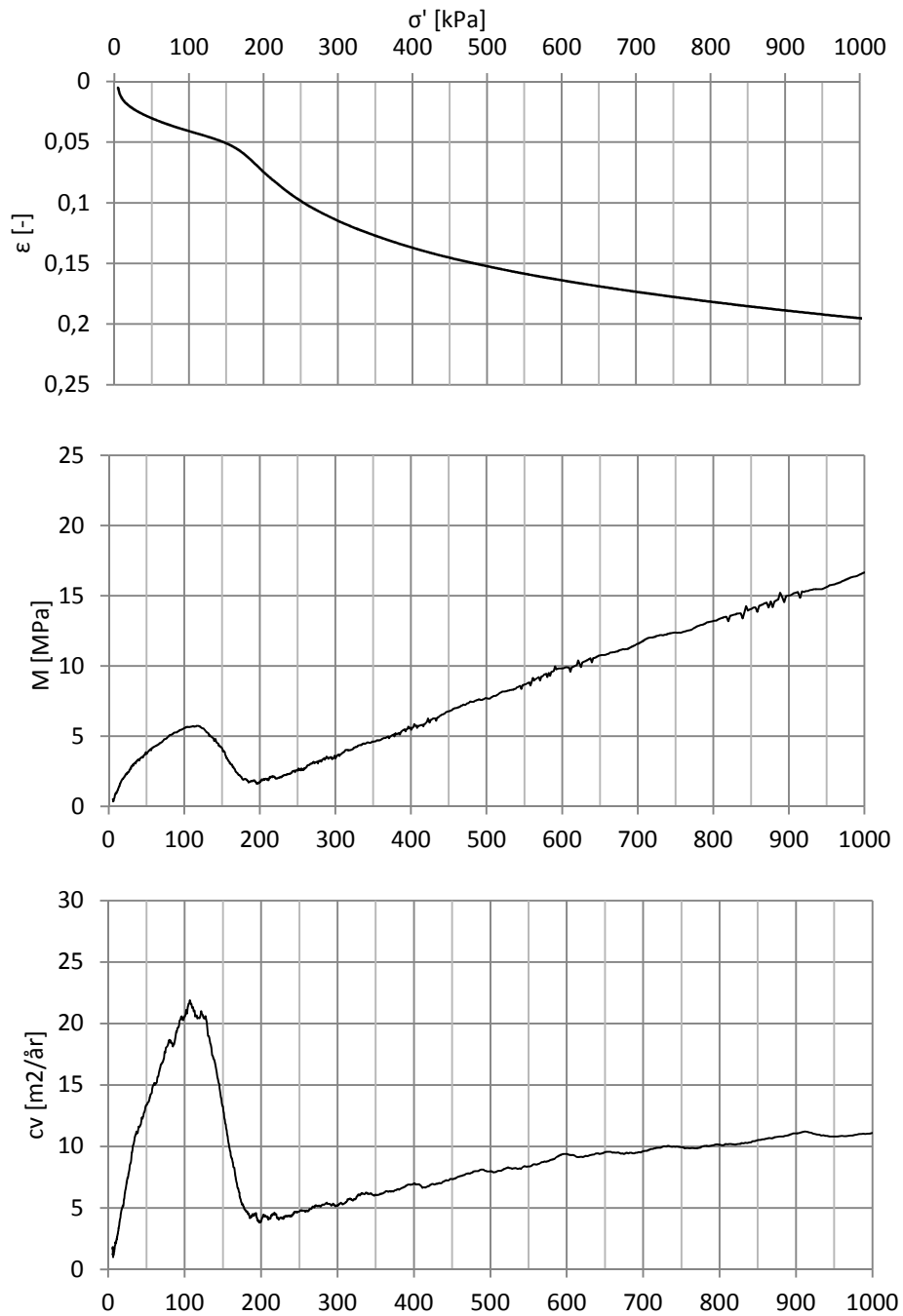
Dato prøveåpning:

29.05.2012

Dato forsøkskjøring:

29.05.2012

Bilag: B 22



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T2\_6m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T2\_6,28

Dybde: 6,28 m

$p'_c$  : 160 kPa

m:18,8

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M: 5,2 MPa

cv:21

w: 36,6 %

$\Delta e/e_0$ : 0,071

Deformasjonshastighet:

0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

29.05.2012

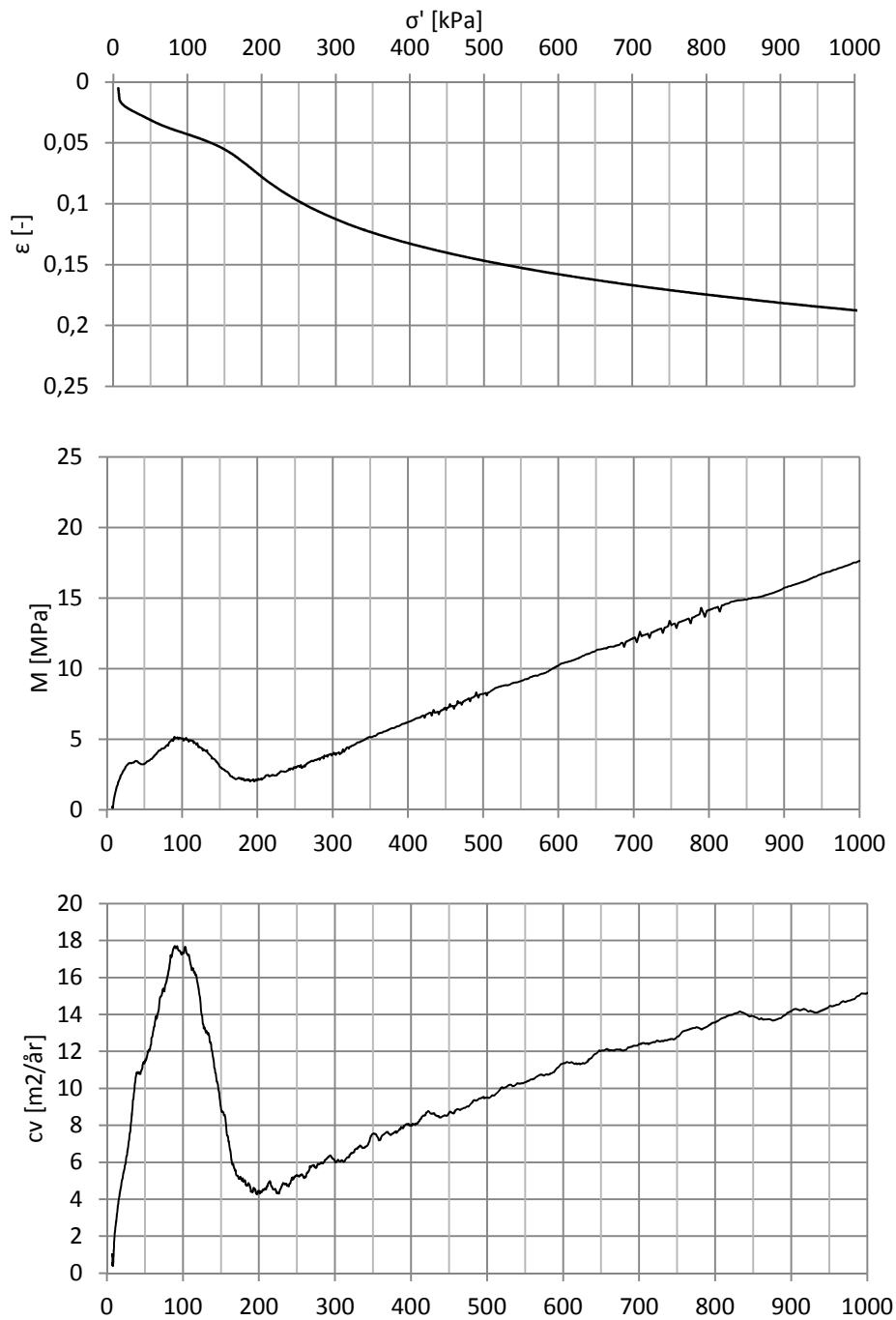
Dato prøveåpning:

30.05.2012

Dato forsøkskjøring

30.05.2012

Bilag: B 23



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Sylinder: V\_T2\_6m

Metode : Trekk

Prøve: V\_T2\_6,56

Dybde: 6,56m

$p'_c$  : 140 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 100 kPa

M:5 MPa

cv: 17,5

w: 37,2 %

$\Delta e/e_0$ : 0,067

Deformasjonshastighet:  
0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

29.05.2012

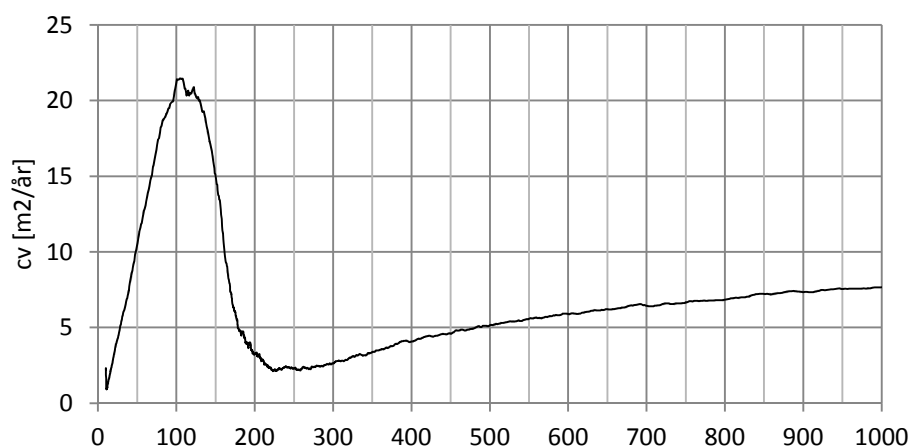
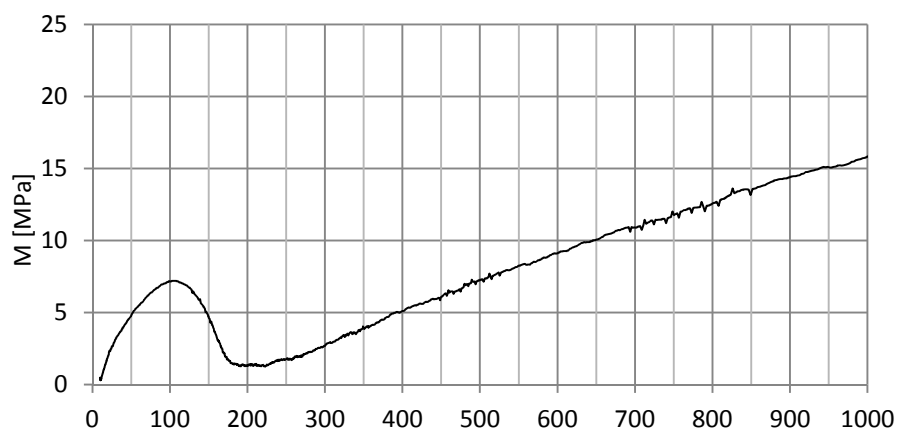
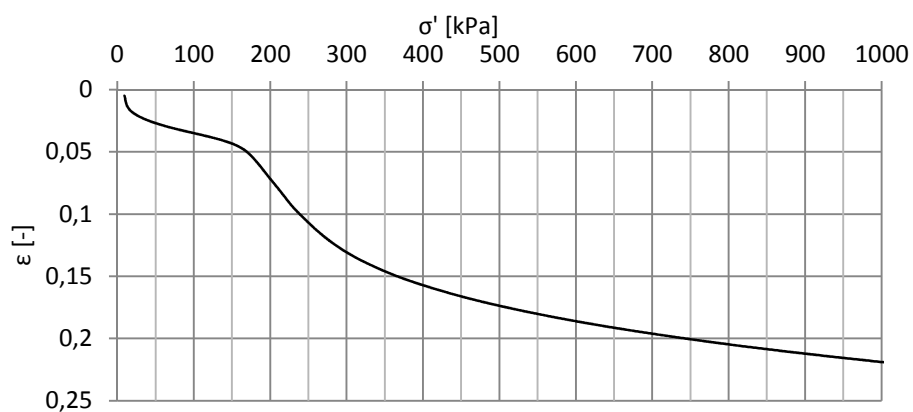
Dato prøveåpning:

30.05.2012

Dato forsøkskjøring:

30.05.2012

Bilag: B 24



### Prøveforstyrrelser - ødometerforsøk

**CRS**

Blokkprøve

Metode : Blokk

Prøve: Blokk\_9,25

Dybde: 9,25 m

$p'_c$  : 170 kPa

m: 20

$p'_{ref}$ : 150 kPa

M: 7 MPa

cv: 21

w: 41 %

$\Delta e/e_0$ : 0,065

Deformasjonshastighet:

0,0035 mm/min

Dato prøvetaking:

06.06.2011

Dato prøveåpning:

07.02.2012

Dato forsøkskjøring

07.02.2012

Bilag: B 25





## BILAG C- LAGRINGSTID

Oversikt over lagringstiden etter opptak for hver enkelt prøve og prøvestykke. Både fargekoding av antall dager (øverst) og nummereing av antall dager (nederst) er vist.

0 dager	1 dag	2 dager	3 dager	4 dager
---------	-------	---------	---------	---------

Sylinder	Tatt opp	Åpning+rutine	CRS	CIU,bunn	CIU , midt	CIU,topp
V_R1_5m	02.05.2012	02.05.2012	02.05.2012	02.05.2012	03.05.2012	04.05.2012
V_R1_6m	02.05.2012	04.05.2012	04.05.2012	04.05.2012	05.05.2012	06.05.2012
V_R2_5m	03.05.2012	03.05.2012	03.05.2012	03.05.2012	03.05.2012	06.05.2012
V_R2_6m	03.05.2012	04.05.2012	05.05.2012	04.05.2012	05.05.2012	06.05.2012
V_T1_5m	10.05.2012	11.05.2012	11.05.2012	11.05.2012	12.05.2012	13.05.2012
V_T1_6m	10.05.2012	11.05.2012	12.05.2012	11.05.2012	12.05.2012	14.05.2012
V_T2_5m	29.05.2012	29.05.2012	29.05.2012	29.05.2012	29.05.2012	30.05.2012
V_T2_6m	29.05.2012	30.05.2012	30.05.2012	30.05.2012	30.05.2012	31.05.2012
H_R1_5m	07.11.2011	07.11.2011	07.11.2011		08.11.2011	08.11.2011
H_T1_5m	21.11.2011	21.11.2011	21.11.2011	21.11.2011	22.11.2011	22.11.2011
H_T1_6m	21.11.2011	23.11.2011	23.11.2011	23.11.2011	23.11.2011	24.11.2011
H_T2_9m	15.11.2011	15.11.2011	15.11.2011	15.11.2011	15.11.2011	16.11.2011

Sylinder	Tatt opp	Åpning+rutine	CRS	CIU,bunn	CIU,midt	CIU,topp
V_R1_5m	02.05.2012	0	0	0	1	2
V_R1_6m	02.05.2012	2	2	2	3	4
V_R2_5m	03.05.2012	0	0	0	0	3
V_R2_6m	03.05.2012	1	2	1	2	3
V_T1_5m	10.05.2012	1	1	1	2	3
V_T1_6m	10.05.2012	1	2	1	2	4
V_T2_5m	29.05.2012	0	0	0	0	1
V_T2_6m	29.05.2012	1	1	1	1	2
H_R1_5m	07.11.2011	0	0		1	1
H_T1_5m	21.11.2011	0	0	0	1	1
H_T1_6m	21.11.2011	2	2	2	2	3
H_T2_9m	15.11.2011	0	0	0	0	1



## **VEDLEGG A – OPPGAVETEKST**



## TBA4510 Geoteknikk Masteroppgave, våren 2012

Stud. techn.  
**Idun Rabbås Holsdal**

### **Prøveforstyrrelser ved bruk av NGI 54 mm sylinderprøvetaker i leire – en studie av prosedyreeffekter**

*Specimen disturbance from clay sampling by use of NGI 54 mm cylinder sampler – a study of the effect of various sampling procedures*

#### **Bakgrunn**

Det er stor konsensus om at det i realiteten ikke er mulig å ta opp uforstyrrede leirprøver, enten det benyttes sylinderprøvetaker eller blokkprøvetaker. Den store forskjell ligger i hvor stor forstyrrelsen er og hvilken innvirkning den har på våre muligheter til å forstå jordens egenskaper. Dette har i de senere år har ført til at bruk av blokkprøver øker og jordegenskapene ”redefineres” basert på stadig bedre innsyn i den intrikate tilstand inne i en leirprøve utsatt for spenningsendringer og tøyninger.

I daglig praksis er det sylinderprøvetaking som benyttes – med de store begrensninger dette har. I diskusjonen om plastprøvetaker eller stål er det liten tvil om at stål gir minst forstyrrelse og bør brukes dersom prøvene skal benyttes til andre formål enn indekstesting og klassifisering.

Prøveforstyrrelser har mange årsaker og i tillegg til den rene avlastning til atmosfæriske forhold gjennomgår en prøve under sylinderprøvetaking flere ganger skjærpåvirkning, kompresjon, strekk og kanskje til og med ekstrudering ved utskyving i laboratoriet. Når vi vet at en sensitiv leirprøve når styrketaket etter mindre enn 1 % tøyning er det åpenbart at belastende prøvetaking ødelegger informasjonen om oppførselen før brudd. I denne sammenheng finner vi det interessant å undersøke hvordan forskjellige prosedyrer har innvirkning på resultatene – nærmere bestemt om det lønner seg å ”dra” prøvene av eller om rotasjon før opptrekk kan være å foretrekke.

NTNU Geoteknikks feltavdeling vil ta prøver med varierende prosedyrer på Tiller i Trondheim, et område som er godt dokumentert med hensyn på leiregenskapene. Det består av en ikke-sensitiv marin leire over kvikk leire. Prøver skal tas umiddelbart før prøving i laboratoriet og dermed skal tidseffekt av lagring minimaliseres.

#### **Innhold**

Studenten skal gjennomføre et litteraturstudium om prøveforstyrrelse ved prøvetaking og om mulig finne litteratur direkte relatert til temaet.

Studenten skal planlegge et felt- og laboratorieprogram for undersøkelse av prosedyrenes virkning på forstyrrelse og selv gjennomføre laboratorieundersøkelsene – i hovedsak klassifisering, ødometer og treaks – i et så stort omfang som mulig.

Det skal tilstrebes nøyaktig gjennomføring og klar rapportering av resultater både med hensyn på de faktisk oppnådde resultater men også på tidspunkter for prøvetaking – åpning og testing, visuelle betraktninger og forklaringer på eventuelle avvik.

#### **Omfang og levering**

Oppgaven har et omfang på 30 studiepoeng – dvs. tilsvarende et semester.

Arbeidet skal leveres i form av en teknisk rapport med innledning og problemformulering, bakgrunnsstudie av relevante mekanismer, og presentasjon av resultater fra studiet. Klare konklusjoner og forslag til videre arbeid vil bli kreditert.

Rapporten skal leveres i form av en uinnbundet original og to innbundne kopier. Digitalt skal det leveres en versjon av oppgaven samt alle laboratedata som er fremkommet, både rådatafiler og behandlede data og eventuelle film/videoopptak.

#### **Leveringsdato**

25. juni 2012