

# Tolkning av kryppparametere fra CRS- forsøk

**Kari Elisabeth Lien Johnsen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: desember 2016

Hovedveileder: Gustav Grimstad, BAT

Medveileder: Anders Samstad Gylland, Multiconsult ASA  
Samson Abate Degago, Statens vegvesen

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







Oppgavens tittel: Tolkning av krypparametere fra CRS-forsøk	Dato: 20.12.2016 Antall sider (inkl. bilag): 199
	Masteroppgave x Prosjektoppgave
Navn: Kari Elisabeth Lien Johnsen	
Faglærer/veileder: Gustav Grimstad	
Eksterne faglige veiledere: Anders Samstad Gylland Samson Abate Degago	

Ekstrakt:

Krypsetninger er viktig å inkludere i setningsberegninger, spesielt når man skal estimere forventede setninger gjennom en konstruksjons levetid. Uthenting av krypparametere tar imidlertid ofte lang tid, og kan som følge av dette bli nedprioritert.

Det er sett på muligheten til å tolke ut pålitelige krypparametere fra kontinuerlige ødometerforsøk (CRS). Om dette lar seg gjøre vil man oppnå stor tidsbesparelse i forhold til tradisjonelle, trinnvise ødometerforsøk (IL), og kryptsetninger kan få større prioritet.

To prosedyrer er foreslått, der begge tar utgangspunkt i godt dokumentert teori om forbindelsen mellom primære og sekundære setninger. Den ene metoden går ut på å legge inn ett kryptrinn i CRS-testen, mens den andre går ut på å variere tøyningshastigheten under forsøket. Det er i dette arbeidet lagt størst vekt på førstnevnte prosedyre.

Det er utført en rekke laboratorietester for å undersøke påliteligheten til krypparametere man får ut fra slike forsøk. For å vurdere dette er det for hver CRS-kryptest utført et IL-forsøk på materiale fra eksakt samme dybde. Ved sammenligning av disse forsøkene er man avhengig av god prøve kvalitet, og materialet er derfor fra miniblokkprøver. Laboratorieundersøkelsene ble gjort på både kvikkeleire og ikke-sensitiv leire fra Tiller, Grong og Lilleby. Det ble også utført en testserie på omrørt leire.

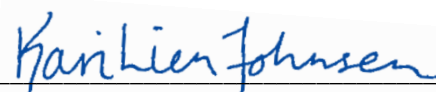
Det har vært krevende å sammenligne parallelle IL- og CRS-krypforsøk på grunn av prøveforstyrrelser. Dette har vist seg spesielt tydelig hos de sensitive leirene. Ved å legge størst vekt på testresultatene av best kvalitet er det likevel funnet å være et relativt godt samsvar mellom krypparametere oppnådd fra de parallelle forsøkene. Avvikene mellom dem er bedømt til å ikke være av kritisk størrelse. Ut fra datagrunnlaget fra gjennomførte laboratorieforsøk er det derfor konkludert med at det er mulig å tolke ut relativt tilfredsstillende krypparametere fra CRS-forsøk.

De to foreslåtte metodene viser seg å gi omtrent like gode resultater. Prosedyren med å variere tøyningshastighet har den fordel at man får god informasjon om krypparametere til et materiale ved flere spenningsnivå. Prosedyren med CRS-forsøk med ett kryptrinn gir imidlertid veldig god informasjon om krypparametere ved en spesifikk spenning, og tar kortest tid av de to forsøkene.

Ved videreføring av dette arbeidet anbefales det å legge enda større vekt på prøve kvalitet for å sikre et godt sammenligningsgrunnlag. Testene bør utføres på helt ferske prøver som, om mulig, verken er utsatt for lagring eller transport.

Stikkord:

1. Krypparametere
2. Ødometerforsøk
3. CRS-prosedyre
4. Blokkprøver

  
(sign.)



## **Forord**

Denne masteroppgaven er skrevet i siste og avsluttende semester ved studiet Bygg- og Miljøteknikk på NTNU.

Det har vært et innholdsrikt, spennende, utfordrende og ikke minst lærerrikt semester hvor hverdagen i stor grad har blitt styrt av pågående og planlagte ødometerforsøk. Oppgaven er skrevet individuelt, men med god hjelp og inspirasjon fra en rekke personer. Jeg vil gjerne takke mine veiledere Gustav Grimstad, Anders Gylland og Samson Degago for ideen til masteroppgaven og for god faglig oppfølging og veiledning underveis. Jeg vil også rette en takk til Helene Amundsen for hjelp med opptak av blokkprøver, samt veiledning og assistanse på laboratoriet. Jeg hadde likevel ikke klart å utføre alle forsøkene om det ikke var for Per Østensen som har hjulpet meg med alt av problemer med ødometerene. Også en stor takk til Frank Stæhli som ordnet laboratorieutstyr til meg på veldig kort varsel. Til slutt vil jeg takke mine medstudenter for mye trivelig sosial input underveis, og foreldrene mine som har lest korrektur på oppgaven.

K.E.L.J.



## Sammendrag

I den siste tiden er det blitt rettet større fokus mot levetidsaspektet i byggeprosjekter. Konstruksjoner skal ofte dimensjoneres for 50 til 100 år frem i tid, noe som blant annet betyr større krav til beregning av langtidssetninger. I forbindelse med dette er det viktig å ha kunnskap om jordas krypegenskaper. Uthenting av krypparametere tar imidlertid ofte lang tid, og kan som følge av dette bli nedprioritert.

Det er sett på muligheten til å tolke ut pålitelige krypparametere fra kontinuerlige ødometerforsøk (CRS). En måte å muliggjøre dette er å legge inn ett kryptrinn i CRS-testen hvor effektivspenningene holdes konstante over tid og materialet får anledning til å krype.

Ut fra godt dokumentert teori om at det eksisterer en unik forbindelse mellom primære og sekundære setninger, skal man ut fra kryptrinnet og CRS-delen av forsøket kunne beregne krypparameterne til materialet gjennom hele testen. Fordelen med en slik test er at den tar mye kortere tid sammenlignet med tradisjonelle, trinnvise ødometerforsøk (IL), og om resultatene viser seg å være tilfredsstillende kan det gjøre at krypsetninger får større prioritet.

Det er utført en rekke laboratorietester for å undersøke påliteligheten til krypparameterne man får ut fra slike forsøk. For å vurdere dette er det for hvert CRS-krypforsøk utført et IL-forsøk på materiale fra eksakt samme dybde.

Ved sammenligning av disse forsøkene er man avhengig av god prøvekvalitet, og materialet er derfor fra miniblokkprøver. Laboratorieundersøkelsene ble gjort på kvikkleire og ikke-sensitiv leire fra Tiller, Grong og Lilleby. Det ble også utført en testserie på omrørt leire.

En annen prosedyre som kan gi rom for tolkning av krypparametere fra CRS-forsøk er å variere tøyningshastigheten under forsøket. For sammenligning av de to prosedyrene er det også utført noen testserier av denne typen forsøk.

Det har vært krevende å sammenligne parallelle IL- og krypforsøk på grunn av prøveforstyrrelser. Dette har vist seg spesielt tydelig hos de sensitive leirene. Ved å legge størst vekt på testresultatene som viser god kvalitet er det likevel funnet å være et relativt godt samsvar mellom krypparameterne som er oppnådd fra de parallelle forsøkene. Avvikene mellom dem er bedømt til å ikke være av kritisk størrelse. Ut fra datagrunnlaget fra gjennomførte laboratorieforsøk er det derfor vurdert at det er mulig å tolke ut relativt tilfredsstillende krypparametere fra CRS-forsøk.

De to foreslåtte metodene viser seg å gi omtrent like gode resultater. Prosedyren med å variere tøyningshastighet har den fordel at man får god informasjon om krypparameterne til et materiale ved flere spenningsnivå. Prosedyren med CRS-forsøk med ett kryptrinn gir imidlertid veldig god informasjon om krypparameterne ved en spesifikk spenning, og tar kortest tid.

Ved videreføring av dette arbeidet anbefales det å legge enda større vekt på prøve kvalitet for å sikre et godt sammenligningsgrunnlag. Testene bør utføres på helt ferske prøver som, om mulig, verken er utsatt for lagring eller transport.

## **Abstract**

In the recent past it has been directed more attention towards the durability aspect in construction projects. Constructions will often be designed to stand for 50 to 100 years into the future, which means greater demands of the calculation of long-term settlements. When calculating long-term settlements it is important to have knowledge about the creep parameters to the soil. However, obtaining information of creep parameters often requires a long time, and can because of that get low priority.

The possibility of interpreting reliable creep parameters from continuous oedometer tests (CRS) is considered. A method in which this can be done is to include a load step in the CRS test which allows the material to creep. Based on well-documented theory that there exists a unique relationship between primary and secondary settlements, you should be able to calculate the creep parameters of the material throughout the test from the information in the load step and the CRS-curve from the test. The advantage of such a test is that it takes less time compared to traditional incremental loading oedometer tests (IL). If the results are satisfactory it may make lead to greater priority of creep settlement calculations.

It is carried out a number of laboratory tests to evaluate the reliability of the creep parameters from this kind of tests. To evaluate this there is for each creep test performed a corresponding IL-test on material from the exact same depth. When comparing these experiments, you are dependent on good sample quality. Therefore, the material is taken from miniblock samples. Laboratory tests were made on both sensitive and non-sensitive clay, from Tiller, Grong and Lilleby. It was also performed a test series on remoulded clay.

Another procedure that can provide interpretation of creep parameters from CRS tests is to vary the strain rate during the experiment. For comparison of the two procedures it is performed some test series of this type of experiment. It has been difficult to compare the corresponding IL and creep tests due to sample disturbance. This has proven particularly evident in the sensitive clays. By emphasising only test results showing good quality it is found to be a relatively good correlation between creep parameters obtained from the corresponding experiments. The variance between them is considered to be of a non-critical size. Based on data from the conducted laboratory experiments it's therefore concluded that it is possible to interpret relatively satisfactory creep parameters from CRS tests.

The two proposed methods proves to give about equally good results. The procedure of varying the strain rate has the advantage that you get information about the creep parameters of a material at several stress levels. The procedure with one load step in the CRS test gives on the other hand very good information about the creep parameters at a specific stress level, and takes less time than the other procedure.

In the furtherance of this work it's recommended to put even greater emphasis on sample quality to ensure a good basis for comparison. The tests should be performed on brand new specimens who preferably neither is subjected to storage or transport.



# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	iii
Abstract . . . . .	v
Figurliste . . . . .	x
Tabelliste . . . . .	xvi
Symbolliste . . . . .	xviii
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn for problemstilling . . . . .	1
1.2 Problemstilling . . . . .	3
1.3 Mål . . . . .	4
1.4 Disposisjon . . . . .	4
<b>2 Bakgrunn</b>	<b>5</b>
2.1 Krypteori . . . . .	5
2.1.1 Deformasjon . . . . .	6
2.2 Krypprosessen . . . . .	14
2.2.1 Effekten av kryp på et materiale . . . . .	15
2.2.2 Destrukturering . . . . .	18
2.2.3 Tiksotropi . . . . .	20
2.2.4 Effekten av kryp i praktisk sammenheng . . . . .	21

2.3	Modellering av kryp . . . . .	23
2.3.1	Metoder for tolking av krypparametere . . . . .	24
2.3.2	Beregningsmodeller . . . . .	28
2.3.3	Sammenheng mellom primære og sekundære deforma- sjonsparametere . . . . .	33
2.4	Effekt av prøveforstyrrelser . . . . .	35
2.4.1	Blokkprøver . . . . .	37
2.5	Modellering av kryp fra CRS-forsøk . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Laboratoriearbeid</b>	<b>45</b>
3.1	Prøvetaking . . . . .	45
3.2	Materialbeskrivelse . . . . .	47
3.2.1	Tiller . . . . .	47
3.2.2	Grong . . . . .	49
3.2.3	Lilleby . . . . .	49
3.2.4	Beskrivelse av blokkprøver . . . . .	50
3.3	Rutineundersøkelser . . . . .	52
3.4	Ødometerforsøk . . . . .	55
3.5	Klargjøring av prøvematerialet til ødometerforsøk . . . . .	57
3.6	Forsøkslokasjon . . . . .	60
3.7	Gjennomførte ødometerforsøk . . . . .	61
3.7.1	Trinnvise ødometerforsøk . . . . .	65
3.7.2	Kontinuerlige ødometerforsøk . . . . .	65
3.7.3	Krypforsøk . . . . .	65
3.7.4	CRS-forsøk med variert tøyningshastighet . . . . .	66
3.7.5	Rekonsolidering av omrørt prøve . . . . .	66

<b>4 Resultater</b>	<b>71</b>
4.1 Vurdering av prøve kvalitet . . . . .	72
4.1.1 IL-forsøk . . . . .	73
4.1.2 Krypforsøk . . . . .	77
4.2 Sammenligning av resultat fra IL-forsøk og krypforsøk . . . . .	80
4.3 Sammenligning og evaluering av $\Delta r_s$ . . . . .	91
<b>5 Diskusjon</b>	<b>97</b>
5.1 Evaluering av testserienes kvalitet og pålitelighet . . . . .	97
5.2 Utvikling av $\Delta r_s / r_s$ ved ulike effektivspenninger . . . . .	100
5.3 Sammenheng mellom $\Delta r_s$ og materialeegenskaper . . . . .	101
5.4 Tester på omrørt materiale . . . . .	101
5.5 Vurdering av krypparametere fra kryptester i forhold til IL-forsøk	103
5.6 Evaluering av de ulike testprosedyrene . . . . .	104
<b>6 Konklusjon og videre arbeid</b>	<b>107</b>
6.1 Videre arbeid . . . . .	108
<b>Bibliografi</b>	<b>110</b>
<b>A Fullstendig resultat fra ødometerforsøk</b>	<b>116</b>
A.1 Detaljert sammenligning av IL- og krypforsøk . . . . .	116
A.2 IL-forsøk . . . . .	132
A.3 Krypforsøk . . . . .	144
A.4 CRS-forsøk med variert tøyningshastighet . . . . .	158
A.5 CRS-forsøk . . . . .	161
A.6 $\sigma' - r_s$ -kurver fra IL- og krypforsøk i full skala . . . . .	169
<b>B Vurdering av prøve kvalitet</b>	<b>174</b>

<b>C Resultat fra rutineundersøkelser</b>	<b>176</b>
C.1 Kornfordelingsanalyse . . . . .	176
<b>D Konsolidering av omrørt leire</b>	<b>177</b>

# Figurliste

2.1	Setningsforløp (Janbu, 1989) . . . . .	8
2.2	Definisjon av «umiddelbar» og «forsinket» deformasjon sammenlignet med «primær» og «sekundær» deformasjon for en normalkonsolidert leire (Bjerrum, 1967) . . . . .	9
2.3	Forholdet mellom poretrykk, effektivspenning og tøyningshastighet for en leire utsatt for forsinket konsolidering (Bjerrum, 1967)	11
2.4	Effekten av spenning, tid og oppbyggingshistorikk på poretrykket til leire (Länsivaara, 1999). . . . .	16
2.5	Resultat fra laboratorietest på plastisk Drammen-leire, som viser effekten av økt motstand mot videre setninger etter 28 dager med forsinket konsolidering (Bjerrum, 1967) . . . . .	18
2.6	Resultat fra kontinuerlige ødometerforsøk på kvikkleire fra Grong ved dybde 9,3 m. I det ene forsøket er det lagt inn et 24-timers krepstrinn ved 700 kPa. . . . .	19
2.7	Resultat fra ødometerforsøk på uforstyrret og omrørt leire fra 6,5 m dybde (Burland, 1990) . . . . .	19
2.8	Resultat fra tiksotropitest på leire fra Mexicogulven med leirinnhold på 50%, $I_p = 40\%$ og $S_t = 3,5$ (Andersen mfl.) . . . . .	21

2.9	a) Kansai International Airport ( <a href="#">Airports, 2016</a> ) b) Original setningsberegning, målte setninger og oppdatert beregning ( <a href="#">Puzrin mfl., 2010</a> ) . . . . .	22
2.10	a) Millennium Tower i San Fransisco har sunket 40 cm på syv år, noe som kan få katastrofale følger ( <a href="#">Garathun, 2016</a> ), b) Havnelageret i Oslo fra 1920 er som følge av setninger utsatt for skader på fundament, gulv, vegger og trapper, noe som vil føre til høye rehabiliteringskostnader. ( <a href="#">Nikolaisen, 2014</a> ) . . . . .	23
2.11	Prinsippskisse av ødometer ( <a href="#">Sandven mfl., 2014</a> ) . . . . .	25
2.12	Prekonsolideringsspenning funnet fra ødometerforsøk ( <a href="#">Sandven mfl., 2014</a> ) . . . . .	26
2.13	Prinsippskisse for a) isotrop konsolideringsfase og b) udrenert skjærforsøk i treaksialtesting ( <a href="#">Emdal, 2009</a> ). . . . .	28
2.14	Oversikt over de tre fasene i et skjærkrypforsøk etter <a href="#">Torpe (2014)</a> . . . . .	29
2.15	Definisjoner av $R$ og $r_s$ . . . . .	30
2.16	Illustrasjon av forholdet mellom $C_\alpha$ og $C_c$ under sekundær deformasjon ( <a href="#">Mesri og Godlewski, 1977</a> ). . . . .	34
2.17	Resultater fra ødometerforsøk på blokkprøve og 54 mm sylindrerprøve, vist i $\sigma' - \epsilon$ -plott og $\sigma' - M$ -plott ( <a href="#">Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013</a> ). . . . .	37
2.18	Tøyningsratens påvirkning på effektivspenning ut fra a) CRS-tester med forskjellige tøyningsrater på Bäckebolleire ( <a href="#">Sallfors, 1975</a> ) og b) CRS-test med varierende tøyningsrate på leire fra Batiscan ( <a href="#">Leroueil mfl., 1985</a> ). . . . .	40
2.19	CRS-ødometerforsøk med varierende tøyningshastighet på Eberg-leire ( <a href="#">Länsivaara, 1999</a> ). . . . .	41

2.20	CRS-ødometerforsøk med tøyingsrate $\dot{\epsilon} = 3,333\mu m/min$ og et 24-timers kryptrinn ved $\sigma' = 200$ kPa. . . . .	43
3.1	a) NTNUs borerigg ( <a href="#">Multiconsult, 2016</a> ) b) Miniblokkprøvetakeren c) Prøve innpakket i folie. . . . .	46
3.2	a) Utpakket miniblokkprøve klar for oppdeling b) Oppdeling til ønskede stykker c) Oppdelt prøve til ødometerforsøk . . . . .	47
3.3	a) Lokasjon av Tiller forsøksfelt ( <a href="#">Norgeskart</a> ) b) Kvartærgeologisk kart over området ( <a href="#">NGU</a> ) . . . . .	48
3.4	a) Lokasjon av Grong ( <a href="#">Norgeskart</a> ) b) Kvartærgeologisk kart for området ( <a href="#">NGU</a> ) . . . . .	49
3.5	a) Lokasjon av Lilleby ( <a href="#">Norgeskart</a> ) b) Kvartærgeologisk kart for området ( <a href="#">NGU</a> ) . . . . .	50
3.6	Blokk 2 fra Tiller. . . . .	51
3.7	a) Blokk 3 b) Lagdeling, blokk 3 c) Blokk 4 d) Lagdeling blokk 4 . . . . .	52
3.8	a) Blokk 5 b) Stein funnet ved trimming av prøve til ødometerforsøk c) Stein fra blokkprøven. . . . .	53
3.9	a) Konusforsøk b) Vanninnhold c) Flytegrense d) Plastisitet . . . . .	53
3.10	Oppdeling av miniblokkprøve. . . . .	58
3.11	a) Trimming av prøve til ødometerforsøk b) Utglatting av prøvens overflater c) Ferdig trimmet prøve klar for testing . . . . .	59
3.12	a) Lab 1 b) Lab 2 . . . . .	61
3.13	a) Omrøring av leirmassene b) Sikting gjennom $500\mu m$ sikt c) Leire satt i vakuumapparat . . . . .	68
3.14	a) Stativ og sylinder b) Sylinder fylt med leire plassert i stativ, lastet på og dekket i plastfolie c) Konsolidering av prøven . . . . .	68

3.15 a) Omrørt leire konsolidert ved 12 kPa i 16 dager b) Utskyvning av prøven . . . . .	70
4.1 Resultat fra IL-forsøk på Tillerleire . . . . .	75
4.2 Resultat fra IL-forsøk på Grongleire . . . . .	76
4.3 Resultat fra krypforsøk på Tillerleire . . . . .	78
4.4 Resultat fra krypforsøk på Grongleire . . . . .	79
4.5 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 1 . . . . .	82
4.6 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 2 . . . . .	82
4.7 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 3 . . . . .	83
4.8 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 4 . . . . .	83
4.9 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 5 . . . . .	84
4.10 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 6 . . . . .	84
4.11 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 7 . . . . .	85
4.12 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 8 . . . . .	85
4.13 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 9 . . . . .	86



4.14 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 10. Kryptrinnet i krypforsøket er her lagt ved slutten av testen. . . . .	86
4.15 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 11. Kryptrinnet i krypforsøket er her lagt ved slutten av testen. . . . .	87
4.16 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 12 på omrørt, rekonsolidert leire . . . . .	87
4.17 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 13, hvor $r_s$ til CRS-testen er funnet ved å variere tøyningshastigheten under forsøket . . . . .	88
4.18 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryp- forsøk i testserie 14, hvor $r_s$ til CRS-testen er funnet ved å variere tøyningshastigheten under forsøket . . . . .	88
4.19 $\Delta r_s/r_s$ ved ulike effektivspenninger fra testserier på omrørt leire og leire fra Tiller og Lilleby . . . . .	92
4.20 $\Delta r_s/r_s$ ved ulike effektivspenninger fra testseriene på Grong-leire	92
4.21 Sammenheng mellom $\Delta r_s/r_s$ og naturlig vanninnhold . . . . .	94
4.22 Sammenheng mellom $\Delta r_s/r_s$ og sensitivitet . . . . .	94
4.23 Sammenheng mellom $\Delta r_s/r_s$ og flyteindeks . . . . .	95
4.24 Sammenheng mellom $\Delta r_s/r_s$ og plastisitetsindeks . . . . .	95
4.25 Sammenheng mellom $\Delta r_s/r_s$ og lagringstid . . . . .	96
4.26 Sammenheng mellom $\Delta r_s/r_s$ og forskjellen mellom vanninn- hold i IL- og krypforsøk fra samme testserie . . . . .	96

- 5.1 Utvikling av tidsmotstand fra korresponderende lasttrinn i testene IL-012 og CRS-112. a)  $r_s$  fra CRS-112 funnet etter 24 timer, og  $r_s$  fra IL-012 funnet etter 6 timer. b)  $r_s$  bestemt etter 6 timer i begge forsøkene. . . . . 102
- 5.2 Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krypforsøk i testserie 12 basert på tidsmotstand ved trinntid på 6 timer 103

# Tabelliste

2.1	Oversikt over de ulike parameterne for ulike beregningsmodeller	32
2.2	Vurdering av prøveforstyrrelser basert på endring i porettall (Lun- ne mfl.) . . . . .	36
3.1	Resultat fra rutineundersøkelsene på blokkprøvene som er brukt i laboratoriearbeidet. . . . .	55
3.2	Oversikt over gjennomførte ødometerforsøk . . . . .	63
3.3	Oversikt over gjennomførte ødometerforsøk . . . . .	64
4.1	Oversikt over gjennomsnittlig $\Delta r_s/r_s$ for alle testserier . . . . .	91
B.1	Vurdering av prøve kvalitet . . . . .	175

## Symbolliste

**a** Attraksjon

**e** Poretall

**S<sub>u</sub>** Udrenert skjærstyrke

**Su<sub>r</sub>** Omrørt skjærstyrke

**S<sub>t</sub>** Sensitivitet

**u** Poretrykk

**k** Permeabilitetskoeffisient

**K'<sub>0</sub>** Effektiv hviletrykkskoeffisient

**M** Ødometermodul

**m** Modultall

**c<sub>v</sub>** Konsolideringskoeffisient

**R** Tidsmotstand

**r<sub>s</sub>** Tidsmotstandstall

**w** Vanninnhold

**w<sub>L</sub>** Flytegrense

**w<sub>P</sub>** Plastisitetsgrense

**I<sub>L</sub>** Flyteindeks

**I<sub>P</sub>** Plastisitetsindeks

**ρ** Densitet

## TABELLISTE

$\gamma$  Tyngdetetthet

$\gamma_w$  Tyngdetetthet til vann

$\varphi$  Friksjonsvinkel

$\epsilon$  Tøyning

$\sigma$  Totalspenning

$\sigma'$  Effektivspenning,  $\sigma' = \sigma - u$

$\sigma'_{v0}$  Initial vertikalspenning

$\sigma'_{h0}$  Initial horisontalspenning

$p'_c$  Prekonsolideringsspenning

$\sigma'_m$  Middelspenning,  $\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) = p'$

$\sigma'_d$  Deviatorisk spenning,  $\sigma'_d = \sigma'_1 - \sigma'_3 = q$

$\sigma_1$  Største hovedspenning

$\sigma_3$  Minste hovedspenning

**IL** Incremental Loading, trinnvist ødometerforsøk

**CRS** Constant Rate of Strain, kontinuerlig ødometerforsøk

**NC** Normalkonsolidert

**OC** Overkonsolidert

**OCR** Overkonsolideringsgrad

**NGF** Norsk Geoteknisk Forening

**NGI** Norges Geotekniske Institutt



# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn for problemstilling

Grunnens deformasjonsegenskaper utgjør en sentral og viktig rolle innenfor geoteknisk prosjektering. Alle geomaterialer, enten det er sand, leire, silt eller torv, utsettes for deformasjoner og forandringer over tid, og dette er viktig å inkludere ved planlegging og utføring av byggeprosjekter. Setninger er et betydelig problem i de fleste byggeprosjekter, og kan gi store konsekvenser om det ikke tas hensyn til.

Setningsskader på bygg, veier eller andre konstruksjoner kan føre til stor slitasje, behov for massivt vedlikehold, ombygging eller riving, nedsatt levetid, og i verste fall kollaps. Det skjeve tårn i Pisa er et kjent eksempel på en konstruksjon som har blitt betydelig utsatt for setninger. Andre eksempler er Oslo Postterminal som har en setningshastighet på 1,6 mm/år ([Karlsruud, 2015](#)) og Kansai internasjonale flyplass i Japan som synker med en hastighet på 7 cm per år ([Puzrin mfl., 2010](#)).

Grunnens totale setningsforløp kan beskrives ut fra tre setningsbidrag; ini-

tiale setninger, primære setninger og sekundære setninger.

Setninger opptrer gjennom hele levetiden til konstruksjonen, og i den siste tiden er det blitt rettet større fokus mot levetidsaspektet i byggeprosjekter. Levetiden blir i Norge ofte satt til 50 eller 100 år, noe som uttrykker hvor lenge det er forventet at infrastrukturen eller konstruksjonen skal fungere på normalt vis uten behov for omfattende vedlikehold eller renovasjon.

Som en følge av dette blir det satt høyere krav til estimering av setninger som skjer over lang tid, for å kunne forutsi hva som vil skje i løpet av konstruksjonens levetid. Langtidssetninger er dominert av krypdeformasjoner, som er deformasjoner som oppstår under tilnærmet konstante effektivspenninger over tid. For god estimering av langtidsdeformasjoner kreves det at man har gode og effektive prosedyrer for å tolke ut korrekte krypparametere fra de aktuelle materialene.

På grunn av den praktiske betydningen av kryp er dette blitt studert av mange forskere i lang tid. Helt siden 1920-årene er det blitt gjort arbeider for å finne gode metoder og prosedyrer for å tolke ut krypparametere og estimere langtidssetninger. Det finnes gode felt- og laboratoriemetoder for dette, hver med sine egne teorier og konsepter. Temaet er fortsatt under utvikling og det er fremdeles ingen enighet om hvilken metode som er best og som gir mest pålitelige resultater med et fornuftig tidforbruk. Optimalt sett ønsker man en metode som tar kort tid, og som beskriver de fremtidige setningene på en troverdig og virkelighetsnær måte.

Det fireårige forskningsprosjektet, CREEP, ble i 2011 opprettet for å utvikle og supplere industrien med bedre designverktøy og kunnskap som trengs



i forbindelse med kryp. Det er et EU-støttet prosjekt som har sett mye på utfordringene som kommer av å ha for liten kunnskap og for mange ulike beregningsverktøy for kryp, noe som skaper forvirring blant geoteknikere og hindrer utvikling og bruk av avanserte modeller. Det ble derfor formulert og vurdert en rekke tidsavhengige krypmodeller for både leire, torv, sand og fros-sen grunn, og arbeidet for å opprette innovative verktøy for krypmodellering i byggeprosjekter ([Grimstad mfl.](#)).

Statens vegvesen holder dessuten i øyeblikket på med å revidere og oppgraderer Håndbok V220 for geoteknikk i vegbygging. Deres kapittel om setningsberegninger, som brukes hyppig i Norge, vil bli kraftig oppgradert. Viktige aspekter rundt kryp vil bli introdusert med fokus på framtidige forbedringer ([Degago, 2011](#)).

### **1.2 Problemstilling**

I denne oppgaven blir det sett på muligheten til å kunne determinere krypparameterne til leire ved å endre på prosedyren til konvensjonelle CRS-ødometerforsøk. Den endrede prosedyren går ut på å legge inn ett kryptrinns i forsøket hvor effektivspenningene holdes konstante over tid og materialet får anledning til å utvikle krypdeformasjoner. Ut fra godt dokumentert teori fra [Mesri og Godlewski \(1977\)](#) om at det eksisterer en unik sammenheng mellom primære og sekundære setninger, kan man ut fra kryptrinnet og CRS-delen av forsøket beregne krypparameterne til et materiale gjennom hele testen. Fordelen med en slik kryptest er at den tar mye kortere tid sammenlignet med tradisjonelle, trinnvise ødometerforsøk (IL). En slik prosedyre kan derfor bidra til at dimensjonering av krypdeformasjoner får større prioritet. Det skal

undersøkes om informasjonen man får fra slike forsøk er tilstrekkelig for å determinere langtidssetninger på en pålitelig måte.

For å besvare denne problemstillingen skal det gjøres et litteraturstudie på tidligere arbeider som omhandler kryp, samt et omfattende laboratoriearbeid. Testmaterialet vil i hovedsak være trøndersk leire. Hensikten er å samle inn nok empiriske data til å oppnå målet i oppgaven.

### **1.3 Mål**

Hovedmålet i denne masteroppgaven er å undersøke, på grunnlag av laboratoriearbeider, om man kan benytte CRS-ødometerforsøk med ett kryptrinn for å oppnå tilstrekkelig informasjon om en leires krypegenskaper.

### **1.4 Disposisjon**

Oppgaven er disponert slik at all teori som ligger til grunn for besvarelse av problemstillingen blir presentert i kapittel 2. Kapittel 3 tar for seg beskrivelse av prøvemateriale, forsøkslokasjon og prosedyre for gjennomførte laboratorietester, og resultat fra forsøkene er gitt i kapittel 4. En grundig diskusjon av resultatene er gjort i kapittel 5, og konklusjoner og videre arbeid er fremstilt i kapittel 6. Fullstendig resultat fra laboratorieundersøkelsene er vist i vedlegg.

# Kapittel 2

## Bakgrunn

I dette kapittelet vil teori som ligger til grunn for å besvare problemstillingen bli presentert. Teorien i denne masteroppgaven vil i størst mulig grad omhandle kryp, men også andre relevante tema som kan knyttes opp til problemstillingen vil bli tatt opp.

### 2.1 Krypteori

Tidligere forskning på kryp har fokusert mest på materialer som bløt leire og silt. Forekomster av bløt leire har en sterk tendens til å gjennomgå store krypdeformasjoner, selv under primærkonsolideringen. Kryp vil i teorien være vel så utbredt i torv, sand og varm permafrost.

Siden det finnes mest informasjon og forskning som omhandler kryp i leire vil hovedfokuset i denne oppgaven også være på leire.

### 2.1.1 Deformasjon

For å forstå jordas oppførsel og bakgrunnen til kryp må man vite noe om grunnens deformasjonsforløp. Vertikale deformasjoner i geomaterialer omtales gjerne som setninger. Geomaterialer kan man se på som en samlebetegnelse for de materialene man finner i grunnen, eksempelvis leire, silt, sand, grus og torv. Alt som bidrar til belastning av grunnen fører til setninger. Setninger oppstår også grunnet naturlige prosesser og kontinuerlige endringer i naturen. De største og mest kritiske setningene oppstår imidlertid i forbindelse med byggeprosjekter, der man belaster grunnen med de planlagte konstruksjonene og alt av utstyr som er nødvendig for utførelse av prosjektet. Setninger kan gi kritiske konsekvenser om man ikke er forberedt på dem, så det er svært viktig å ta høyde for dem i dimensjoneringen.

De totale setningene som jorda blir utsatt for separeres gjerne i tre bidrag for å kunne begrense problemet for mer praktisk bruk i geoteknisk prosjektering:

*Initiale setninger* er vertikale deformasjoner som oppstår umiddelbart etter belastning. Disse deformasjonene kommer av skjærtøyninger og formendring, og kan enten være plastiske eller elastiske. I det jorda blir belastet utvikles et poreovertrykk. Initialsetningene oppstår i løpet av byggeperioden, som følge av last fra anleggsmaskiner, byggematerialer og lignende, og blir ofte stipulert ved slutten av byggeprosessen.

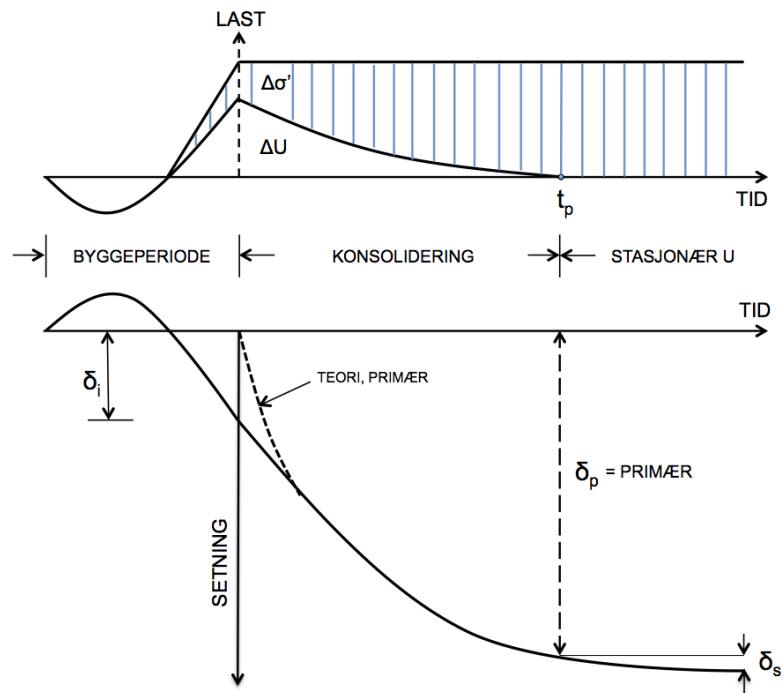
*Primærsetninger* er vertikale deformasjoner som oppstår som følge av konsolidering. Poreovertrykket som genereres i initialfasen blir her drenert bort, og materialets porevann presses ut slik at det resterende poretrykket reduseres. Primærsetningene utvikles altså i takt med at de resterende totalspenningene overføres til effektivspenninger (Jacobsen, 1993). De primære setningene

er en funksjon av dreneringsforholdene. De tar kort tid i permeable masser som sand og grus, og lengre tid i mer kompakte masser som leire og silt der dreneringen går saktere. Disse setningene utgjør ofte en stor del av totalsetningene, og oppstår raskere enn sekundærsetninger.

*Sekundærsetninger* er vertikale deformasjoner som er tidsavhengige og som oppstår under omtrent konstante effektivspenninger. Det som dominerer sekundærsetningene er kryp, og man omtaler ofte sekundærsetninger som krypdeformasjoner. Kryp kan defineres som en tidsavhengig prosess der materialer utvikler deformasjoner under påvirkning av omtrent konstante effektivspenninger over tid. Disse setningene kan fortsette i lang tid etter at de primære setningene er avsluttet (Vegvesen, 2010). Primærsetninger øker etter hvert som belastningen øker, men for sekundærsetninger har man ikke denne sammenhengen. Disse setningene kan enten øke, være konstant eller minke ved belastning (Mesri og Godlewski, 1977).

Figur 2.1 viser definisjoner av setningsforløpet til grunnen i forbindelse med et byggeprosjekt ved bruk av begrepene initiale, primære og sekundære setninger. Man tar ofte utgangspunkt i at de sekundære setningene starter i det de primære setningene er fullført, men slik er det ikke i virkeligheten. Krypdeformasjoner inntreffer allerede i primærkonsolideringsfasen (Degago, 2011).

Primære og sekundære setninger ble først introdusert av Karl von Terzaghi (1923) og Keverling Buisman (1936). Buisman, den nederlandske pioneren av moderne geoteknikk, var en av de første til å observere og studere kryp i leire. Han observerte at deformasjonene til en leire i en konsolideringstest ikke nådde en konstant verdi, men at de fortsatte i lang tid etter at poretrykket var



Figur 2.1: Setningsforløp (Janbu, 1989)

tilnærmet forsvunnet. For dette fenomenet foretrakk Buisman uttrykket *secular*, langvarig, deformasjon, fordi dette svarer til en periode som går omtrent over et menneskes levetid.

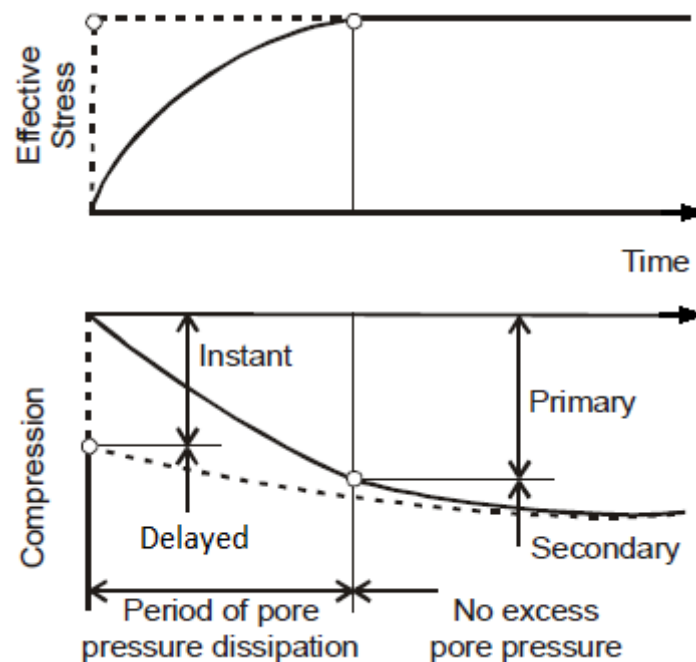
Ordet «secular» stammer fra det latinske ordet *seculum*, som betyr århundre. I de senere år ble dette, på grunn av en eller annen misforståelse, kalt «sekundær» deformasjon. Det uttrykket man i norsk praksis bruker for dette i dag kommer altså fra en misforståelse.

I stedet for det man i dag kaller primær deformasjon brukte han heller uttrykket *direct*, direkte, deformasjon, noe som samsvarer bedre med prinsippet om isotacher. Dette prinsippet blir senere forklart nærmere.

[Bjerrum \(1967\)](#) reintroduserer de samme prinsippene, men kaller det for *instant*, umiddelbar, og *delayed*, forsinket, deformasjon for å enklere kunne forklare deformasjon som følge av krep. Bjerrums definisjoner av instant, delay-

ed, primær og sekundær deformasjon er vist i figur 2.2. Umiddelbar deformasjon oppstår ved økning av effektivspenninger og fører til en reduksjon i poretall fram til man når en likevektsverdi der hvor leirstrukturen kun støtter opp overliggende trykk effektivt. Forsinket deformasjon representerer volumreduksjonen til en leire ved uendrede effektivspenninger (Bjerrum, 1967).

Med disse uttrykkene kan man beskrive det som skjer i virkeligheten på en bedre måte. Uttrykkene «primær» og «sekundær» separerer setninger inn i to komponenter som oppstår henholdsvis før og etter poretrykket er presset ut, mens Buismans og Bjerrums uttrykk inkluderer krypdeformasjoner allerede fra start av belastning.



Figur 2.2: Definisjon av «umiddelbar» og «forsinket» deformasjon sammenlignet med «primær» og «sekundær» deformasjon for en normalkonsolidert leire (Bjerrum, 1967)

## Isotacher

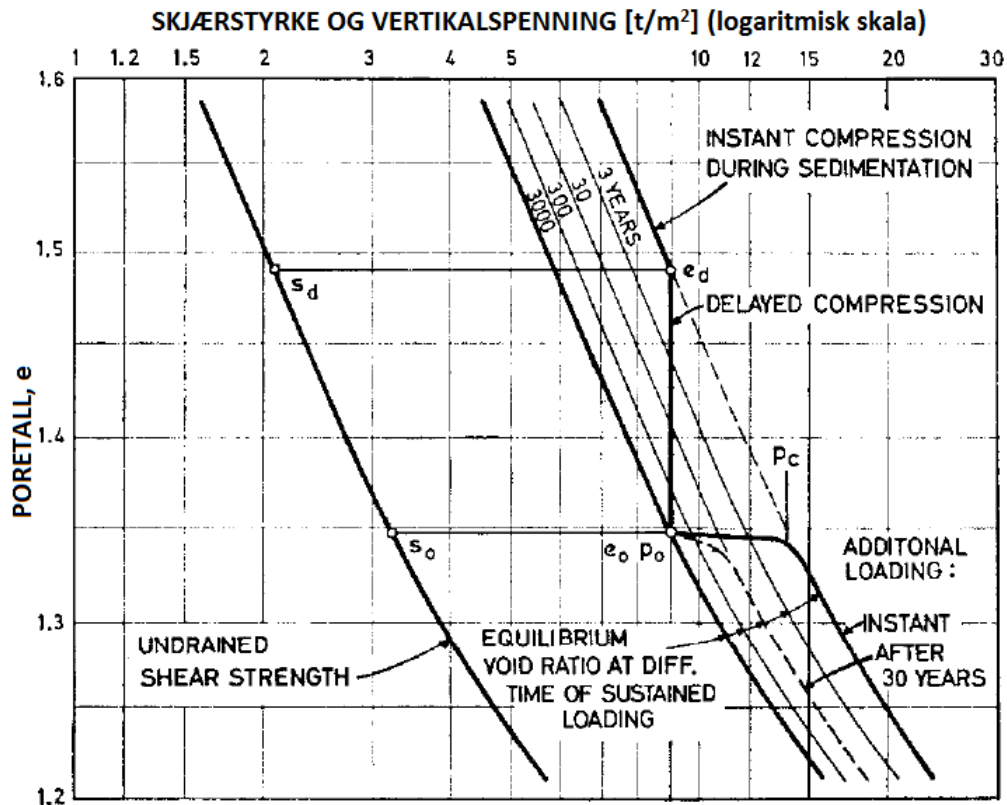
Prinsippet om isotacher ble først introdusert av Šuklje (1957). Dette prinsippet har ført til utvikling og forslag til mange krypmodeller gjennom tidene, og dets gyldighet er blitt eksperimentelt bevist av flere (Leroueil, 2006; Leonimfl., 2008). Prinsippet tar utgangspunkt i at kompresjonsegenskapene til leirer er tidsavhengige under både primær og sekundær deformasjon. Det ble, gjennom forsøk på leirprøver utsatt for endimensjonal kompresjon, funnet at det finnes et unikt forhold mellom tøyningshastighet, effektivspenning og viskøs tøyningshastighet.

Isotache betyr «lik hastighet», og vises som linjer med konstant tøyningshastighet som representerer det unike forholdet mellom effektivspenning, tøyningshastighet og tøyningshastighet.

Bjerrum (1967) introduserer et lignende prinsipp, men kaller linjene for tidslinjer. Forsinket konsolidering har pågått i tusenvis av år for norsk marin leire. Det oppgis at deformasjonsegenskapene til en leire ved forsinket konsolidering ikke kan bli beskrevet av en enkel kurve i et  $e - \log \sigma'$ -diagram, men at man trenger et system av linjer og kurver som vist i figur 2.3.

Hver av linjene i figuren representerer hastigheten av forsinket konsolidering sammen med det korresponderende forholdet mellom poretalet  $e$  og effektivspenningen  $\sigma'$  ved et gitt tidspunkt. Dette betyr at for enhver verdi for poretalet og effektivspenning finnes det en tilhørende kryphastighet som er uavhengig av hvordan leira har oppnådd disse verdiene. Volumendringen som leira har blitt utsatt for kan da deles inn i to bidrag; umiddelbar deformasjon og forsinket deformasjon. Tidslinjene viser hvordan motstanden mot





Figur 2.3: Forholdet mellom porettall, effektivspenning og tøyningshastighet for en leire utsatt for forsinket konsolidering (Bjerrum, 1967)

kryp øker med tiden. Konsolideringstester har vist at linjene er omtrent parallele, noe som angir at krypraten er omtrent den samme i en homogen leirforekomst, eller, ettersom linjene er noe bøyde, at den minker litt ved belastningsøkning.

## Konsolidering

Omfanget av setningene som oppstår ved belastning av geomaterialer avhenger mye av materialets belastningshistorikk. En av de viktigste parameterne når det gjelder å evaluere de forventede deformasjonene til leire er prekonsolideringsspenning,  $p'_c$ . Det defineres i utgangspunktet som de maksimale effektivspenningene som et leirmateriale tidligere har blitt utsatt for, men som

man skal se senere i denne oppgaven er dette en noe upresis definisjon. Det er flere mekanismer som kan ha påvirket prekonsolideringsspenningen som man finner i laboratoriet. En leire blir utsatt for en rekke prosesser som kan påvirke dens egenskaper, og dette er viktig å ta høyde for og forstå ([Länsivara, 1999](#)).

En leire har to ulike typer oppførsler når det kommer til setninger, og dette relateres til hvordan de er konsolidert. Om man har en leire som kun har blitt utsatt for last fra eksisterende overliggende masser kalles det en normalkonsolidert leire (NC-leire). Hvis man belaster materialet opp til det nivået vil setningene være små, men ved belastning over dette vil setningene øke betydelig. Man har en overkonsolidert leire (OC-leire) hvis leira tidligere er blitt utsatt for laster større enn belastningen fra eksisterende overliggende masser, og leira vil få mindre setninger enn NC-leire hvis den blir utsatt for laster under det den har opplevd tidligere.

Belastningshistorikken til et materiale kan gå langt tilbake i tid. Det kan eksempelvis ha blitt utsatt for belastning fra isbreer, eroderte topplag, økt vannstand eller kapillært sug. Overkonsolideringsraten, OCR, beskriver om materialet som testes er normalkonsolidert eller overkonsolidert, og i hvilken grad det er det. OCR defineres med følgende ligning:

$$OCR = \frac{p'_c}{\sigma'_{v0}}, \quad (2.1)$$

der  $p'_c$  er prekonsolideringsspenning og  $\sigma'_{v0}$  er påført vertikal effektivspenning.

OCR har innflytelse på kryphastigheten. En lav OCR vil føre til store krypdeformasjoner i et ubelastet terreng ([Degago mfl., 2011](#)).

Prekonsolideringsspenningen markerer overgangen mellom materialets NC- og OC-område. Dette kan studeres ved et ødometerforsøk, noe som beskrives nærmere i kapittel 2.3.1. I et ødometerforsøk er  $p'_c$  den effektivspenningen som opptrer i det en uforstyrret prøve begynner å flyte. Dette punktet kalles *yielding point*, eller flytepunkt. Dette er imidlertid ingen grense som angir at leirmaterialet begynner å pådra seg plastiske tøyninger, for det vil oppstå inne i de strukturelle flyteflatene allerede ved veldig lave tøyingsnivå (Länsivaara, 1999).

Flytespenningen kan være større enn prekonsolideringsspenningen på grunn av mekanismer som kryp og herding (Burland, 1990). Prekonsolideringsspenningen til en leire fra et kontinuerlig ødometerforsøk kan dessuten variere med tøyingshastigheten i forsøket.

Prekonsolideringsspenningen beskriver en endimensjonal spenningstilstand. Når man skal bestemme flyteegenskapene til en leire i forbindelse med byggeprosjekter er det som regel ikke tilstrekkelig å kun undersøke de endimensjonale effektene. Det er vel dokumentert at prekonsolideringsspenningen funnet fra et ødometerforsøk ikke representerer flytepunktet til in situ-leire tilstrekkelig, da flytepunktet in situ sjeldent er endimensjonalt (Länsivaara, 1999).

Ved beskrivelse av en todimensjonal spenningstilstand kan man studere materialets flytekurver, og for en tredimensjonal spenningstilstand ser man på flyteflater. Flytekurver og flyteflater er tett knyttet til  $p'_c$ , og avhenger derfor av de samme faktorene som  $p'_c$  gjør. Når et materiale blir utsatt for effektivspenninger høyere enn  $p'_c$ , passerer man her flyteflaten til materialet.

Todimensjonal spenningstilstand kan bestemmes fra treaksiale forsøk, som

er nærmere beskrevet i kapittel 2.3.1, mens for tredimensjonal flytning eksisterer det veldig lite data. [Diaz-Rodriguez mfl. \(1992\)](#) og mange flere forskere har bestemt flytekurvene til en rekke leirer fra ulike land.

Det har vist seg at prekonsolideringsspenningen til en leire avhenger av hvor lenge den har blitt utsatt for konstante effektivspenninger. Jo lengre varighe-ten er, jo høyere vil den målte prekonsolideringsspenningen ofte være ([Berre og Iversen, 1972](#)).

## 2.2 Krypprosessen

Naturlige geomaterialer består av partikler, og materialenes oppførsel avhen-ger derfor vesentlig av deres struktur. Mellom partiklene virker det krefter, og disse kreftene er med på å bestemme materialoppførselen. Partikkelkrefter er forbundet med partiklenes karakteristikk, som mineralogi, partikkelstørrelse og -fordeling, samt oppbygning og kontaktoppførsel ([Santamarina, 2003](#)). Karakterisering og evaluering av strukturen til leirige materialer er krevende på grunn av den komplekse strukturen de har, og den kontinuerlige variasjo-nen i deformasjoner som de opplever ([Erol, 1977](#)).

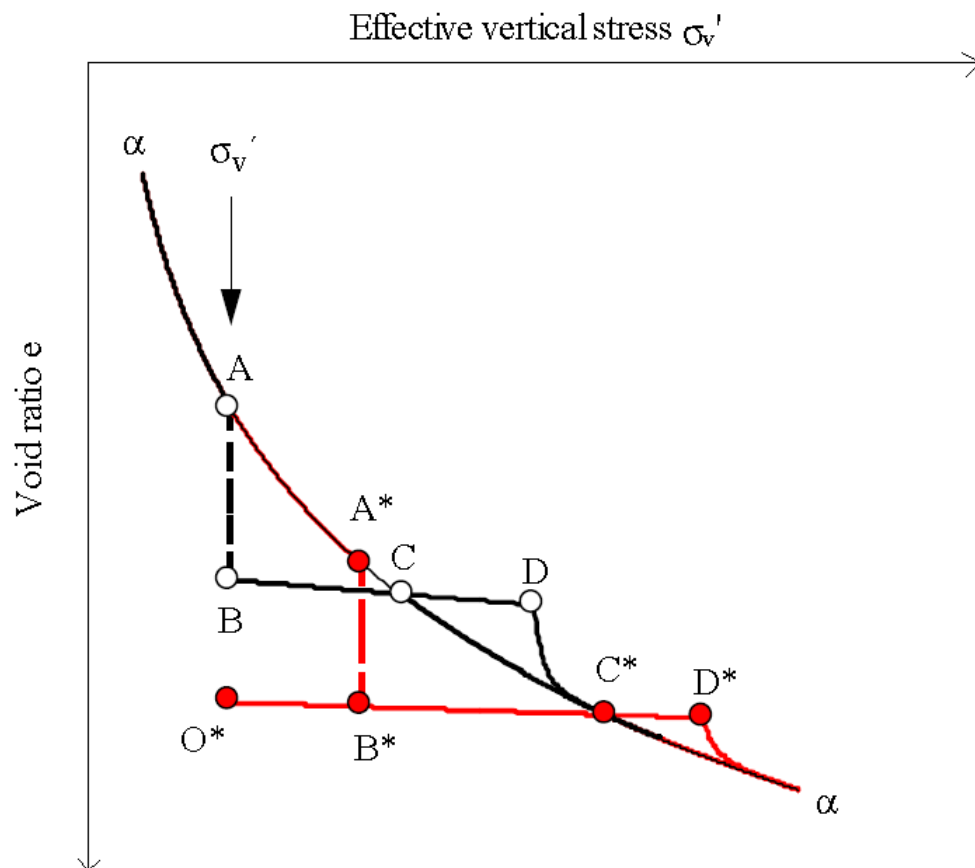
All tøyning og deformasjon i et materiale fører til strukturendringer. Belastning og avbelastning medfører naturligvis at strukturen endres, men selv om belastninger og spenninger ikke endres vil ethvert geomateriale deformeres i tidens løp. Krypmekanismen er et eksempel på dette. Struktur kan imidler-tid også oppstå av seg selv over tid, uten at materialet deformeres. Dette kan forklares av tiksotropi.

### 2.2.1 Effekten av kryp på et materiale

Kryp kan studeres ned på molekylært nivå, og skyldes at bindingene mellom de enkelte elementpartiklene brytes og gjenetableres i en takt som varierer med tiden. Mekanismen innebærer glidning av partiklenes kontaktpunkt, bortledning av vann fra kornstrukturen, og omorganisering av vannmolekyler og positivt ladde ioner (Mitchell og Soga, 2005). Konstant effektivspenning over lang tid fører til nedbryting av fysiske og mekaniske effekter mellom og i mineralpartiklene.

Krypdeformasjoner kan holde på i lang tid. Likevel er det lite sannsynlig at de skal fortsette evig, fordi det antakeligvis vil oppstå likevekt av materialets struktur ved en viss spenningstilstand. I naturen oppstår også kjemiske, biologiske og klimatiske endringer over lange tidsperioder. Disse endringene kan akselerere dannelsen av likevekt, eller skape forhold som motvirker det (Mitchell og Soga, 2005).

Mellom kornene i et naturlig geomateriale har man porer. Andelen porer blir beskrevet med poretallet,  $e$ , som defineres som forholdet mellom porevolum og volum av faste partikler (Sandven mfl., 2014). Hvis et materiale består av korn med lik størrelse, vil poretallet være høyere enn om man har korn med varierende størrelse. Norske leirer har verdier for poretall mellom 0,6 og 1,5. Hvis et geomateriale blir utsatt for økende vertikal effektivspenning vil tøyningene i materialet øke, og poretallet vil følgelig minke. Hvis de vertikale effektivspenningene holdes konstant vil poretallet fortsette å minke som følge av krypdeformasjoner (Länsivaara, 1999). Denne sammenhengen for leire kan man se i figur 2.4.



Figur 2.4: Effekten av spenning, tid og oppbyggingshistorikk på poretallet til leire (Länsivaara, 1999).

Styrken til en leire, og spenning-tøyningskurven fra et laboratorieforsøk, forandres på grunn av krep. Den endelige styrken til leira etter langvarig belastning kan være større, lik eller lavere enn materialets opprinnelige styrke (Mitchell og Soga, 2005). Krep i materialer kan derfor over tid utvikle en økt motstand mot umiddelbare setninger (Bjerrum, 1967).

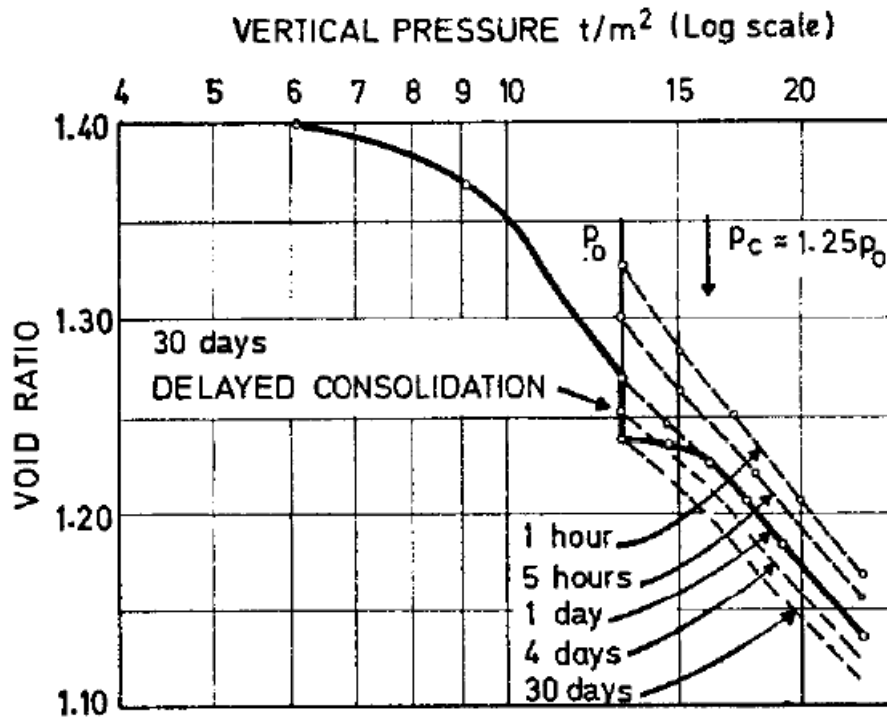
Dette kan forklares ved at reduksjonen i vanninnhold som oppstår under forsinket konsolidering vil gi en mer kompakt og stabil sammensetning av strukturen. Antallet kontaktpunkter mellom leirpartiklene vil øke, og i plastiske leirer vil den kohesive komponenten til skjærstyrken øke. Kohesjonskrefter er kreftene som virker mellom molekyler som følge av en elektrisk tiltrekning

mellom ladningene i atomene. Et kohesivt materiale har den egenskap at mineralkornene kan feste seg sammen, slik som for leire og fin silt.

Videre vil dette bety at under forsinket konsolidering vil en kohesiv leire utvikle en «spart» motstand mot videre setninger. Figur 2.4 viser, for en normal-konsolidert leire, at hvis de vertikale effektivspenningene holdes konstante, vil poretallet reduseres fra punkt A til punkt B, der punkt A representerer pre-konsolideringsspenningen til leira. Det er dette som i følge Bjerrum (1967) gir en økt motstand mot videre belastning. Isteden for at materialet begynner å flyte ved punkt A, vil det heller flyte ved punkt C, som da representerer en høyere flytespenning enn de effektivspenningene som leira har blitt utsatt for in situ. En slik leire vil være i stand til å tåle en tilleggsbelastning, i tillegg til lastbidraget fra eksisterende overliggende masser, uten å bli utsatt for betydelige volumendringer som følge av forskyvninger av kontaktpunkter. Dette betyr at for tillegglaster som er lavere enn effektivspenningene ved punkt C, vil leira oppføre seg omtrent likt som en overkonsolidert leire, og de umiddelbare setningene vil oppføre seg elastiske. For laster som er så store at effektivspenningene overskrider spenningen ved punkt C vil det kun oppstå større setninger fra det lastbidraget som overgår den kritiske verdien (Bjerrum, 1967).

Figur 2.5 viser en laboratorietest gjort på plastisk leire fra Drammen, der man kan se effekten av den økte motstanden mot setninger oppnådd som følge av forsinket konsolidering. Etter 28 dager med forsinket konsolidering kan man se at den kritiske lasten man kan påføre leira har økt med 25 %.

Man kan også observere effekten av økt motstand etter mye kortere tid. Figur 2.6 viser resultat fra to kontinuerlige ødometerforsøk. I det ene forsøket er det



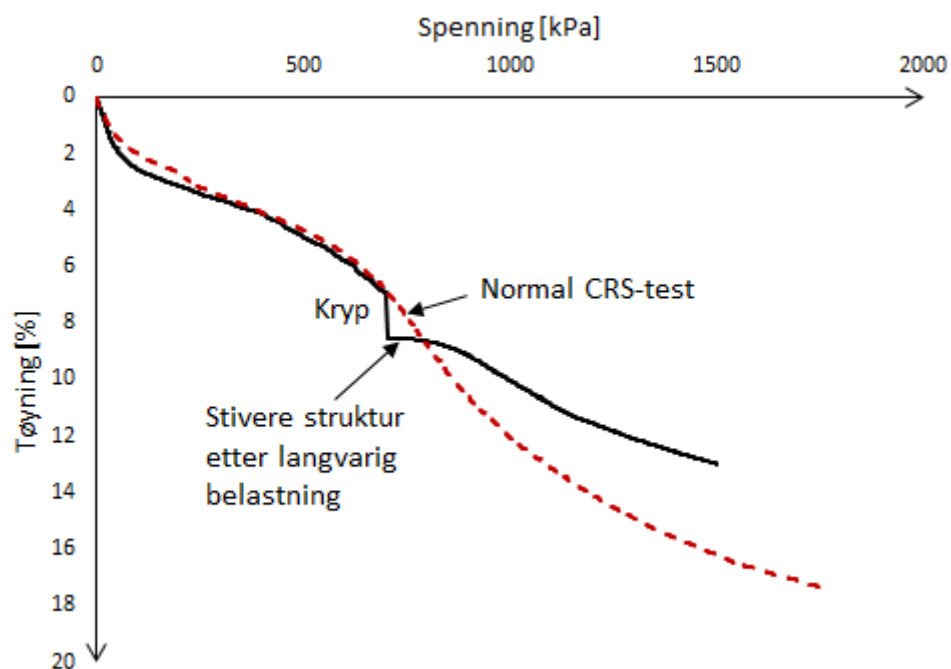
Figur 2.5: Resultat fra laboratorietest på plastisk Drammen-leire, som viser effekten av økt motstand mot videre setninger etter 28 dager med forsinket konsolidering (Bjerrum, 1967)

lagt inn et krepstrinn der effektivspenningene ble holdt konstante ved 700 kPa i 24 timer. Man kan tydelig se at det er oppstått krepdeforrasjoner som har styrket materialet.

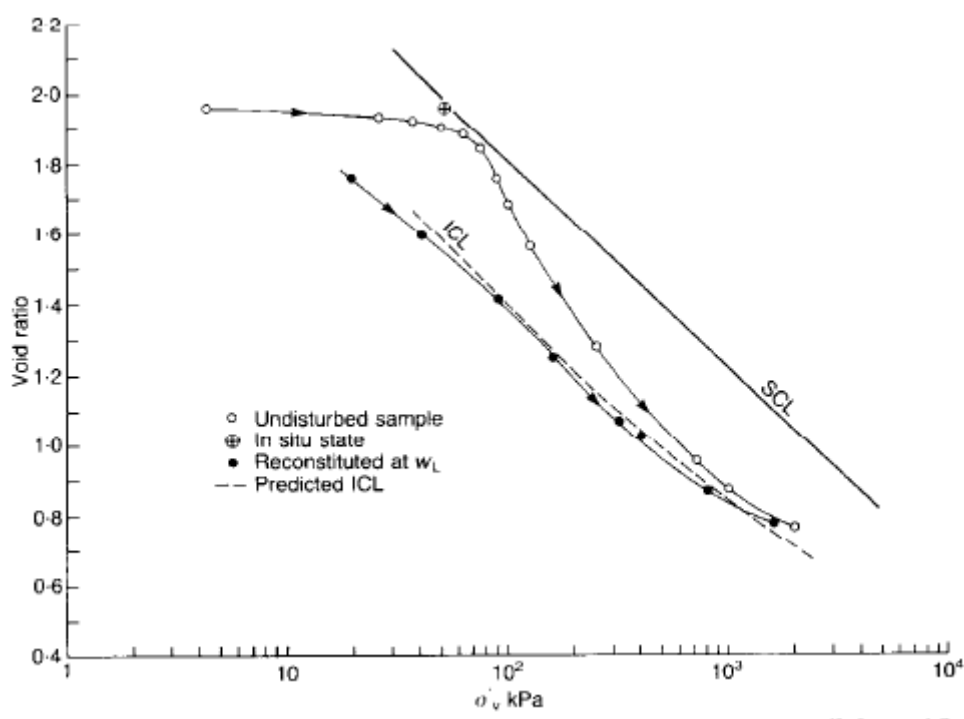
### 2.2.2 Destrukturering

Hvorvidt strukturen til et materiale påvirker dets egenskaper kan observeres fra forsøk på både uforstyrret og destrutturert materiale. Figur 2.7 viser resultat fra to ødometerforsøk utført av Burland (1990) på prøver fra 6,5 meters dybde. Et forsøk er på uforstyrret leire, og et er på omrørt leire der all opprinnelig struktur er borte. Man kan enkelt observere at den destrutterte prøven ikke viser noen tegn til prekonsolideringsspenning, mens den uforstyrrede leira har en tydelig knekk ved omtrent  $\sigma'_v = 80 \text{ kPa}$ .





Figur 2.6: Resultat fra kontinuerlige ødometerforsøk på kvikkleire fra Grong ved dybde 9,3 m. I det ene forsøket er det lagt inn et 24-timers kryptrinn ved 700 kPa.



Figur 2.7: Resultat fra ødometerforsøk på uforstyrret og omrørt leire fra 6,5 m dybde (Burland, 1990)

Flyteflater, som diskutert i kapittel 2.1.1, forbindes med destrukturering og

brudd av de indre partikkelbindingene. Når man passerer flyteflaten til et materiale oppstår det ofte en dramatisk reduksjon i styrke, og store, plastiske tøyninger kan utvikle seg. Det er også forventet at styrken til materialet innefor flyteflaten reduseres momentant som følge av destrukturering ([Län-sivaara, 1999](#)).

### 2.2.3 Tiksotropi

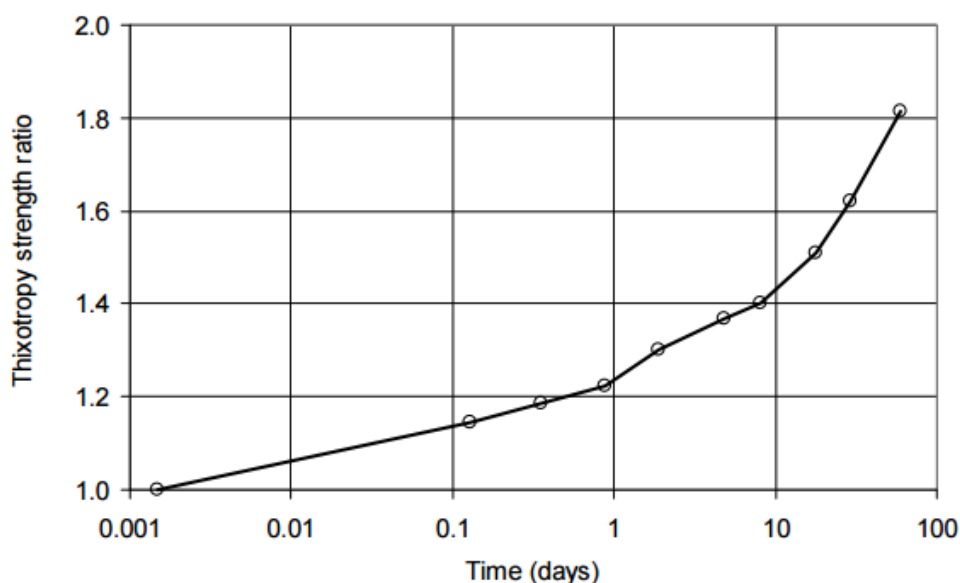
Tiksotropi kan defineres som en mykningsprosess som skjer ved omrøring av et materiale, etterfulgt av en tidsavhengig tilbakevending til den originale, hardere tilstanden som materialet hadde. Prosessen skjer ved konstant vanninnhold og porøsitet ([Mitchell, 1960](#)). Under omrøring opplever materialet altså tap av viskositet, og tiksotropi beskriver dets evne til å gjenvinne den reduserte viskositeten når strømmingene i materialet opphører.

Naturlige leirer er tiksotrope materialer, hvor kvikkleire er et tydelig eksempel. Et annet godt eksempel på et tiksotrop materialer er rømme. Rømme i uomrørt form er ganske fast, mens rører man den om blir den flytende. Lar man den stå urørt en stund vil den hardne til igjen, uten at det har vært noen endring i porøsitet eller vanninnhold.

Tiksotropien til leirer avhenger mye av materialets mineralsammensetning. Tiksotropi kan, i likhet med krep, resultere i økning av styrke. Figur 2.8 viser et eksempel av dette, der leire fra Mexicogulften er testet for tiksotrope effekter. Man kan se at tiksotropieffekten fører til en veldig rask økning i styrke de første dagene, og at økningen fortsetter selv etter 2 måneder.

Hvor mye et materiale påvirkes av tiksotropieffekten beskrives av tiksotropigraden. Denne gir forholdet mellom skjærstyrken til materialet etter en tid

med tiksotropisk styrkeøkning, og skjærstyrken like etter omrøring.



Figur 2.8: Resultat fra tiksotropitest på leire fra Mexicogulfen med leirinnhold på 50%,  $I_p = 40\%$  og  $S_t = 3,5$  (Andersen mfl.)

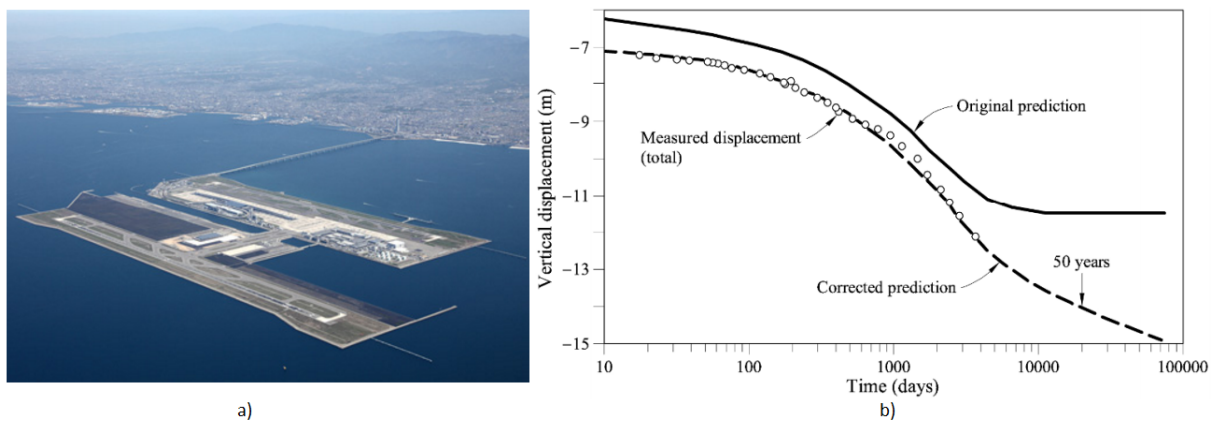
#### 2.2.4 Effekten av kryp i praktisk sammenheng

I praktisk sammenheng er konsekvensene av krypdeformasjoner store. Kryp kan føre til meget store langtidssetninger, så det er viktig å beregne krypdeformasjonenes utvikling i det lange løp. Krypdeformasjoner bør helst være med i dimensjoneringen av alle konstruksjoner, men spesielt de som er ømfintilge for deformasjoner i ferdig tilstand.

Kryp i naturlige geomaterialer gjør at grunnen beveger seg langsomt. Dette vil kunne påvirke kvaliteten av den overliggende infrastruktur, og i verste fall resultere i utglidninger og skred. Har man ujevne grunnforhold og ulik lastfordeling kan differensialsetninger oppstå, og dette kan ødelegge en konstruksjon. Skader på bygninger og infrastruktur vil føre til høye vedlikeholds- og reparasjonskostnader. Dessuten er de økonomiske og sosiale konsekven-

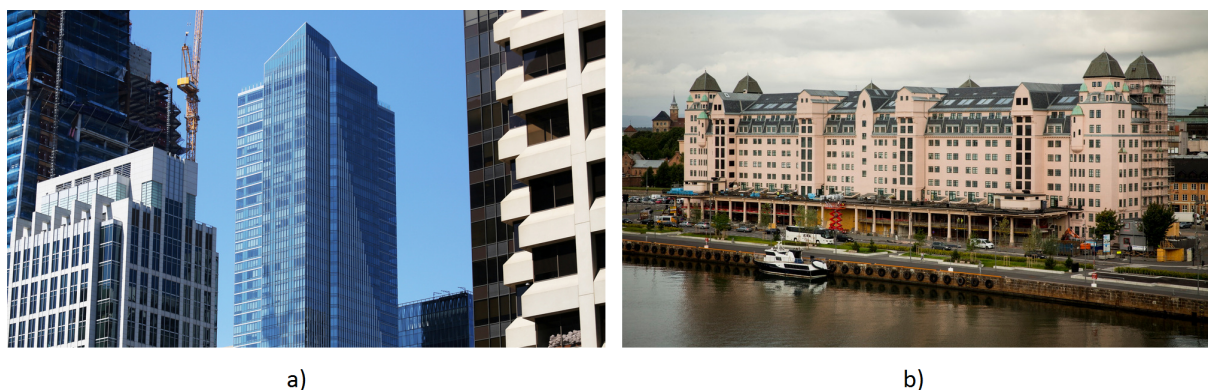
sene som følger av behov for midlertidig stenging av infrastrukturen ved vedlikehold og reparasjoner høy. Eksempler der konsekvensene av setninger har vært store er vist i figur 2.9 og 2.10.

Kansai International Airport, som vist i figur 2.9 a) ble utsatt for uventede setninger etter ferdigstilling i 1991. Flyplassen er bygd på ei kunstig øy og har fått setninger opp til 9 m. Den synker fortsatt med en setningshastighet på 7 cm/år (Puzrin mfl., 2010). Dimensjoneringen av flyplassen var gjort feil, og både initial-, primær- og krypsetninger ble underdimensjonert. Figur 2.9 b) viser hvordan de totale setningene i utgangspunktet ble beregnet, sammen med målte setninger og oppdatert beregning. De uønskede setningene førte til store forsinkelser og kostnadsøkninger i prosjektet som i utgangspunkt hadde budsjett på 14 milliarder dollar. Figur 2.10 viser to andre eksempler på konstruksjoner som har blitt utsatt for store, uplanlagte setninger.



Figur 2.9: a) Kansai International Airport (Airports, 2016) b) Original setningsberegning, målte setninger og oppdatert beregning (Puzrin mfl., 2010)

For å redusere langtidssetningsproblemer kan man velge løsninger som ikke belaster grunnen over det overkonsolidert området, da det her er liten tendens til kryp. Utgravning og kompensert fundamentering, lette fyllmasser, komprimering, utbytting av løse, komprimerbare masser og kalk-sement-stabilisering er eksempler på gode tiltak. Pelefundamentering ned til berg er også en god



Figur 2.10: a) Millennium Tower i San Fransisco har sunket 40 cm på syv år, noe som kan få katastrofale følger ([Garathun, 2016](#)), b) Havnelageret i Oslo fra 1920 er som følge av setninger utsatt for skader på fundament, gulv, vegger og trapper, noe som vil føre til høye rehabiliteringskostnader. ([Nikolaisen, 2014](#))

løsning.

## 2.3 Modellering av kryp

Det er i lang tid gjort arbeid for å finne gode metoder og prosedyrer å tolke ut krypparametere og estimere langtidssetninger på. For mange materialer kan kryp modelleres ved bruk av teorier om viskoelastisitet eller viskoplastisitet. I slike modeller er kryp representert av et viskøst element, hvor deler av spenningene relateres til materialets deformasjonshastighet. Selv om geomaterialer kan ha en viskøs komponent, er kryp vanligvis modellert ved en spesiell type modell som baserer seg på observasjoner fra felt- og laboratorietester ([Verruijt og Van Baars, 2007](#)).

Det finnes flere gode felt- og laboratoriemetoder for modellering av kryp, hver med sine egne teorier og konsepter. Laboratorietesting er vanligst og blir mest brukt, da det kan gjøres på kortere tid og gir større rom for kontroll av rammebetingelser enn for feltundersøkelser. [Liingaard mfl. \(2004\)](#) har gitt ut en omfattende oversikt og karakteristikk av en rekke krypmodeller som er

blitt opprettet gjennom tidene. I dette kapittelet blir imidlertid kun de vanligste eksperimentelle metodene for observering av kryp i Norge, samt de mest brukte beregningsmodellene, presentert og beskrevet.

I Norge praktiserer man i dag følgende prinsipper ved studering av kryp. Man deler inn i primære og sekundære deformasjoner, eller beregner setninger i beregningsverktøy som GeoSuite Settlement med Krykon eller Soft Soil Creep i PLAXIS hvor en koblet analyse gjøres.

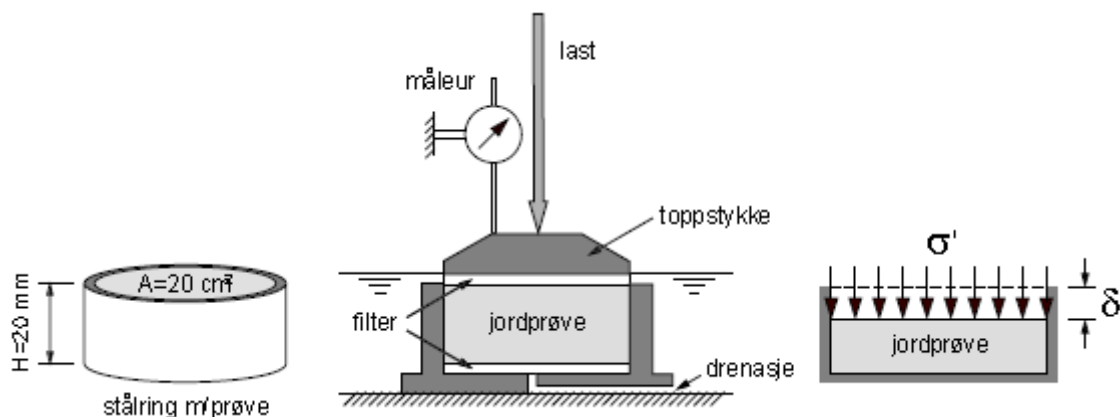
### **2.3.1 Metoder for tolking av krypparametere**

Det eksisterer en rekke metoder for å studere kryp i geomaterialer. For å observere kryp testes materialet under konstante effektivspenninger over en viss tid. Jordas deformasjonsegenskaper kan bestemmes ute i felt og inne på laboratoriet, men de mest effektive metodene skjer som sagt på laboratoriet.

#### **Ødometerforsøk**

Den vanligste metoden for tolking av kryp er ødometerforsøk. Et ødometerforsøk beskriver jordas deformasjonsegenskaper ved å studere parametere for beskrivelse av setningsforløpet. Ødometeret gir en endimensjonal deformasjonstilstand der man kun inkluderer vertikal last og aksiell deformasjon. Prøvematerialet blir skjøvet inn i en ødometerring som forhindrer sideveis deformasjon, omtrent slik man antar at det er nede i jorda. Dette medfører at det oppstår horisontale spenninger mot ringen, på samme måte som det som skjer i jorda ved belastning. Siden diameteren til prøven er konstant gjennom hele testen vil den vertikale tøyningen ved endt test tilsvare volumetrisk tøyning. Derfor får man fra ødometerforsøk informasjon om volumetrisk kryp.

I ødometerforsøket blir påført vertikallast, poretrykk, deformasjon og tid registrert. Prøven går vanligvis ikke til brudd, fordi den er innspent i ødometeret. Figur 2.11 viser en prinsippskisse av et ødometer.

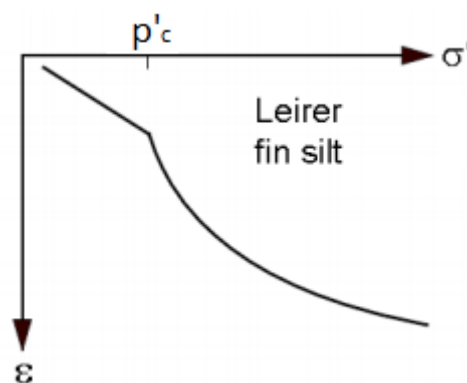


Figur 2.11: Prinsippskisse av ødometer (Sandven mfl., 2014)

Det finnes ulike måter å utføre et ødometerforsøk på, avhengig av hvordan man konsoliderer og hvordan man påfører lasten. Kontinuerlige ødometerforsøk (CRS - Constant Rate of Strain) utføres vanligvis for beskrivelse av primærsetningsforløpet og for å finne  $p'_c$ , mens et trinnvist ødometerforsøk (IL - Incremental Loading) gir parametere for beregning av sekundærsetningene, basert på at lasten holdes konstant over lengre tid slik at poretrykket får tid til å dissipere bort. Jo lengre man holder effektivspenninger konstant, jo mer kryp kan man observere. Hvor lang tid konsolideringen tar avhenger av materialfaktorene. I Norge og internasjonalt er standard kryptid på 24 timer. Janbu (1963) fant imidlertid ut at i løpet av de 24 timene der lasten holdes konstant, får man i de fleste naturlige leirer mer enn 23 timer med kryp.

Leirprøven i ødometeret får en stivere oppførsel ved høyere spenningsnivå (Emdal, 2009). Det er fordi materialet da har fått en mer stabil og kompakt struktur. Dette stemmer overens med teorien til Bjerrum (1967) om at kryp fører til økt motstand mot setninger.

Et vellykket ødometerforsøk på en god prøve skal i de resulterende diagrammene vise en markant knekk i overgangen mellom prøvens overkonsoliderte og normalkonsoliderte område, som vist i figur 2.12. Dette gjør det enkelt å finne prekonsolideringsspenningen, altså der man går ut i fra at prøven begynner å flyte. Dersom kurvene fra forsøket ikke viser noen markant overgang her, kan det tyde på at prøven er blitt utsatt for mekaniske og fysiske forstyrrelser som har brutt ned kornstrukturen slik at materialet ikke lenger «husker» belastningen og spenningene det har vært utsatt for tidligere (Vegvesen, 2010).



Figur 2.12: Prekonsolideringsspenning funnet fra ødometerforsøk (Sandven mfl., 2014)

### Treaksialforsøk

Et ødometerforsøk gir kun mulighet til å variere påført aksiell spenning. Nede i jorda er ethvert leirelement utsatt for laterale spenninger, og et ødometerforsøk vil derfor ikke kunne tilfredsstillende in situ-betingelsene helt. I et treaksialforsøk kan man derimot kontrollere både aksiell og radiell spenning, og testen blir derfor mer virkelighetsnær. Dette lar seg gjøre ved å påføre et væske- eller gasstrykk på utsiden av prøven, samt en aksiell last. Man kan

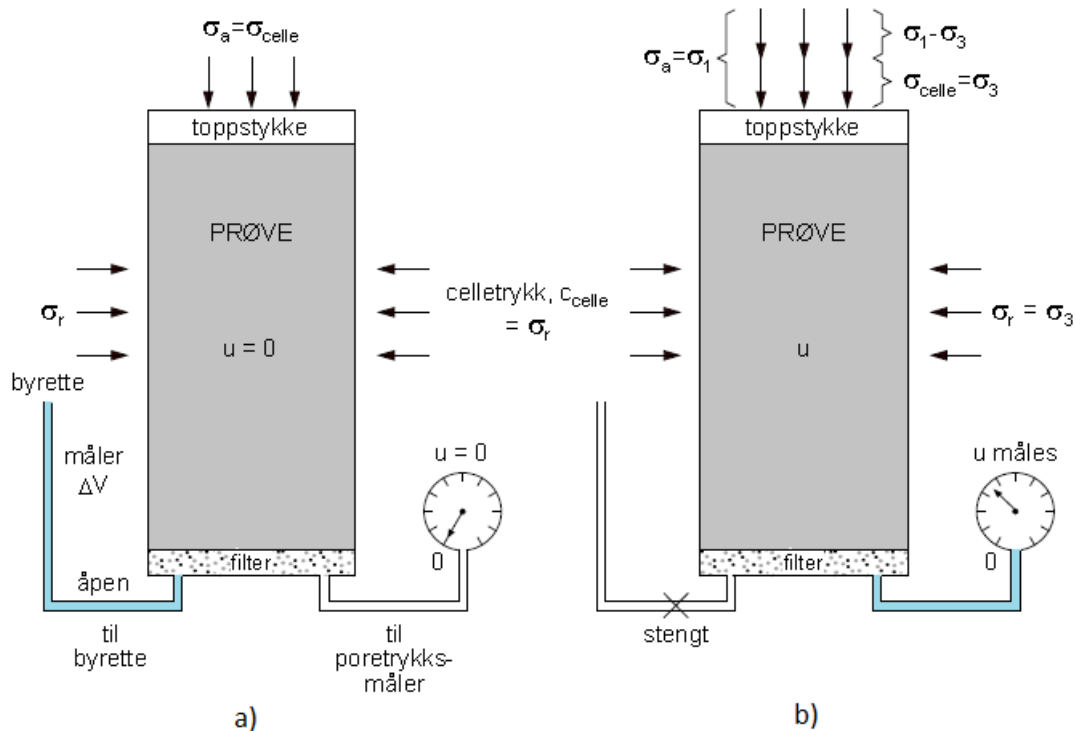


utføre forsøket både isotropt og anisotropt, og man kan velge drenert eller udrenert tilstand.

I et ødometerforsøk kan man studere volumetrisk kryp ved sekundær kompresjon. Et treaksialapparat gir mulighet for å studere skjærkryp. Skjærkryp er en mekanisme som kan oppstå i en naturlig eller konstruert skråning som blir belastet eller fysisk endret.

Forsøksprosedyren i et treaksialforsøk går enkelt sagt ut på å først konsolidere prøven til in situ effektivspenningstilstand. Det er hensiktsmessig å utføre  $K'_0$ -forsøk for bestemmelse av prøvematerialets flytekurve og konsolideringsnivå. Deretter kan det utføres et standard skjærforsøk, der prøven påføres spenninger slik at skjærspenninger oppstår og materialet etter hvert går til brudd. Dette gjøres ved å påføre forskjellige hovedspenninger, enten aktivt eller passivt. På denne måten kan man finne materialets skjærspenning og mobiliseringsgrad. Figur 2.13 viser en prinsippskisse for treaksialtesting. For å studere udrenert skjærkryp i et treaksialapparat starter man også med å konsolidere prøven til riktig spenningstilstand. Da bør man bruke informasjon om mobiliseringsgrad og konsolidering fra et standard skjærforsøk som er utført på en tilsvarende prøve i forkant. Etter konsolidering stenger man drenasjeveiene og utsetter prøven for konstant vertikal last som skal simulere kryplast.

Et udrenert krypforsøk deles inn i tre faser; primær-, sekundær- og tertiærkrypfase. Primærkrypfasen karakteriseres ved at tøyningshastigheten avtar, og sekundærkrypfasen ved at tøyningshastigheten er konstant. I tertiærkrypfasen øker tøyningshastigheten, og gir etter en tid et krypbrudd (Torpe, 2014). Krypbrudd skjer av at kornstrukturen er blitt vesentlig nedbrutt og leira frigir



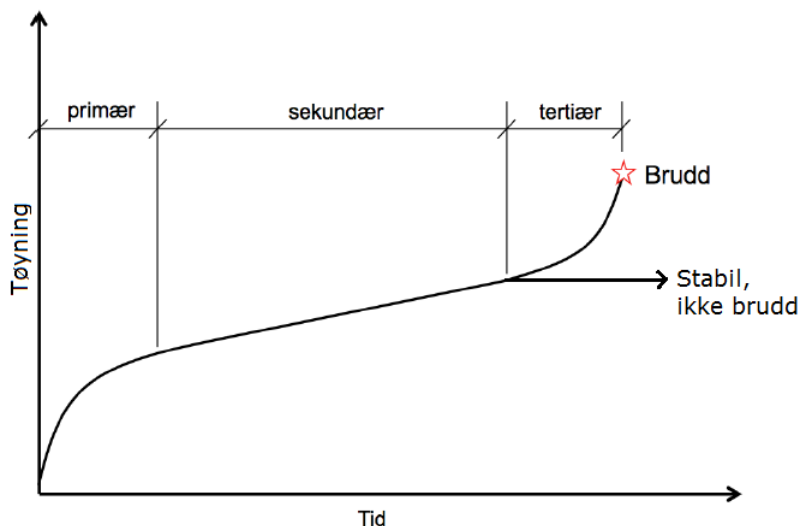
Figur 2.13: Prinsippskisse for a) isotrop konsolideringsfase og b) udrenert skjærforsøk i tre-aksialtesting (Emdal, 2009).

porevann samtidig som poretrykket øker som følge av tøyning. Effektivspenningene vil reduseres med tiden, og etter hvert føre til at materialet bryter sammen (King, 2013). Ikke alle krepforsøk ender i brudd, noen ganger stabiliserer forsøket seg i den sekundære krepfasen og går aldri videre til tertiærkrepfasen. Figur 2.14 illustrerer de tre fasene i et skjærkrepforsøk, der prøven enten går til brudd eller stabiliserer seg i sekundærkrepfasen.

### 2.3.2 Beregningsmodeller

#### Janbus metode

I Norge er det Janbus metode som brukes mest ved setningsberegninger. Det er denne teorien som blant annet ligger til grunn for beregningsverktøyet Krykon i GeoSuite Settlement.



Figur 2.14: Oversikt over de tre fasene i et skjærkrypforsøk etter [Torpe \(2014\)](#).

### Primærsetninger

Ved beregning av primærsetninger ser man på tøyningen som materialet har blitt utsatt for ved fullført konsolidering,  $\epsilon_p$ . Denne tøyningen utledes fra ødometermodulen,  $M$ , som gis som

$$M = \frac{d\sigma'}{d\epsilon} \quad (2.2)$$

$M$  er den endimensjonale deformasjonsmodulen som definerer den drenerte stivheten til et materiale i ødometertilstand.

Man har så at

$$\epsilon_p = \int_{\sigma'_0}^{\sigma'} \frac{1}{M} d\sigma' = \frac{1}{m} \ln \frac{\sigma'}{\sigma'_0} \quad (2.3)$$

der  $m$  = modultallet, stigningstallet til ødometermodulen i et  $M - \sigma'$ -diagram, og  $\sigma'$  og  $\sigma'_0$  er henholdsvis vertikal effektivspenning og initial vertikal effektivspenning.

De primære setningene kan da beregnes fra følgende ligning:

$$\delta_p = \int_0^H \epsilon_p dH \quad (2.4)$$

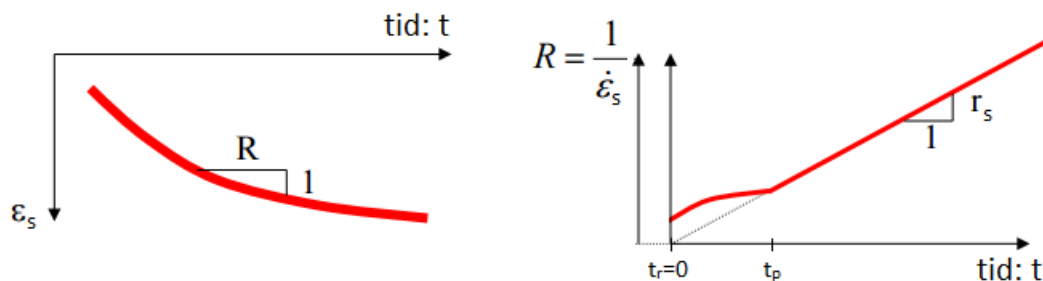
Generelt vil primær- og sekundærsetninger overlappe hverandre og påvirke hverandre gjensidig. Man regner likevel bare med bidraget fra sekundærsetningen fra tiden etter at primærsetningene er fullført, det vil si ved  $t \geq t_p$ . Dette er fordi man oftest tar for seg et stort tidsperspektiv ved setningsberegninger.

### Sekundærsetninger

For beregning av krepdeformasjoner baserer Janbus metode seg på konseptet om tidsmotstanden,  $R$ . Tidsmotstanden er lik det inverse av tøyningshastigheten  $\dot{\epsilon}$ , og kan bestemmes fra ødometerforsøk.

$$R = \frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = \frac{dt}{d\epsilon_s} = r_s(t - t_r) \quad (2.5)$$

der  $r_s$  = tidsmotstandsnummeret,  $t$  = tid, og  $t_r$  = referansetid.  $p$  og  $s$  refererer til henholdsvis primær og sekundær.



Figur 2.15: Definisjoner av  $R$  og  $r_s$ .

Ut fra en  $R$ - $t$ -kurve for et gitt lasttrinn kan man finne det dimensjonsløse tids-

motstandstallet,  $r_s$ , som vist i figur 2.15.  $r_s$  gis som:

$$r_s = \frac{dR}{dt} \quad (2.6)$$

$t_r$  og  $r_s$  bestemmes for hvert jordlag og for de aktuelle lasttrinn.

Sekundærtøyningene,  $\epsilon_s$ , kan så utledes fra ligning (2.5):

$$\epsilon_s = \frac{1}{r_s} \ln \frac{t - t_r}{t_p - t_r} \quad (2.7)$$

der  $t_p$  = tid til primærsetningene er fullført,  $t$  = tid etter  $t_p$  og

Sekundærsetningene kan beregnes ut fra følgende ligning:

$$\delta_s = \int_0^H \epsilon_s dH \quad (2.8)$$

der  $H$  = det aktuelle jordlagets tykkelse (Vegvesen, 2010).

### Soft Soil Creep model i PLAXIS

Det er blitt utviklet en beregningsmodell for kryp i myke leirer i modelleringsprogrammet PLAXIS. Modellen er først og fremst egnet for å beregne setninger, inkludert kryp, i myke leirer. Modellen bruker de samme materialparameterene som i Cam Clay-modellen i PLAXIS, mens inputparameterene for kryp er som følger:

- sekundærsetningsindeksen  $\mu^*$  ( $\mu^* = \frac{1}{r_s}$ )
- primærsetningsindeksen  $\lambda^*$  ( $\lambda^* = \frac{1}{m_{NC}}$ )
- OCR
- kryptid

## Internasjonalt

Det finnes mye teori som baserer seg på de samme konseptene, bare med ulike parametere og betegnelser. Internasjonalt brukes vanligvis kompresjonsindeksen  $C_c$  som avhenger av effektivspenning, og krypindeksen  $C_\alpha$  som avhenger av tid, for beskrivelse av deformasjonsegenskapene til et materiale.

$$C_\alpha = \frac{e}{\log t} \quad (2.9)$$

$$C_c = \frac{e}{\log \sigma'} \quad (2.10)$$

der  $e$  = poretall,  $t$  = tid og  $\sigma'$  = effektivspenning

Internasjonalt er det også mer vanlig å bruke logaritmiske akser, som  $e - \log \sigma'$ -kurver i stedet for  $\sigma' - \epsilon$ -kurvene man bruker i Norge. Bruk av logaritmiske akser gjør det enklere å oppdage eksperimentelle feil i testene, og det blir lettere å skille mellom fundamentalt forskjellige deformasjonsoppførsler i prøven.

Tabell 2.1 viser en oversikt over de ulike parameterne som benyttes i beregningsmodeller internasjonalt, i PLAXIS og i Norge, samt relasjonen mellom dem.

Tabell 2.1: Oversikt over de ulike parameterne for ulike beregningsmodeller

Opprinnelse	Kompresjonsindeks	Rekompresjonsindeks	Krypindeks
Internasjonalt	$C_c$	$C_r$	$C_\alpha$
Cam Clay	$\lambda = \frac{C_c}{\ln 10}$	$\kappa \approx \frac{3}{\ln 10} \frac{(1-v_{ur})}{v_{ur}} C_r$	$\mu = \frac{C_\alpha}{\ln 10}$
PLAXIS	$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e}$	$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e}$	$\mu^* = \frac{\mu}{1+e}$
Norge	$m_{NC} = \frac{1}{\lambda^*}$	$m_{OC} = \frac{\ln 10(1+e)}{C_r}$	$r_s = \frac{1}{\mu^*}$

### 2.3.3 Sammenheng mellom primære og sekundære deformasjonsparametere

Etter hvert som langtidsdeformasjoner fikk mer oppmerksomhet, ble det også vekket interesse for å se på mulige sammenhenger mellom parametere som beskriver primære og sekundære deformasjoner.

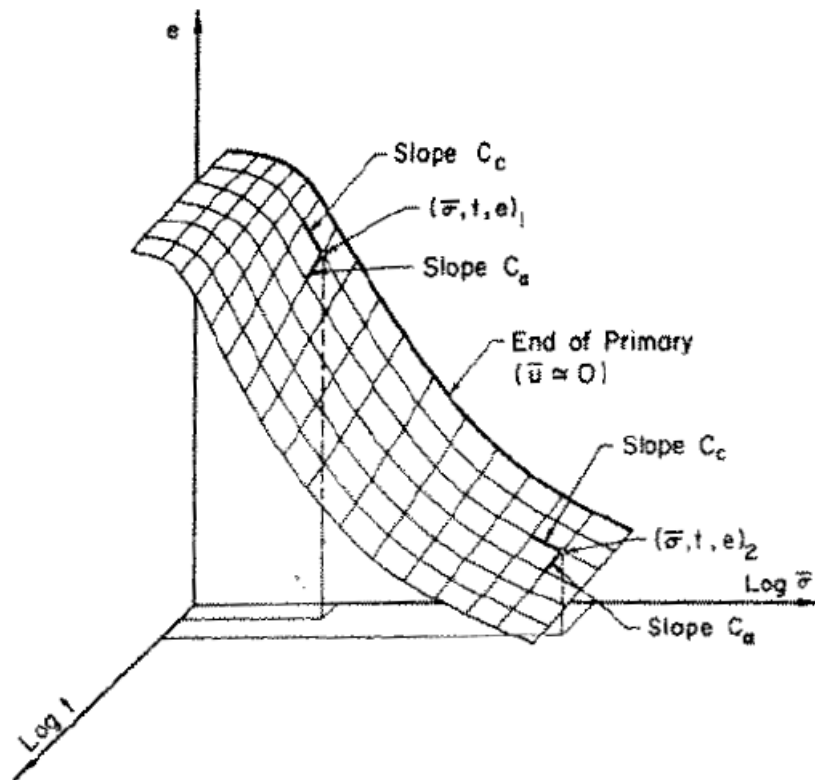
[Mesri og Godlewski \(1977\)](#) ser på forholdet mellom deformasjonene som kommer av effektivspenningsendring, og de som kommer over tid. Det argumenteres for, med overensstemmelse fra felt- og laboratorieobservasjoner, at sekundærtøyningsindeksen,  $C_\alpha$ , og tøyningsindeksen,  $C_c$ , er forbundet med et konstant forhold som gjelder for alle kombinasjoner av tid, effektivspenning og poretrykk. Dette legger grunnlag for det [Mesri \(1987\)](#) kaller for «Geoteknikkens fjerde lov».

Forholdet mellom de primære og sekundære setningene er illustrert i figur [2.16](#), og gis som:

$$\frac{C_\alpha}{C_c} = B \quad (2.11)$$

der  $B$  = faktoren som forbinder primære og sekundære deformasjonsparametere.

Dette forholdet kommer av at det i teorien ikke skal være noen forskjell mellom mekanismene for volumendringer som kommer av henholdsvis endringer i effektivspenning og endring av indre struktur og omfordeling av partikkelbindinger ([Mesri og Godlewski, 1977](#)). Alle mekanismer for volumendring, enten det er deformasjon, forskyvning, sammenslåing og spredning av partikler eller forvrengning av absorberte vannlag, kan operere både under endring av effektivspenninger og med tiden.



Figur 2.16: Illustrasjon av forholdet mellom  $C_\alpha$  og  $C_c$  under sekundær deformasjon (Mesri og Godlewski, 1977).

I en ekte leire er effektivspenningsendringene alltid tidsavhengige, og mekanismene for volumendringer utgjør en kjedereaksjon. Enhver strukturell endring som kommer av effektivspenningsendringer er innledet og etterfulgt av en tidsavhengig strukturell endring. Derfor er strukturendringer som følge av endring i effektivspenning og tid gjensidig avhengig (Mesri og Godlewski, 1977).

Sammenhengen mellom  $C_\alpha$  og  $C_c$  ble funnet av Mesri og Godlewski (1977) ved å plote verdier for disse fra samme effektivspenningsnivå. Det som oftest ble gjort var å ta verdier av  $C_c$  fra  $e - \log \sigma'$ -kurven som svarer til slutten av primærkonsolideringen, og for hver konsolideringsspenning finne verdien for  $C_\alpha$  fra den «lineære» delen av  $e - \log t$ -kurven etter overgangen fra primær



til sekundær deformasjon.

Med dette forholdet kan man forutsi de sekundære deformasjonsparametrene ved bruk av  $e - \log \sigma'$ -kurven. Et eksempel på dette er vist i figur 2.16.

For en rekke materialer, blant annet silt, leire og torv rapporterer [Mesri og Godlewski \(1977\)](#) om verdier av  $B$  i området 0,025-0,10. For å kort oppsummere deres data så var verdiene generelt høye for torv, noe lavere for organiske leirer, medium for leirer og organisk silt, og lav for noen typer leirer og silt.

I følge [Mesri og Castro \(1987\)](#) er verdien av  $B$  lik  $0,04 \pm 0,01$  for de fleste uorganiske, myke leirer, og  $0,05 \pm 0,01$  for høyorganiske, plastiske leirer.

Sammenhengen som her ble funnet kan direkte knyttes til Janbus modulnummer  $m$  og tidsmotstandstall  $r_s$ . Man har

$$\frac{m}{r_s} = B \quad (2.12)$$

## 2.4 Effekt av prøveforstyrrelser

I geoteknikk jobber man med naturlige materialer, og her er det vanskelig å skille mellom «ekte» og «forstyrret» materialoppførsel. Leirprøver som tas opp fra sin opprinnelige posisjon nede i jorda er meget utsatt for forstyrrelser som kan påvirke egenskapene og strukturen til leira. Dette gjelder for både sensitive og relativt ufølsomme leirer.

Valg av prøvetakingsmetode og behandling av prøven vil påvirke graden av prøveforstyrrelser. De mest kritiske stegene som kan forårsake prøveforstyrrelser er selve prøvetakingen, transport og lagring av prøven. Prøvekvalitet

Tabell 2.2: Vurdering av prøveforstyrrelser basert på endring i poretall (Lunne mfl.)

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Veldig god til utmerket	God til brukbar	Dårlig	Svært dårlig
1-2	<0,04	0,04-0,07	0,07-0,14	>0,14
2-4	<0,03	0,03-0,05	0,05-0,10	>0,10
4-6	<0,02	0,02-0,035	0,035-0,07	>0,07

har en tydelig effekt på oppførselen til leire, og må bli tatt høyde for når man skal velge parametere (Karlsruud mfl., 2013).

Når man er ute etter å undersøke deformasjonsegenskapene til et materiale er man avhengig av å ha en uforstyrret prøve, spesielt om man skal undersøke kryp. Selv den minste deformasjon av prøven kan påvirke strukturen til materialet og føre til feilaktige resultater fra laboratorietester. Helt uforstyrrede prøver er vanskelig å få til, da prøvene kontinuerlig utsettes for ytre forstyrrelser og spenningsendringer som vil kunne påvirke prøve kvaliteten (Johnsen, 2015). Ved forsiktighet og bruk av gode metoder kan imidlertid forstyrrelsene reduseres til et minimum. Når man skal analysere resultater fra ødometerforsøk er man avhengig av god kvalitet på prøvene. Et forsøk på en god prøve viser som regel en tydelig forandring i kurvene ved prekonsolideringsspenningen, noe som ikke kommer like godt frem hos forstyrrede prøver.

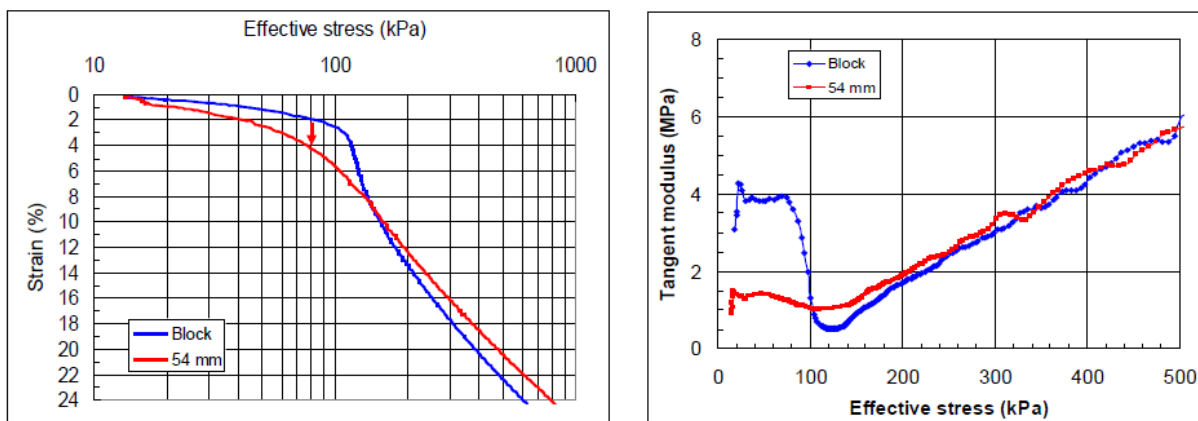
Stor utpressing av vann ved konsolidering av ødometerprøven til  $p'_c$  kan også være en indikasjon på at prøven er forstyrret (Lunne mfl.). En metode å vurdere prøve kvaliteten er å undersøke endring i poretall ( $\Delta e/e_0$ ) ved konsolidering. Tabell 2.2 viser en oversikt over prøve kvaliteten ut fra endring i poretall. Kriteriene er basert på forsøk på marine leirer fra dybder mellom 0-25 m under terreng, med OCR mellom 1-6, vanninnhold mellom 20-67 %, og plastisitet mellom 6-43 %.

Disse kriteriene kan benyttes både for ødometerforsøk og treaksialforsøk.

En annen måte å vurdere prøve kvalitet på kan være å se på forholdet mellom ødometermodulen i OC-området,  $M_{OC}$ , modultallet  $m$  i NC-området, og prekonsolideringsspenningen,  $\frac{M_{OC}}{m \cdot p'_c}$ . En god test har gjerne en verdi rundt 5 eller høyere, en middels god kan ofte vise en verdi mellom 1 og 5, mens en verdi under 1 uttrykker at man har en svært dårlig test.

### 2.4.1 Blokkprøver

De minst forstyrrede prøvene får man fra blokkprøver. Blokkprøver gir mulighet til å studere jorda slik den er i sin naturlige tilstand nede i jorda. Prøvetakingsmetoden er imidlertid dyrere og mer tidkrevende sammenlignet med konvensjonell stempelprøvetaking. Likevel bør den bli brukt i viktige prosjekter der grunnforholdene er utfordrende. Figur 2.17 viser resultater fra CRS-ødometerforsøk på leire fra hhv. blokkprøver og 54 mm sylindrerprøver. Man kan se at de resulterende kurvene er mer veldefinerte for blokkprøven enn for den mer forstyrrede sylindrerprøven, og det blir enklere å analysere leirens oppførsel og bestemme dens prekonsolideringsspenning.



Figur 2.17: Resultater fra ødometerforsøk på blokkprøve og 54 mm sylindrerprøve, vist i  $\sigma' - \epsilon$ -plott og  $\sigma' - M$ -plott (Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013).

Som for alle prøver er det viktig å behandle blokkprøver med forsiktighet. Man må vise stort hensyn ved prøvetaking og transport, og sørge for at de blir pakket inn og lagret under forhold som er relativt likt som nede i jorda. Det er også hensiktsmessig å teste prøvene så raskt som mulig etter prøvetaking, da lagringstiden kan påvirke prøve kvaliteten. Etter en tid begynner prøven å svulle, og dette gjør seg ekstra bemerket i blokkprøver der man ikke har noen sideveis støtte. Skånsom behandling av prøven ved trimming og innbygging til forsøksapparatene på laboratoriet er også avgjørende for et godt forsøksresultat.

## **2.5 Modellering av kryp fra CRS-forsøk**

Med dagens laborierutiner utfører man som regel trinnvise ødometerforsøk (IL) for å studere volumetrisk kryp i leire. Disse forsøkene tar relativt lang tid, ettersom dagens standarder tilsier at man skal kjøre hvert lasttrinn med mange timers varighet. Den lange varigheten gjør forsøkene kostbare, og de tar opp stor kapasitet på laboratoriet. Dette kan føre til at slike forsøk ikke blir prioritert i forbindelse med setningsberegninger i byggeprosjekter. Erfaringsmessig blir det i størst grad utført vanlige kontinuerlige ødometerforsøk (CRS), og da får man som kjent ikke informasjon om krypparametere.

Med utgangspunkt i sammenhengen mellom de primære og sekundære deformasjonsparameterene som beskrevet i kapittel 2.3.3 kan man i teorien også få informasjon om kryp fra kontinuerlige ødometerforsøk ved å endre litt på forsøksprosedyren. Dette kan i utgangspunktet gjøres på ulike måter, og har som fordel en enorm tidsbesparelse. Forsøk som dette er foreløpig ikke godt nok utprøvd og dokumentert, og derfor ikke implementert i dagens rutiner.

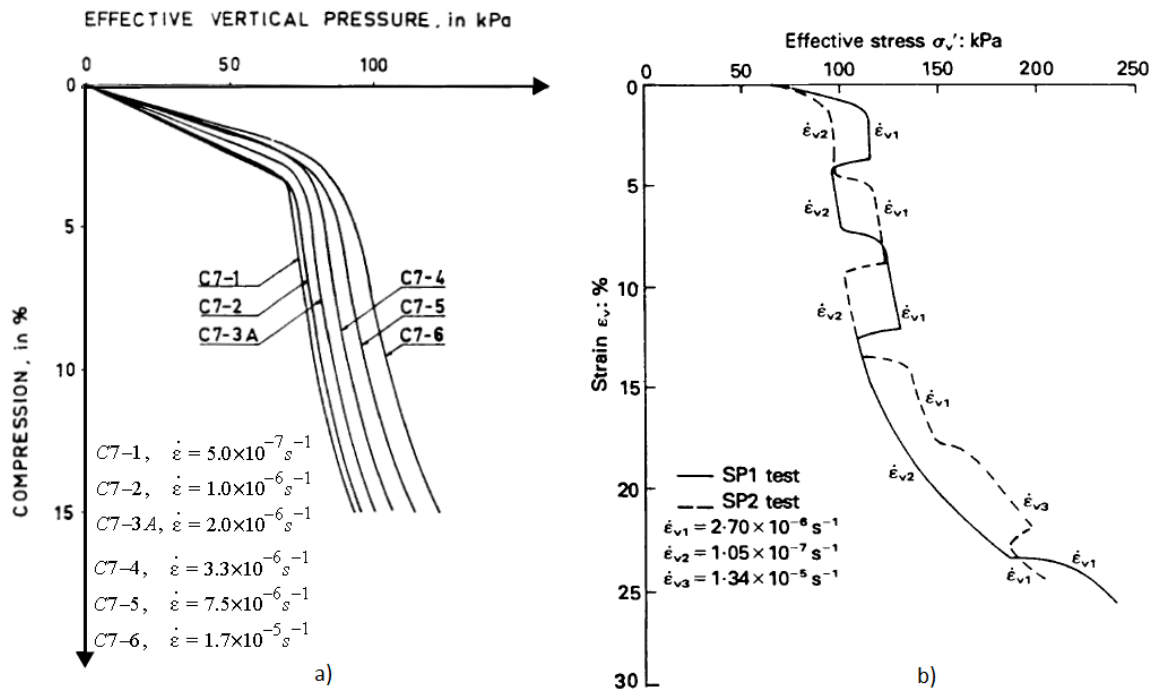
Denne masteroppgaven har som mål å utprøve metoder for akkurat dette, og undersøke om resultatene er gode nok til at dette i fremtiden kan benyttes i stedet for IL-forsøk, med tilsvarende eller bedre kvalitet og pålitelighet.

### **CRS-ødometerforsøk med variert tøyningshastighet**

[Länsivaara \(1999\)](#) benytter forbindelsen mellom primær- og krypdeformasjoner til å evaluere forholdet mellom tøyningshastighet og prekonsolideringsspenning. Det er i lang tid blitt sett på effekten som tid og tøyningshastighet har på deformasjonsegenskapene til en leire. Ut fra observasjoner fra flere forskere er det funnet at tøyningshastigheten påvirker effektivspenningen som prøven opplever. En generell observasjon er at høy tøyningshastighet gir høyere effektivspenninger for en gitt tøyning enn ved lavere tøyningshastighet. Dette er vist i figur 2.18 a). Det blir derfor konkludert med at tøyningshastigheten har stor innflytelse på prekonsolideringsspenningen til en prøve.

Det blir også funnet at det, i det normalkonsoliderte området, eksisterer et konstant forhold mellom spenning-tøyningsskurvene som korresponderer til ulike tøyningshastigheter på en prøve. [Leroueil mfl. \(1985\)](#) konkluderer med at denne oppførselen blir kontrollert av et unikt effektivspenning-tøyningforhold, noe som er i tråd med tidslinjene til [Bjerrum \(1967\)](#) og isotache-prinsippet til [Šuklje \(1957\)](#). Dette kan ses fra figur 2.18 b) der det har blitt kjørt et CRS-forsøk med variasjon i tøyningshastigheten. Man kan se at de ulike tøyningshastighetene gir forskjellige, men omtrent parallelle effektivspenningsrespons. Jo lavere tøyningshastigheten er, jo større vil krypdeformasjonene bli.

Med utgangspunkt i det konstante forholdet mellom effektivspenning/tøyning-



Figur 2.18: Tøyningsratens påvirkning på effektivspenning ut fra a) CRS-tester med forskjellige tøyningsrater på Bäckebolleire (Sallfors, 1975) og b) CRS-test med varierende tøyningsrate på leire fra Batiscan (Leroueil mfl., 1985).

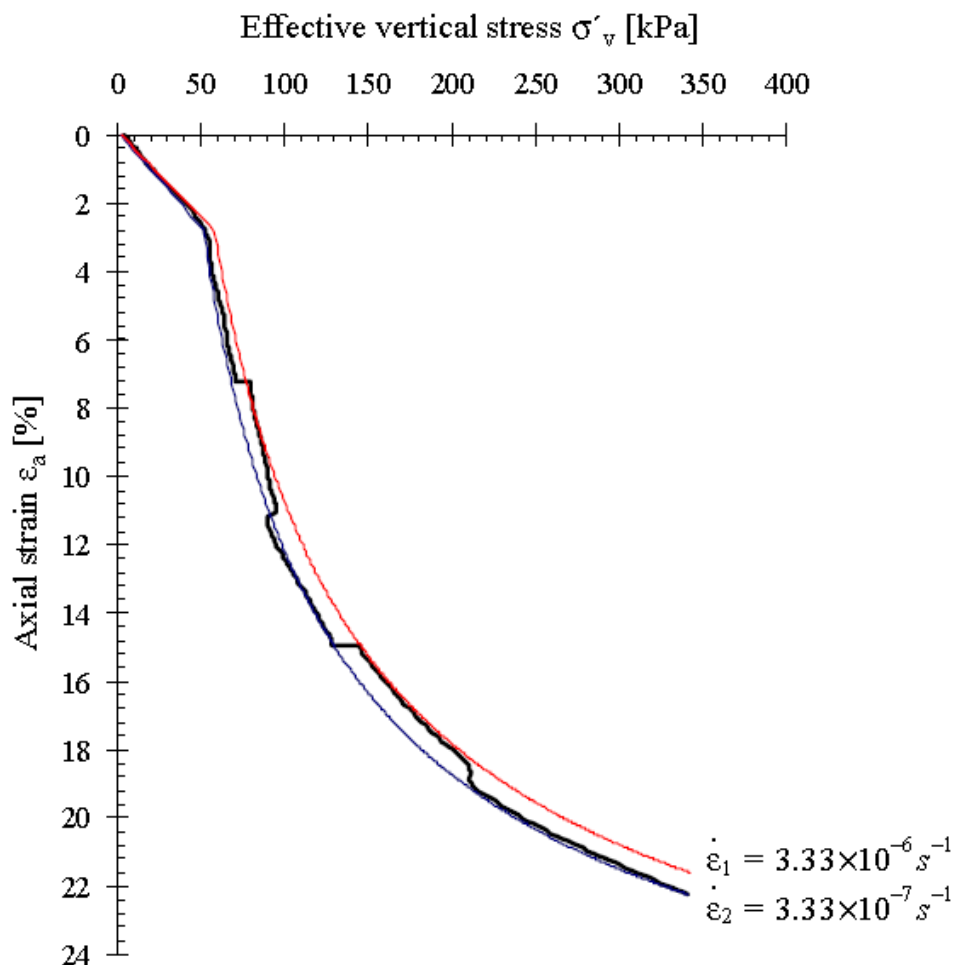
kurvene fra ulike tøyningshastigheter, og sammenhengen mellom primære og sekundære deformasjonsegenskaper, definerer Länsivaara (1995) følgende forhold:

$$\frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v2}} = \frac{p'_{c1}}{p'_{c2}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \right)^B \quad (2.13)$$

som beskriver at forholdet mellom effektivspenningene ved en gitt tøyning er lik forholdet mellom de tilsvarende prekonsolideringsspenningene oppnådd ved ulike tøyningshastigheter, her nummerert 1 og 2. Forholdet mellom tøyningshastighetene forbindes med faktoren  $B$ , som er relasjonen mellom de primære og sekundære deformasjonsparameterne.

Länsivaara (1999) utførte CRS-forsøk med ulike tøyningshastigheter, som vist i figur 2.19. Fra dette forsøket kan man ved bruk av konseptet bak ligning

(2.13) og forholdet mellom  $m$  og  $r_s$  få informasjon om materialets krypparametere. Med basis i ligning (2.13) reformulerer Länsvaara (1999) Janbus



Figur 2.19: CRS-ødometerforsøk med varierende tøyningshastighet på Eberg-leire (Länsvaara, 1999).

uttrykk for kryptøyning i ligning (2.7), og får følgende:

$$\epsilon_s = \frac{1}{r_s} \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right) \quad (2.14)$$

Denne kryptøyningen vil være lik den primære tøyningen som korresponderer til en spenningsendring fra  $\sigma'_i$  til  $\sigma'_j$ , som gir

$$\epsilon_s = \epsilon_p = \frac{1}{m} \ln \left( \frac{\sigma'_j}{\sigma'_i} \right) \quad (2.15)$$

Setter man inn fra ligning (2.13) får man så

$$\epsilon_s = \epsilon_p = \frac{1}{m} \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)^B \quad (2.16)$$

Siden  $\frac{m}{r_s} = B$  kan man finne  $r_s$  ved å sette inn for  $m$  og  $B$ .  $B$  kan finnes ut fra ligning (2.13), og modultallet  $m$  har man informasjon om fra ødometermodulkurven. Mesri og Godlewski (1977) oppgir at det er viktig at man bruker det modulnummeret som svarer til en gitt effektivspenning, altså sekanten  $m_{sek}$ :

$$m_{sek} = \frac{M(\sigma')}{\sigma'} \quad (2.17)$$

der  $(\sigma')$  er ødometermodulen fra testen og  $\sigma'$  er effektivspenning.

Man får til slutt

$$r_s = \frac{M(\sigma')}{\sigma' B} \quad (2.18)$$

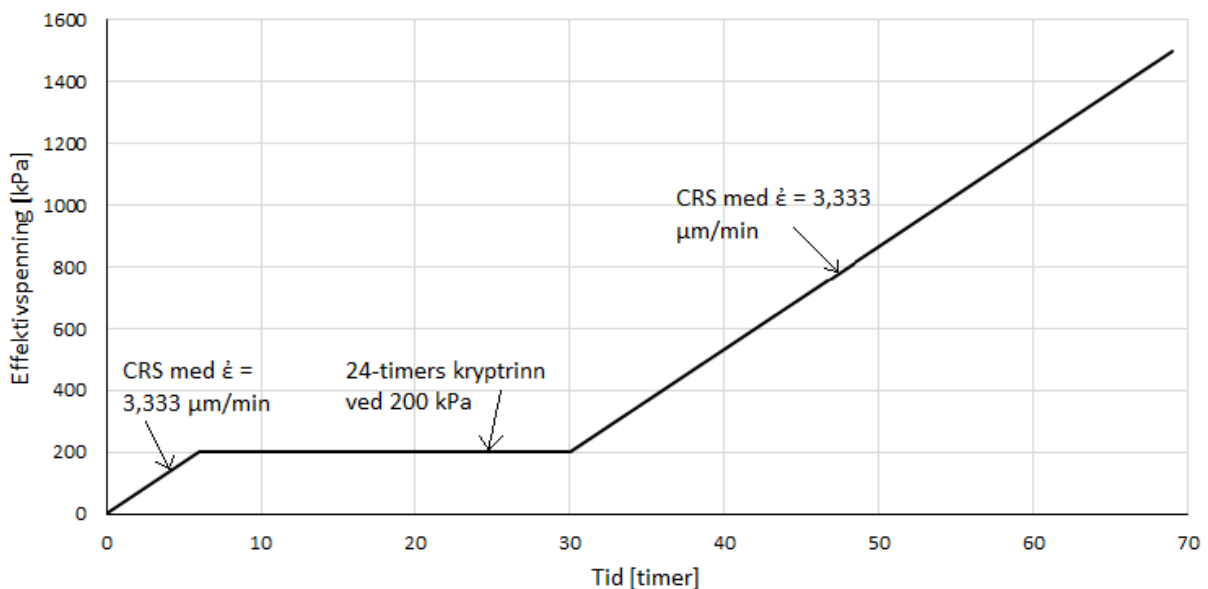
### CRS-ødometerforsøk med kryptrinn

En annen måte å få informasjon om  $r_s$  fra CRS-forsøk kan være å legge inn et kryptrinn i et konvensjonelt CRS-forsøk, slik som man så figur 2.6. Dette gjøres ved å la testen gå med konstant tøyningshastighet opp til en gitt effektivspenning, holde denne spenningen i et visst antall timer, og fortsette med konstant tøyningshastighet etterpå. Det kan være hensiktsmessig å legge inn kryptrinn like etter prekonsolideringsspenningen, da man vanligvis kan observere mest krypt her. Et kryptrinn før  $p'_c$  er ikke hensiktsmessig, da man ikke ser mye til kryptdeformasjoner i overkonsolidert område. Et annet



alternativ er å legge kryptrinnet ved slutten av testen. Da vil man oppnå en helt jevn ødometerkurve, og i tillegg få informasjon om krypt. Ulempen med å legge kryptrinnet her er at man trolig ikke vil observere like mye krypt ved disse spenningene som i nærheten av  $p'_c$ .

Når man analyserer resultatene kan man finne  $r_s$  fra krypttrinnet og  $m$  fra CRS-testen. Ved å se på  $m_{sek}$  til effektivspenningen som korresponderer til krypttrinnet får man informasjon om  $B$ . Når man har dette forholdet kan man finne den teoretiske  $r_s$  for hele ødometerforsøket ved bruk av ligning (2.18). Et forslag til hvordan dette forsøket kan utføres er vist i figur 2.20.



Figur 2.20: CRS-ødometerforsøk med tøyingsrate  $\dot{\epsilon} = 3,333 \mu\text{m}/\text{min}$  og et 24-timers kryptrinn ved  $\sigma' = 200 \text{ kPa}$ .

Hvorvidt resultatene fra denne prosedyren representerer virkeligheten kan kontrolleres ved å kjøre et parallelt IL-ødometerforsøk på en prøve som er så lik prøven fra krypttesten som mulig. Da kan man sammenligne  $\sigma' - r_s$ -kurven fra CRS-testen og IL-testen og se om de samsvarer godt.

Det kan være at slike forsøk gir bedre resultater for noen leirer enn for andre. Faktorer som sensitivitet, plastisitet og vanninnhold i leira kan påvirke kva-

liteten til resultatene. Det kan for eksempel tenkes at en bløt, sensitiv leire, som har lett for å bli forstyrret, ikke vil gi like gode resultater som en mer plastisk og lite sensitiv leire. Ytre faktorer som lagringstid, lagringsforhold og behandling av prøvematerialet kan også ha innflytelse på resultatet.

# Kapittel 3

## Laboratoriearbeid

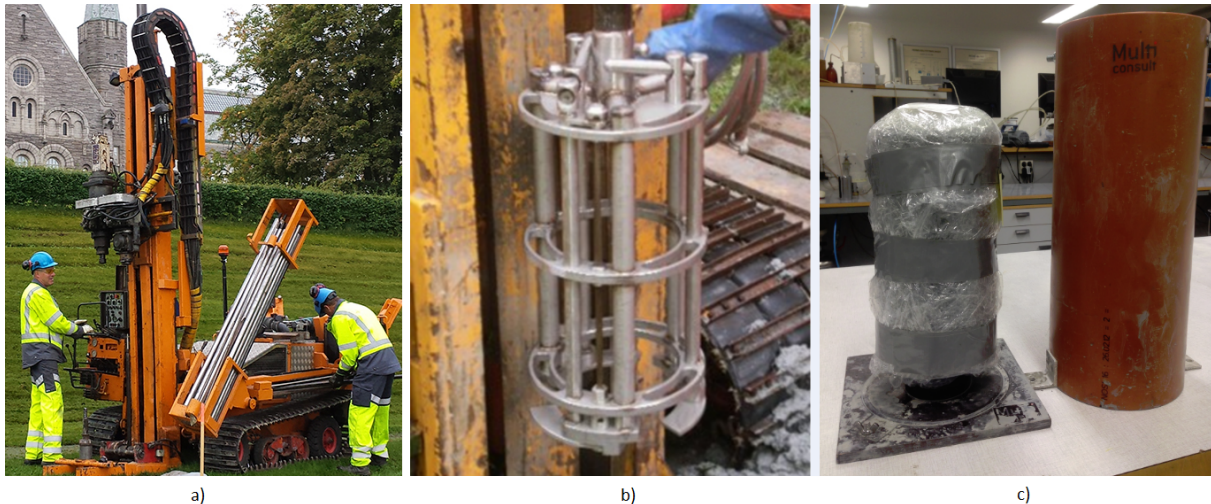
I forbindelse med denne masteroppgaven ble det gjennomført en rekke laboratorieforsøk på laboratoriet ved avdeling for geoteknikk på NTNU. Forsøk av interesse var ødometerforsøk og rutineundersøkelser.

Dette kapitlet omfatter en beskrivelse av testmateriale, utstyr og forsøksprosedyre som er benyttet ved utført laboratoriearbeid.

### 3.1 Prøvetaking

Prøvematerialet som er blitt brukt i laboratorieundersøkelsene er fra miniblokkprøver. Prøvene er tatt opp med NTNUs miniblokkprøvetaker, vist i figur 3.1 a) og b), som gir sylindriske prøver med diameter 160 mm og maksimal høyde 300 mm, som vist i figur 3.1 c). Miniblokkprøvetakeren gjør det mulig å ta opp tilnærmet uforstyrrede prøver som representerer de virkelige forholdene nede i bakken på en god måte, selv for bløt, sensitiv leire. Prøvene er av minst like god kvalitet som blokkprøver fra den konvensjonelle Sherbrookeprøvetakeren, som tar opp prøver med diameter 250 mm og høyde 350 mm. Fordelene med miniblokkprøvetaking er blant annet at det er mindre tidkre-

vende og mer praktisk å gjennomføre. Laboratorieundersøkelser på miniblokkprøver gir ofte svært gode resultater og pålitelig informasjon om materialets egenskaper.



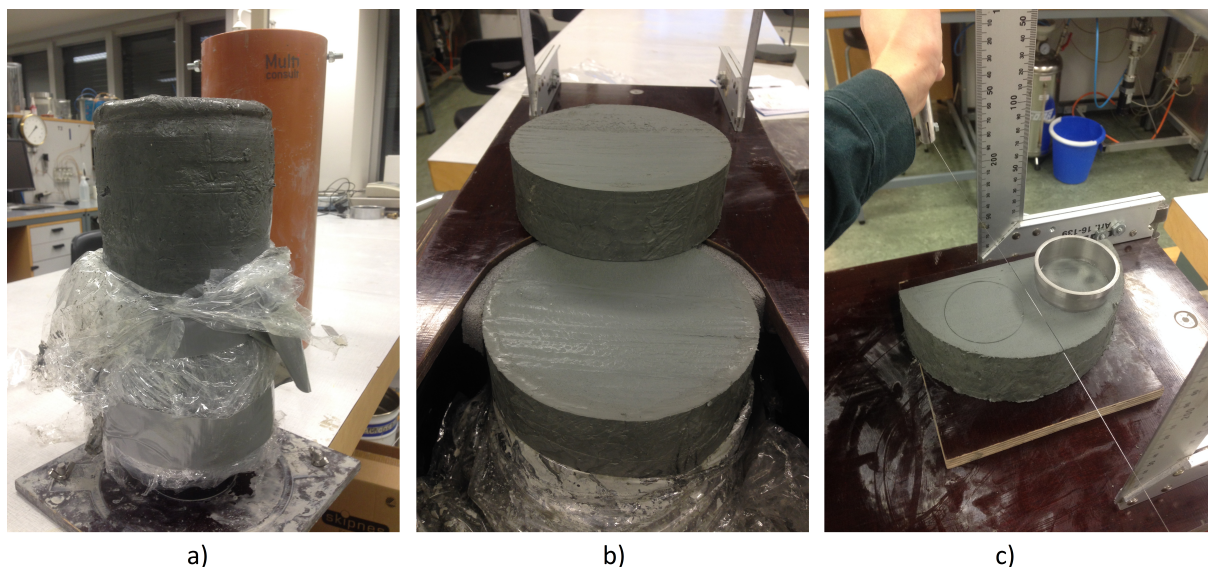
Figur 3.1: a) NTNUs borerigg (Multiconsult, 2016) b) Miniblokkprøvetakeren c) Prøve innpakket i folie.

Detaljer om miniblokkprøvetakerens utforming og prøvetakingsprosedyre er godt beskrevet av Emdal mfl. (2016).

Etter fullført prøvetaking skal prøven pakkes inn i tett folie så raskt som mulig, og plasseres i en plastsylinder som fylles med isoporkuler for å opprettholde fuktighet og hindre støt mot sidene. Om prøven ikke skal testes like etter prøvetaking bør den lagres i et kaldt rom som har temperatur omtrent som nede i bakken.

Utpakking av prøven skal gjøres med forsiktighet. Man fjerner folier til det nivået man skal teste, som vist i figur 3.2 a). De øverste og nederste 2 til 4 cm av prøven skal ikke benyttes til annet enn rutineundersøkelser da de regnes som forstyrret. Dette kan man tydelig se i figur 3.2 a). Om man ikke skal teste hele blokken i en omgang kan toppen av prøven fungere som lokk til resten av

blokken, for å gi beskyttelse mot uttørking under lagring. Man deler så prøven opp i ønskede stykker ved bruk av en trådsag, som vist i figur 3.2 b) og c).



Figur 3.2: a) Utpakket miniblokkprøve klar for oppdeling b) Oppdeling til ønskede stykker c) Oppdelt prøve til ødometerforsøk

En detaljert beskrivelse av hvordan blokkprøvene er blitt oppdelt her er gitt i kapittel 3.5.

## 3.2 Materialbeskrivelse

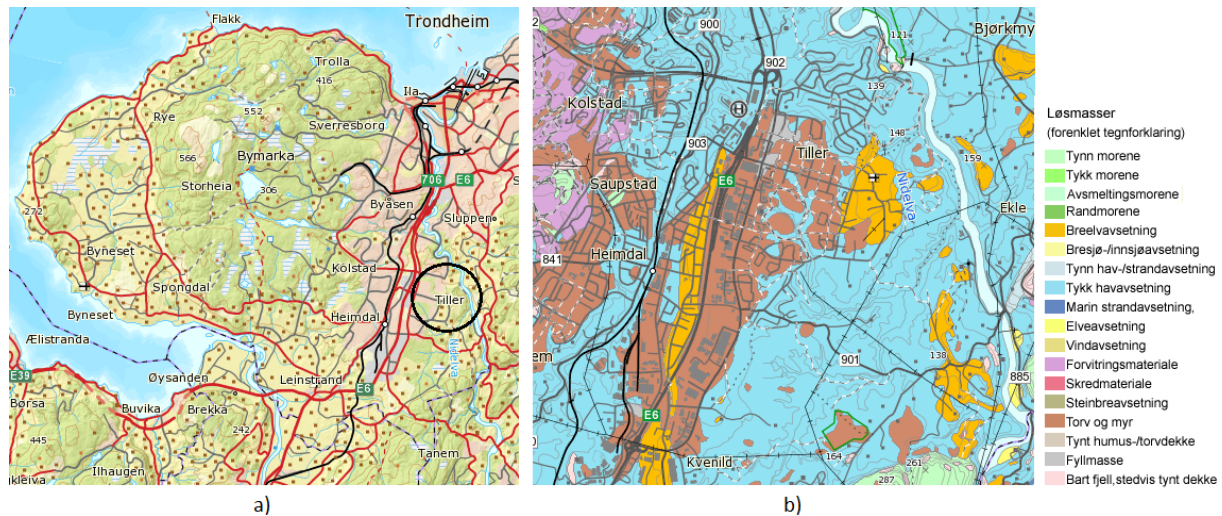
Materialet som er brukt i laboratorieundersøkelsene er trøndersk leire, fra Tiller, Grong og Lilleby. En karakterisering av materialet og beskrivelse av borested blir gitt her.

### 3.2.1 Tiller

Tiller ligger 10 km sør-øst for Trondheim by, som vist i figur 3.3 a). Området ligger omtrent 125 m over havnivå, og grunnvannstanden er ved om lag 0,7 m under terreng. Kvartærgeologisk kart i figur 3.3 b) viser at området består av



en del torv og myr, men i størst grad forekomster av tykk havavsetning som indikerer kvikkleire.



Figur 3.3: a) Lokasjon av Tiller forsøksfelt (Norgeskart) b) Kvartærgeologisk kart over området (NGU)

Tiller har lenge vært NTNUs forsøksfelt for kvikkleire. Dette er på grunn av tykkelsen og homogeniteten til leirforekomstene på stedet, samt at feltet ligger i kort avstand til Trondheim by (Gylland mfl., 2013). Feltet består av et 2 meter tykt topplag med tørrskorpe over et 6 meter tykt ikke-sensitivt leirlag og et nedre lag med kvikkleire fra omtrent 8 meter under terrengnivå.

Jordskredfaren ved området er definert som høy, og i år 1816 gikk det et stort skred like ved Tiller. Jordskredet dro med seg omtrent 7 millioner kubikkmeter med jord, og førte til at 15 personer mistet livet. Siden den tid har det ikke skjedd noen store hendelser, men det er fortsatt geologisk aktivitet med små overflateskred (Johnsen, 2015).

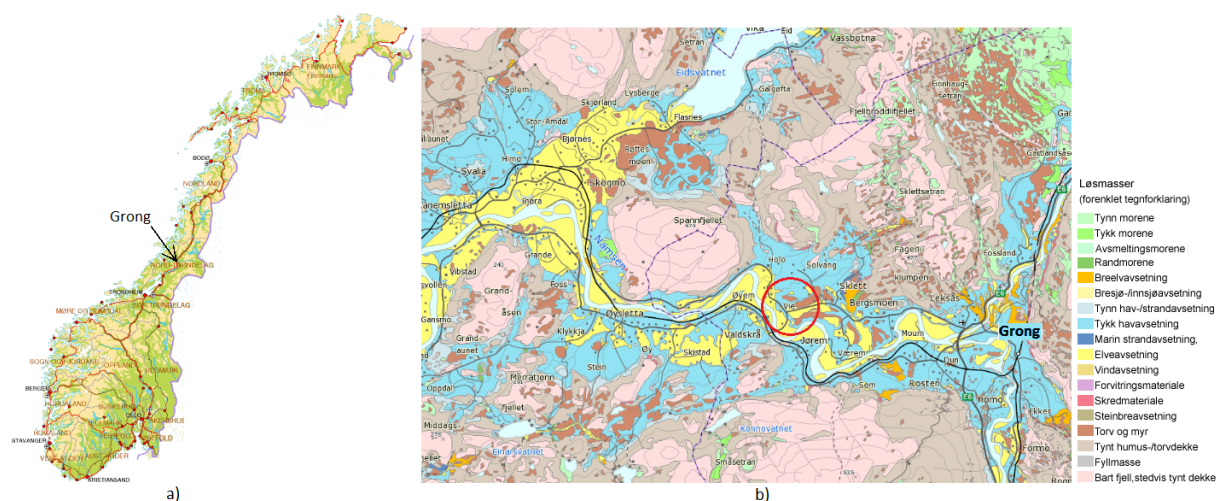
Tillermaterialet er typisk for norske leirer. De myke lagene består i hovedsak av illitt, kloritt og fylosilikat, mens de grovere lagene består av kvarts og feltspat (Gylland mfl., 2013).

Det er gjort tester på to miniblokkprøver fra Tiller i forbindelse med denne oppgaven. Leira som er brukt er tatt fra dybder mellom 5,5 og 6,5 m, altså fra

laget med ikke-sensitiv leire. Beskrivelse av prøvene er gitt i kapittel 3.2.4.

### 3.2.2 Grong

Grong ligger i Nord-Trøndelag fylke, omtrent 40 km øst for Namsos, som vist i figur 3.4 a). Det finnes her store forekomster av kvikkleire og områder med kvikkleirerisiko opp til klasse 5. Løsmassekartet i figur 3.4 b) viser at man har løsmasser av tykk havavsetning, noe som indikerer kvikkleire. Området der det er utført prøvetaking ligger ved kote +35, og grunnvannstanden er rundt 4,3 m under terreng.



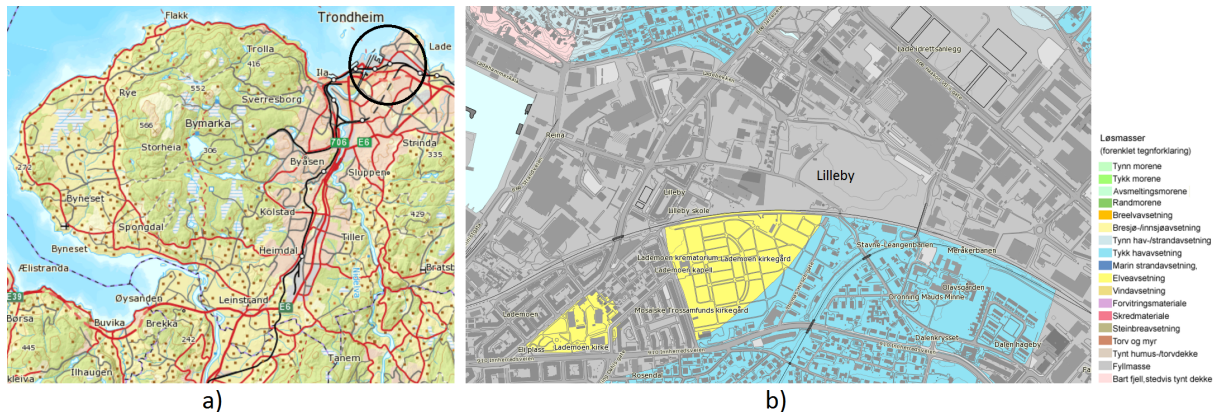
Figur 3.4: a) Lokasjon av Grong (Norgeskart) b) Kvartærgeologisk kart for området (NGU)

Det er utført tester på to miniblokkprøver fra Grong. Rutineundersøkelser på disse prøvene påviser at materialet er kvikkleire.

### 3.2.3 Lilleby

Borestedet ved Lilleby ligger like utenfor Trondheim sentrum, omtrent 1 km fra Trondheimsfjorden. Her ligger terrenget om lag 15 meter over havet, og grunnvannstanden antas å ligge ved kote +8,5. Som man kan se fra kvartær-

geologisk kart i figur 3.5 består området av fyllmasser og deler av elve- og havavsetninger. Grunnen består av et øvre lag av fyllmasser som sand, grus og stein over leire. Leira ved Lilleby karakteriseres av å være plastisk og ha innslag av stein og grus.



Figur 3.5: a) Lokasjon av Lilleby (Norgeskart) b) Kvartærgeologisk kart for området (NGU)

Det ble tatt opp og utført forsøk på én miniblokkprøve i forbindelse med denne masteroppgaven.

### 3.2.4 Beskrivelse av blokkprøver

Det ble gjennomført laboratorietester på totalt fem ulike miniblokkprøver. Resultater fra rutineundersøkelser utført på de ulike prøvene er gitt i tabell 3.1 i kapittel 3.3, og en oversikt over gjennomførte ødometerforsøk fra hver blokk er gitt i tabell 3.2 og 3.3.

#### Blokk 1, Tiller, 5,30-5,60 m

Blokk 1 var en restprøve fra NTNU, og tilgjengelig materiale var fra dybde 5,50-5,60 m. Blokken ble testet 1. september 2016, 16 døgn etter den ble tatt opp. Prøven bestod av homogen, ikke-sensitiv leire av tilsynelatende god kvalitet. Det ble utført 4 ødometerforsøk på denne prøven.



### **Blokk 2, Tiller, 5,50-5,80 m**

Denne miniblokkprøven ble åpnet 15. september 2016, omtrent 5 måneder etter prøvetaking. Leira, som vist i figur 3.6, var meget homogen. Samtidig kan man se at ytterkanten til prøven var noe uttørket som følge av den lange lagringstiden. Totalt ble det gjort 16 ødometerforsøk på prøven.



Figur 3.6: Blokk 2 fra Tiller.

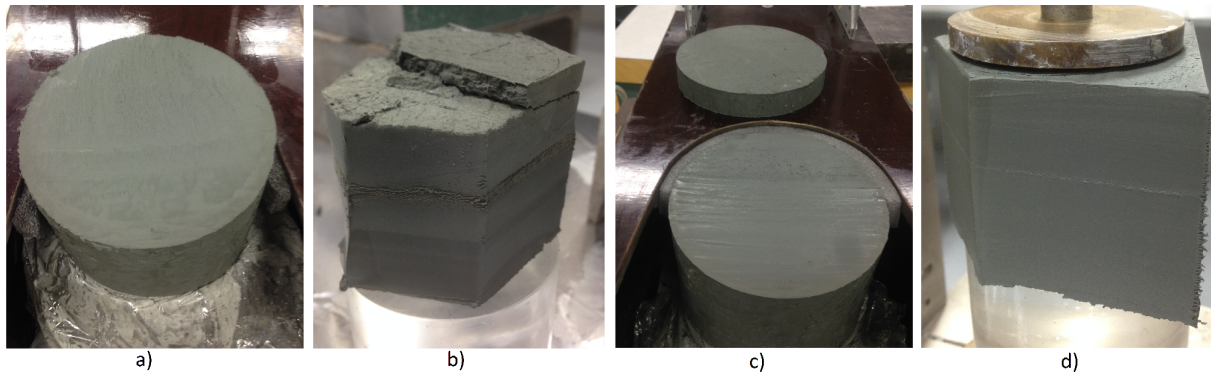
### **Blokk 3, Grong, 9,25-9,50 m**

Blokk 3 ble lagret i 51 døgn før den ble åpnet 21. oktober 2016. Leira, som man kan se i figur 3.7 a) og b), hadde en tydelig lagdeling. Tynne lag av silt gikk igjen i hele prøven, noe som kan ha påvirket resultatene i de gjennomførte laboratorieundersøkelsene.

Det ble gjennomført 11 ødometerforsøk på denne prøven. Resultatet fra flere av forsøkene ble noe merkelig, og for å finne ut hvorfor ble det gjort en kornfordelingsanalyse av materialet. Resultater fra dette er gitt i kapittel 3.3, og kornfordelingskurven er vist i figur C.1. Andre utførte rutineundersøkelser påviser forøvrig at materialet er kvikkleire.

### **Blokk 4, Grong, 10,0-10,3 m**

Denne blokken ble tatt opp på samme dag som blokk 3, men ikke åpnet før



Figur 3.7: a) Blokk 3 b) Lagdeling, blokk 3 c) Blokk 4 d) Lagdeling blokk 4

19. november 2016. Den ble altså lagret i 80 døgn før testing. Leira, som man kan se i figur 3.7 c) og d), hadde i likhet med blokk 3 tydelige lag av silt gjennom hele prøven. Denne prøven hadde også kvikkleireoppførsel.

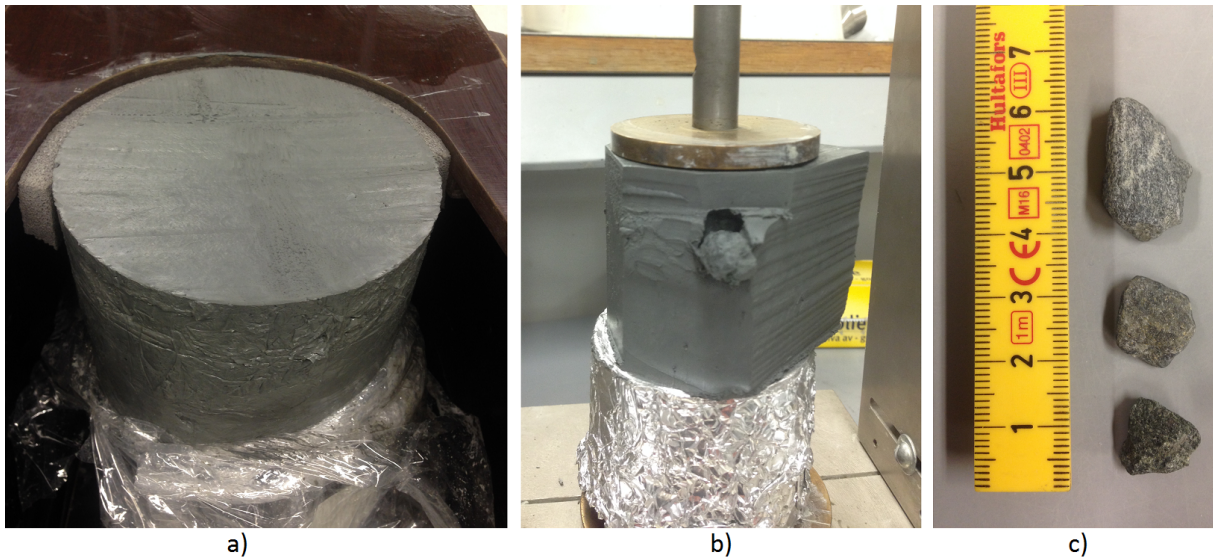
Det ble gjort 3 ødometerforsøk på blokk 4.

### **Blokk 5, Lilleby, 8,30-8,60 m**

Blokk 5 fra Lilleby var den ferskeste blokkprøven som ble testet. Den ble åpnet den 25. november, kun 2 dager etter prøvetaking. Som man kan se i figur 3.8 ble det funnet en mengde steiner av ulik størrelse i blokkprøven. Bestanden av steiner gjorde det utfordrende å bygge inn prøver til ødometerforsøk, og kan ha påvirket resultatene. Leira antas å ha et høyt saltinnhold, da det ble observert saltkrystaller på ødometerutstyret under og etter testing. Til sammen ble det utført 4 ødometerforsøk på denne leira.

## **3.3 Rutineundersøkelser**

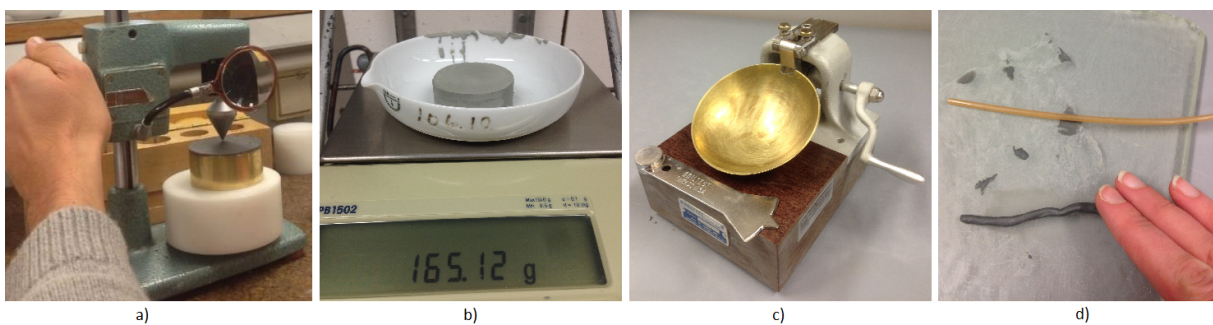
Rutineundersøkelser utføres for identifisering og klassifisering av jordart, og for kontroll av prøve kvalitet. Data fra slike tester kan også fortelle noe direkte om de mekaniske egenskapene til jorden som blir testet, for eksempel gjennom konusforsøk og enaksforsøk. Rutineundersøkelser baserer seg i hoved-



Figur 3.8: a) Blokk 5 b) Stein funnet ved trimming av prøve til ødometerforsøk c) Stein fra blokkprøven.

sak på erfaringsverdier som er blitt utarbeidet gjennom tiden.

Det ble gjennomført ulike tester på materialet fra Tiller og Grong. Tester av interesse var konusforsøk, vanninnhold, flytning og plastisitet, som vist i henhold til figur 3.9 a)-d). Det ble også utført en kornfordelingsanalyse på blokk 3.



Figur 3.9: a) Konusforsøk b) Vanninnhold c) Flytegrense d) Plastisitet

I konusforsøk kan man finne uomrørt og omrørt skjærstyrke,  $S_u$  og  $S_r$ , og sensitiviteten  $S_t$ . Vanninnholdet,  $w$ , angir hvor mye vann man har i materialet i forhold til tørt materiale, og finnes ved å undersøke massen til materialet i naturlig tilstand og tørket tilstand. Flyteparameterne bestemmes ved bruk av et casagrande-apparat, der man finner vanninnholdet,  $w_L$ , i det materia-

let begynner å flyte. Materialet røres om og fordeles i skålen, og man lager et spor som skiller materialet på midten ved bruk av en spordanner. Skålen løftes og slås i bakken 25 ganger ved hjelp av ei sveiv, og det tas utgangspunkt i at materialet flyter i det de to leirdelene møtes med en kontaktflate på 12,5 mm. For å oppnå dette må man enten tilsette eller fjerne vann fra prøven. Plastisitetsgrensen,  $w_p$ , defineres som det laveste vanninnholdet materialet kan ha hvor det viser plastisk oppførsel i omrørt tilstand.  $w_p$  bestemmes ved å rulle materialet til en pølse med diameter 3,18 mm, og måle vanninnholdet i det den begynner å gå i oppløsning.

Kornfordelingen til et materiale kan man finne ved bruk av et hydrometer. Materialet blir siktet gjennom en sikt med hulldiameter  $75\mu m$  ved hjelp av pensel og destillert vann, og tilsatt dispergeringsmiddel for å forhindre partiklene å fnokke seg sammen. Det hele blir nøye helt over i en sylinder, og tilsatt vann til blandingen rommer 1 liter. Sylindere blir ristet godt og plassert i vannbad med konstant temperatur. Når dispergeringsmiddelet er godt fordelt, ristes sylindere på ny og man kan begynne testen. Konsentrasjonen av partikler,  $R$  [g/l], blir da målt med et hydrometer ved ulike tidspunkt, og temperatur blir notert.

Ved rutineundersøkelser kan man bestemme om en leire er kvikk. Kvikkleire defineres ut fra følgende kriterier:

- Omrørt skjærstyrke,  $S_r < 0,5$  kPa
- Sensitivitet,  $S_t > 30$
- Flyteindeks,  $I_L > 1$

Resultatene fra rutineundersøkelsene er gitt i tabell 3.1. Vanninnholdet er gitt som et gjennomsnitt for hele blokkprøven, mens de andre testene er gjort i



topp av prøven. Det ble ikke gjort rutineundersøkelser på blokk 1, men materialet antas å ha tilnærmet like egenskaper som materialet i blokk 2.

Tabell 3.1: Resultat fra rutineundersøkelsene på blokkprøvene som er brukt i laboratoriearbeidet.

		Blokk 1, Tiller	Blokk 2, Tiller	Blokk 3, Grong	Blokk 4, Grong	Blokk 5, Lilleby
Dybde	[m]	6,30-6,60	5,50-5,80	9,25-9,50	10,0-10,3	8,30-8,60
$w$	[%]	41,1	33,0	32,5	30,5	30,4
$S_u$	[kPa]	-	28,7	60,7	74,1	45
$S_r$	[kPa]	-	2,90	0,41	0,78	11
$S_t = \frac{S_u}{S_r}$	[-]	-	10	148	95	4
$w_L$	[%]	-	32,3	25,4	24,6	32,8
$w_P$	[%]	-	21	19,4	22,2	19,7
$I_P = w_L - w_P$	[%]	-	11,3	5,96	2,35	13,1
$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P}$	[-]	-	1,06	2,19	3,53	0,82

Resultater fra kornfordelingsundersøkelsen viser at materialet i blokk 3 har et leirinnhold på omtrent 42 %, noe som påviser at materialet er leire. Kornfordelingskurven til materialet er vist i figur C.1 i vedlegg C.

### 3.4 Ødometerforsøk

Ødometerforsøk kan utføres trinnvist (IL) og kontinuerlig (CRS). I trinnvise forsøk belastes prøven med konstant spenning over en viss tid i flere trinn. Hvilke laster man ønsker å utsette prøven for, og hvor lang trinntid man vil ha, kan man bestemme selv. Dette varierer ut fra testmaterialets egenskaper og hva man vil teste. Ved kontinuerlige ødometerforsøk belastes prøven med en konstant deformasjonshastighet. Denne hastigheten er gitt i deformasjon per tidsenhet, og man kan regulere den selv. Man velger også hvilken spenning man vil at forsøket skal avsluttes ved.

De to ulike måtene å utføre ødometerforsøk har noe forskjellig prosedyre for beregning av parametere.

### Beregninger, CRS-forsøk:

Deformasjon, tid, totalspenning og poretrykk i bunn av prøven blir registrert under forsøket. De effektive spenningene blir regnet ut ved å trekke fra to tredjedeler av poretrykket fra totalspenningen:

$$\sigma'_m = \sigma - \frac{2}{3}u_b \quad (3.1)$$

Dette er på grunn av at man måler poretrykket i bunn, noe som ikke vil være representativt for hele prøven da dreneringen i toppen går raskere enn i bunnen. Man kan i stedet se for seg at man har en elliptisk fordeling av poretrykket i prøven, noe som da blir tatt hensyn til med faktoren på  $\frac{2}{3}$ .

Ødometermodulen beregnes som følger:

$$M = \frac{d\sigma'}{d\epsilon} \quad (3.2)$$

Konsolideringskoeffisienten finnes fra følgende ligning:

$$c_v = \frac{d\sigma'}{dt} \frac{[H(1-\epsilon)]^2}{2 * u_b} \quad (3.3)$$

der  $H$  er drenasjehøyden, største avstand til nærmeste drenasjemulighet. I ødometerforsøk har man enveis drenasje, og  $H$  er derfor lik høyden av ringen, altså 20 mm.

**Beregninger, IL-forsøk:**

Ved plotting av effektivspenning og tøyning bruker man verdiene som er oppnådd ved slutten av hvert lasttrinn. Ved beregning av ødometermodul  $M$  benytter man endringen i effektivspenning og tøyning mellom hvert lasttrinn. Tidsmotstand og tidsmotstandstall beregnes etter ligning (2.5) og (2.6) fra kapittel 2.3.2.

Konsolideringskoeffisienten kan beregnes etter Janbus eller Taylors metode. I denne oppgaven er Taylors metode brukt:

$$c_v = \frac{T_{90} * H^2}{t_{90}} = 0,848 \frac{H^2}{t_{90}} \quad (3.4)$$

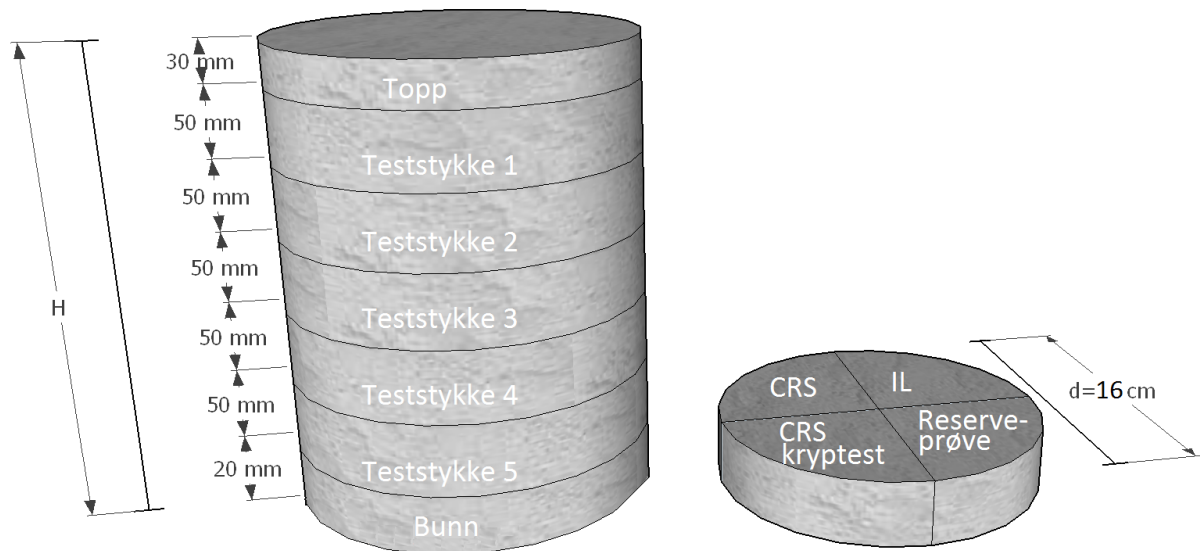
der  $t_{90}$  er den tiden man regner med at 90 % av konsolideringen er fullført.

**3.5 Klargjøring av prøvematerialet til ødometerforsøk**

Ved utføring av ødometerforsøk er det viktig å behandle materialet med forsiktighet og være nøye under innbyggingen av forsøket. Laboratorietestene i denne masteroppgaven er som sagt kun gjort på miniblokkprøver. Alle blokkene ble lagret i kjølerom, dekket med plastfolie og plassert i en plastsylinder fylt med isoporkuler.

Ved åpning av blokkprøvene ble det gjort en visuell klassifisering, og blokkens høyde ble notert. Dybde og prøvetakingsdato ble også registrert. Ved klargjøring for testing ble blokken delt opp som vist i figur 3.10 etter hvert som tester skulle gjennomføres. Det ble ved hjelp av en trådsag skåret av stykker med 5 cm høyde. Disse stykkene ble videre delt i fire deler, der hver del gir nok materiale til ett ødometerforsøk. Toppstykket av blokken ble satt tilbake på

blokken ved lagring. Etter hver oppdeling ble blokken pakket godt inn, og satt kjølig. Leirstykkene som ikke skulle testes umiddelbart ble pakket inn i plastfolie, fuktet papir og tett plastpose.

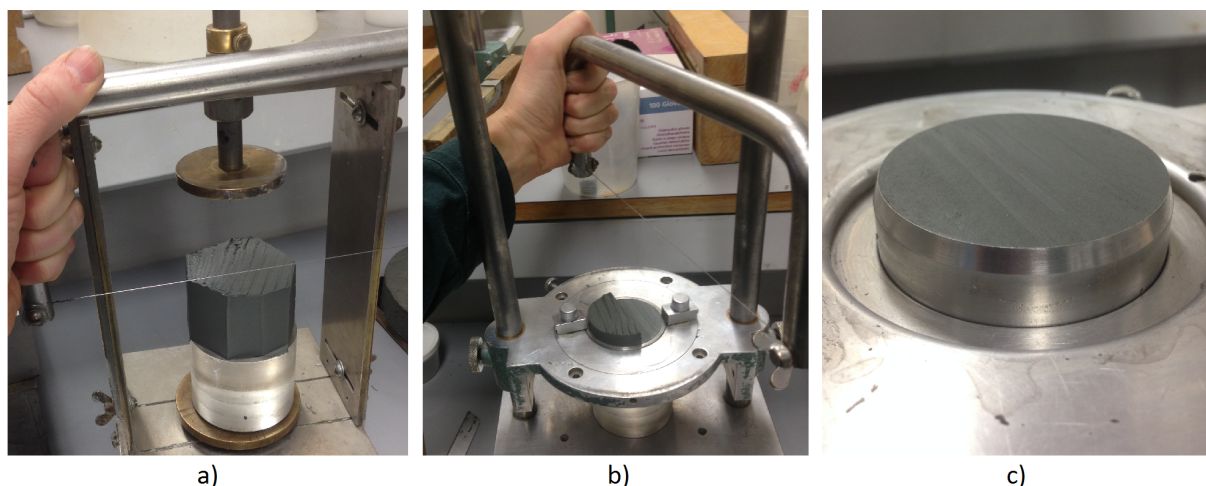


Figur 3.10: Oppdeling av miniblokkprøve.

Ved klargjøring av materialet til et ødometerforsøk ble den ene fjerdedelen delen av et teststykke plassert i et trimmestativ, som vist i figur 3.11 a). Her ble prøven, ved bruk av trådsag, gjort omtrent sylindrerformet med en diameter litt større enn ødometerringen. Det var viktig at de mest forstyrrede sidene av prøven ble skåret bort. Massen til ødometerringen ble notert, og silikonolje ble smurt på yttersiden av ringen for å enkelt kunne fjerne overflødig leire. Ringen ble plassert og skrudd fast i utskjæringsriggen, som vist i figur 3.11 b). Den trimmede leirprøven ble satt i bunn av riggen, og ringen ble presset ned i leira til man var sikker på at den var fylt med leire fra topp til bunn. Prøvens overflater ble gjort glatte ved å skjære av leire fra midten og ut til sidene ved bruk av trådsag, som vist i figur 3.11 b), og overflødig leire ble fjernet. Når man hadde forsikret seg om at overflatene ikke hadde noen ujevnheter, som i figur 3.11 c), ble ringen og prøvens totale masse notert. Prøven ble så testet



umiddelbart.



Figur 3.11: a) Trimming av prøve til ødometerforsøk b) Utglatting av prøvens overflater c) Ferdig trimmet prøve klar for testing

I samtlige forsøk ble lik prosedyre for innbygging av ødometerprøven i ødometeret fulgt. I topp og bunn av ødometerprøven skal man ha filter for å unngå at leira tetter poretrykksensoren, og hindre at den trenger seg gjennom toppstykket i toppen og tetter dreneringshullene. Før hvert forsøk ble disse filtrene vasket og rensset i et UV-strålingsapparat, og deretter lagt i vakuum sammen med destillert vann for å fjerne eventuelle luftbobler i filternes porer. Før innbygging i ødometeret ble det sørget for at det ikke eksisterte luftbobler ved poretrykksensoren. Eksistens av luftbobler kan påvirke poretrykkmålingene negativt. Dette ble gjort ved å sprøyte luftfritt vann inn i drensledningen til den var mettet med vann. Det ble tilført vann til det fylte bunnen av ødometeret. Da ble drensledningen stengt for å tillate måling av poretrykket i bunn. Alle luftbobler som kom ut av slangen ble fjernet og bunnfilteret kunne legges forsiktig på plass. Den ferdigtrimmede prøven ble så glidd varsomt på plass over bunnfilteret, og det ble her også sørget for at luft ikke kom med. Toppfilteret ble lagt på topp av prøven, og det ble nøye kontrollert at det var perfekt plassert. Om filteret ikke ligger perfekt innenfor

ringen er det sannsynlig at det kommer til å sette seg fast under testen. Det hele ble så skrudd fast, og laststykket ble lagt på. Prøven ble ved hjelp av et dreiehjul ført opp helt til toppstykket hadde kontakt med lastsensoren. Deretter ble ønsket ødometerprosedyre valgt, og forsøket var i gang.

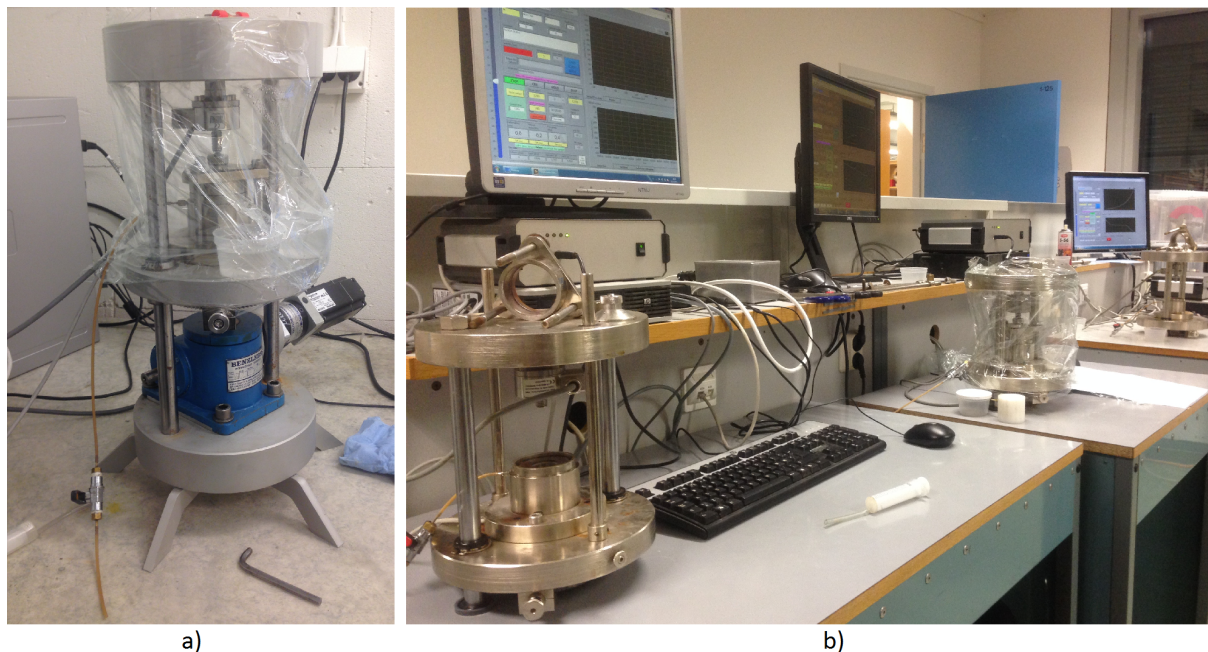
### 3.6 Forsøkslokasjon

Det ble gjennomført laboratoriearbeid ved to ulike lokasjoner, begge ved geoteknikkavdelingen på NTNU. Det ene laboratoriet, *lab 1*, er plassert i et rom nede i kjelleren der man kan kontrollere romtemperaturen. Her ble et mobilt ødometer plassert og gjort klart til forsøk, som vist i figur 3.12 a). Temperaturen i rommet ble holdt konstant ved 6 °C. Denne temperaturen tilsvarer in situ-temperaturen til testmaterialet relativt godt, og forhindrer i tillegg at materialet tørker ut under forsøk. Siden dette laboratoriet er plassert i kjelleren, skjermes også forsøkene for trafikk og støy fra omgivelsene. Testene som utføres her får derfor omgivelser som representerer in situ-forhold på en god måte. Det var ønskelig å utføre de fleste forsøk ved lab 1, men på grunn av tidsbegrensninger ble forsøkene som var mest sensitive for forstyrrelser fra omgivelsene prioritert, i første rekke IL-forsøk med lang trinntid.

Det andre laboratoriet, *lab 2*, er plassert i 1. etasje, og her ligger romtemperaturen på rundt 23 °C. Her har man tre ødometere for bruk, som vist i figur 3.12 b). Alle CRS-forsøk ble utført ved lab 2. I denne laben er det større pågang og mer trafikk enn i lab 1, noe som sammen med temperaturen kan påvirke testresultatene negativt. Rutineundersøkelsene ble også gjennomført ved lab 2.

I tillegg til laboratoriene ved NTNU ble det brukt resultater fra tre ødometer-

forsøk gjennomført av Anders Gylland ved geoteknisk laboratorium hos Multiconsult, Trondheim. Disse forsøkene er i forsøkstabell og resultater markert med «\*».



Figur 3.12: a) Lab 1 b) Lab 2

## 3.7 Gjennomførte ødometerforsøk

Det ble utført ulike typer ødometerforsøk i forbindelse med denne masteroppgaven. Hensikten med forsøkene var i hovedsak å sammenligne IL-forsøk og CRS-forsøk med ett kryptrinn (videre kalt kryptforsøk), for å se om prosedyren som ble diskutert til slutt i kapittel 2.5 gir tilfredsstillende resultater i forhold til å finne  $r_s$  fra kryptester.

For å kunne sammenligne disse typer forsøk var det viktig å teste prøver som var tilnærmet identiske for å utelukke at eventuelle avvik i resultatene kom av ulik prøve kvalitet og variasjon i materialegenskaper. For å oppnå dette ble testene som skulle sammenlignes gjort på prøver fra eksakt samme dybde.

Hvert stykke av miniblokkprøven, som vist til høyre i figur 3.10, representerer én testserie. Tester innenfor samme testserie ble sammenlignet, der en serie primært bestod av en IL-test, en vanlig CRS-test og et krepforsøk. Hvert teststykke hadde en reserveprøve i tilfelle en av testene skulle bli mislykket. Siden testseriene i utgangspunktet var så like som overhodet mulig ble det forventet at resultatene skulle samsvare godt. Testene ble utført på leire fra blokk 1 til 5. Det ble også gjort en testserie på omrørt, rekonsolidert leire.

I tillegg til de nevnte testene ble det utført to CRS-tester der tøyningshastigheten ble variert, slik som beskrevet i begynnelsen av kapittel 2.5.

Alle gjennomførte forsøk er ført opp i tabell 3.2 og 3.3 med navn og relevante parametere.

Tabell 3.2: Oversikt over gjennomførte ødometerforsøk

Forsøksnavn	Blokk	Type forsøk	Dybde [m]	Belastning [kPa]	$d\epsilon/dt$ [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	w [%]	$\gamma$ [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	$p'_c$ [kPa]	OCR [-]	$M_{OC}$ [MPa]	m [-]	$c_v$ [ $\text{m}^2/\text{år}$ ]
CRS-101	1	CRS kryptest	6,55	100	3,333	38,9	18,2	66,0	130	2,0	9,5	20,4	45,0
CRS-102	2	CRS kryptest	5,55	200	3,333	32,7	19,0	57,0	150	2,6	Mislykket		
CRS-102.2	2	CRS kryptest	5,55	200	3,333	34,9	18,7	57,0	150	2,6	6,9	25,0	19,3
CRS-103	2	CRS kryptest	5,60	200	3,333	35,8	18,6	57,4	150	2,6	Mislykket		
CRS-103.2	2	CRS kryptest	5,60	200	3,333	36,0	18,5	57,4	150	2,6	10,3	11,9	43,0
CRS-104	2	CRS kryptest	5,65	200	3,333	37,5	18,6	57,9	130	2,2	Mislykket		
CRS-104.2	2	CRS kryptest	5,65	200	3,333	35,6	18,6	57,9	130	2,2	4,0	20,8	12,6
CRS-105	3	CRS kryptest	9,33	200	3,333	32,8	19,4	127,0	550	4,3	15,0	29,0	25,0
CRS-105.2	3	CRS kryptest	9,33	750	3,333	30,9	19,3	127,0	550	4,3	21,9	20,0	31,1
CRS-106	3	CRS kryptest	9,28	700	3,333	33,8	19,1	126,5	550	4,3	21,0	20,3	31,4
CRS-107	3	CRS kryptest	9,38	700	3,333	32,7	19,2	127,4	550	4,3	17,2	22,0	36,0
CRS-108	4	CRS kryptest	10,23	700	3,333	30,0	19,5	135,1	500	3,7	25,5	19,4	49,4
CRS-109	5	CRS kryptest	8,36	200	3,333	30,9	19,2	140,0	100	0,7	11,7	23,0	23,0
CRS-109.2	5	CRS kryptest	8,41	200	3,333	29,6	19,5	140,0	100	0,7	4,0	25,0	7,1
CRS-110*	ASG	CRS kryptest	9,70	1200	2,000	38,0	19,5	95,2	120	1,3	6,5	17,4	32,5
CRS-111*	ASG	CRS kryptest	9,80	1200	2,000	38,5	19,5	96,1	120	1,2	4,0	18,2	22,0
CRS-112		CRS kryptest, omrørt		90	1,666	48,5	16,7	12,0	12	1,0	1,0	30,0	3,4
CRS-112.2		CRS kryptest, omrørt		50	1,666	40,0	18,1	12,0	12	1,0	1,0	29,0	3,5
CRS-1001	2	CRS med variert tøyningshastighet	5,70		4 / 0,4	37,0	18,4	58,3	130	2,2	9,2	22,0	23,2
CRS-1002	3	CRS med variert tøyningshastighet	9,28		4 / 0,4	34,5	19,1	126,5	550	4,3	18,3	21,1	26,8

Tabell 3.3: Oversikt over gjennomførte ødometerforsøk

Forsøksnavn	Blokk	Type forsøk	Dybde [m]	$d\epsilon/dt$ [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	w [%]	$\gamma$ [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	$\sigma'_{v0}$ [kPa]	$p'_c$ [kPa]	OCR [-]	$M_{OC}$ [MPa]	m [-]	$c_v$ [ $\text{m}^2/\text{år}$ ]
IL-001	1	IL 24t	6,55		42,3	18,0	66,0			Mislykket		
IL-001.2	1	IL 12t	6,55		41,3	18,0	66,0	130	2,0	4,7	21,6	4,4
IL-002	2	IL 12t	5,55		33,0	18,4	57,0	150	2,6	3,6	22,0	10,0
IL-003	2	IL 12t	5,60		35,9	18,6	57,4	150	2,6	3,0	23,0	5,3
IL-004	2	IL 24t	5,65		38,5	18,2	57,9	130	2,2	3,3	22,5	6,7
IL-005	3	IL 24t	9,33		34,0	19,2	127,0	550	4,3	10,1	58,0	5,3
IL-006	3	IL 24t	9,28		36,9	19,1	126,5	550	4,3	10,8	18,0	5,3
IL-007	3	IL 24t	9,38		34,0	19,4	127,4	550	4,3	18,6	18,3	10,4
IL-008	4	IL 24t	10,23		32,1	19,7	135,1	500	3,7	11,9	19,6	4,3
IL-009	5	IL 24t	8,41		29,9	19,3	140,0	100	0,7	4,2	26,0	8,0
IL-010*	ASG	IL 24t	10,00		38,3	19,5	98,0	120	1,2	3,4	20,8	4,9
IL-012		IL 6t, omrørt			51,1	17,0	12,0	12	1,0	4,1	33,2	9,0
CRS-001	1	CRS	6,55	3,333	41,9	18,0	66,0	130	2,0	6,3	19,7	17,5
CRS-002	2	CRS	5,55	3,333	32,3	19,0	57,0	150	2,6	3,3	22,3	29,5
CRS-003	2	CRS	5,60	3,333						Mislykket		
CRS-004	2	CRS	5,65	3,333	38,2	18,3	57,9	130	2,2	7,0	20,0	23,3
CRS-005	3	CRS	9,33	3,333	32,3	19,1	127,0	550	4,3	15,1	18,0	25,8
CRS-006	3	CRS	9,28	3,333	34,6	19,0	126,5	550	4,3	16,9	24,0	37,2
CRS-007	3	CRS	9,38	3,333	33,2	19,3	127,4	550	4,3	12,7	20,3	21,0
CRS-008	4	CRS	10,23	3,333	30,5	18,2	135,1	500	3,7	16,7	19,5	53,7
CRS-009	5	CRS	8,36	3,333	30,5	19,3	140,0			Mislykket		

### 3.7.1 Trinnvise ødometerforsøk

IL-forsøkene ble i hovedsak gjennomført med 24 timers trinntid. Det ble utført tre forsøk der trinntiden ble satt til 12 timer for å spare tid, men for å observere mest mulig kryp ble det etter dette besluttet å kun utføre testene med lasttrinn med 24 timers varighet. IL-forsøket på omrørt leire ble imidlertid utført med trinntid på 6 timer på grunn av høyt tidspres.

Valgt lastsekvens varierte noe ut fra type materiale og erfaringer fra tidligere tester. Hver test hadde mellom 7 og 10 lasttrinn, og påført vertikalspenning ble i utgangspunktet doblet for hvert trinn. Alle IL-forsøkene, med unntak av IL-005 og IL-010\*, ble utført ved lab 1. For å forsikre seg om at prøvematerialet ikke tørket ut ble ødometeret dekket med plastfolie og jevnlig tilført vann.

### 3.7.2 Kontinuerlige ødometerforsøk

Det ble utført vanlige CRS-forsøk for å blant annet finne prekonsolideringspenningen til materialet slik at man kunne bestemme hvilket spenningsnivå man burde sette kryptrinnet i kryptestene til, og for å tilpasse lastsekvensen i IL-forsøkene til testmaterialet. Resultater fra disse forsøkene kunne også sammenlignes med krypforsøkene for å vurdere kvaliteten til testene. CRS-forsøkene ble utført med konstant tøyningshastighet på  $3,333\mu m/min$ , og avsluttet ved en effektivspenning på 1500 kPa.

### 3.7.3 Krypforsøk

Krypforsøkene ble utført slik som beskrevet i siste del av kapittel 2.5. For samtlige forsøk, bortsett fra CRS-110\*, CRS-111\*, CRS-112 og CRS-112.2, ble



det brukt konstant tøyningshastighet på  $3,333\mu m/min$ . Et krepstrinn ble lagt inn etter at påført effektivspenning hadde passert prekonsolideringspenningen til materialet. Da ble effektivspenningene holdt konstante i 24 timer, før testen igjen fortsatte med den samme tøyningshastigheten opp til effektivspenningen var 1500 kPa. I noen tester ble krepstrinnet ved en feil lagt før  $p'_c$ , og da måtte testen gjøres på nytt. Det ble i enkelte forsøk også lagt inn et krepstrinn etter endt test for å sammenligne prosedyrene og se hva som gir best samsvar med IL-testene. Det ble her også passet på at materialet ikke tørket ut under testing, og prøven ble derfor tilført vann jevnlig.

#### 3.7.4 CRS-forsøk med variert tøyningshastighet

I disse forsøkene ble det valgt to ulike tøyningshastigheter. For å kunne sammenligne forsøkene med det som er vist i figur 2.19 ble tøyningshastighetene satt til å variere mellom 4,0 og  $0,4\mu m/min$ , altså slik som ble gjort av [Län-sivaara \(1999\)](#). Disse testene ble også avsluttet ved effektivspenning på 1500 kPa.

#### 3.7.5 Rekonsolidering av omrørt prøve

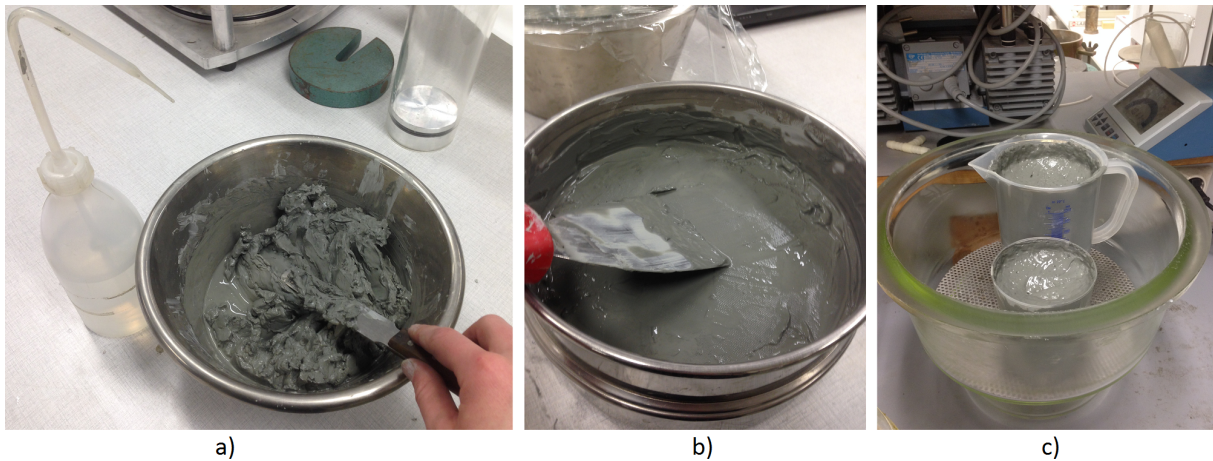
Det var ønskelig å utføre en testserie på fersk leire med lav prekonsolideringspenning og minimal grad av forstyrrelse. For å kunne kontrollere disse egenskapene ble leirmasser rørt om og rekonsolidert til et lavt spenningsnivå. Med en slik leire har man mulighet til å studere forholdet mellom  $\sigma' - r_s$ -kurvene fra IL-forsøk og krepforsøk omtrent gjennom hele testen. Siden all struktur i den opprinnelige leira blir brutt ned og dannet på nytt under kontrollerte forhold, er det i utgangspunktet ingen grunn til at parallelltester på materialet



skal gi noen forskjell i resultat. Det forventes derfor at forsøkene på materialet skal samsvare perfekt. På denne måten kan man forhåpentligvis få en tydelig indikasjon på gyldigheten til den foreslåtte krypforsøk-prosedyren. Samtidig kan man undersøke effekten som eventuelle prøveforstyrrelser og tidligere belastninger og deformasjoner har på resultatet til de gjennomførte testene på de naturlige leirene.

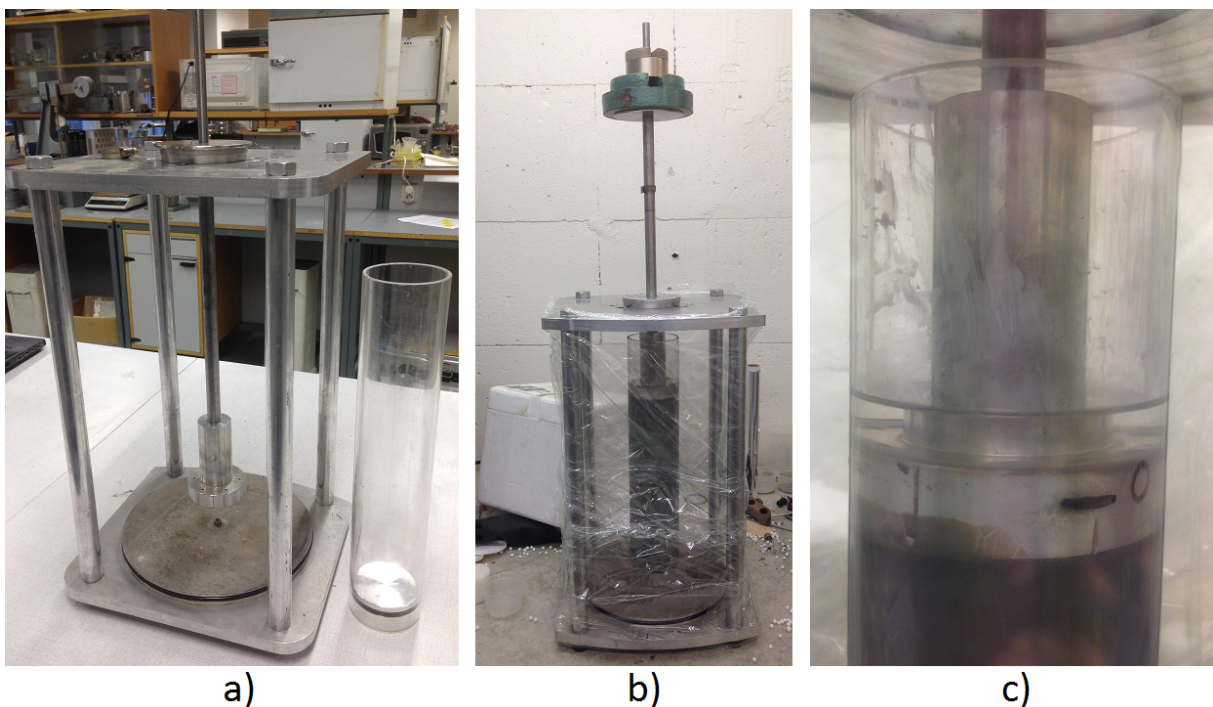
Til omrøring ble det brukt materiale fra blokk 2 fra Tiller, opprinnelig fra dybde 5,55-5,7 m. Omrøringsprosedyren er vist i figur 3.13. Leira ble rørt om for hånd og tilsatt vann for å få en jevn og flytende masse. For å redusere dannelsen av luft i leira ble det brukt destillert vann. Mengde vann tilsatt ble bestemt slik at leira fikk et vanninnhold tilsvarende det dobbelte av flytegrensen. Flytegrensen,  $w_L$ , ble som vist i tabell 3.1 funnet til å være 32,3 %. Erfaringsmessig er  $w_L$  til Tillerleire fra denne dybden omtrent 30 %. Ønsket vanninnhold ble derfor valgt til rundt 60 %. For å oppnå dette vanninnholdet ble det tilsatt en mengde vann som tilsvarer omtrent 23 % av leirens totale masse. Da leirmassen hadde fått en jevn konsistens ble den siktet gjennom en sikt med hulldiameter 500  $\mu\text{m}$  for å fjerne klumper og eventuelle urenheter i leira. Etter sikting ble leira satt noen minutter i vakuum for å fjerne uønskede luftbobler som hadde oppstått under omrøring. Endelig vanninnhold ble målt til eksakt 60 %.

Ved konsolidering av den omrørte leira ble utstyret som vist i figur 3.14 benyttet. En plexiglass-sylinder med et tett, avtagbart bunnstykke ble brukt som beholder for leira. Sylinderen hadde indre diameter på 7,2 cm, og bunnstykket ble tettet ved hjelp av en o-ring. For å belaste leira ble det brukt et stempel av stål som passet perfekt i sylinderen. Stempelet hadde små vertikale hull



Figur 3.13: a) Omrøring av leirmassene b) Sikting gjennom  $500 \mu\text{m}$  sikt c) Leire satt i vaku-  
umapparat

for å tillate leira å drenere bort utpresset vann. Det var festet til en stang og en toppskive der man kunne legge på last. Det hele ble plassert i et stativ for å stabilisere sylindren, og for å kunne kontrollere stangen til stempelet og måle deformasjon.



Figur 3.14: a) Stativ og sylinder b) Sylinder fylt med leire plassert i stativ, lastet på og dekket i  
plastfolie c) Konsolidering av prøven

Etter at trykket i vakuumbeholderen var ned i omtrent 25 mbar ble leira tømt ned i den tette sylindren til den fylte 28 cm. For å forhindre at leire fordelte

seg rundt bunnstykket i sylindren ble det lagt et lag med filterpapir i sylindrens bunn. For å også unngå tetting av drenasjehullene til laststempelet ble det lagt tre lag med filterpapir i overkant av leira. Stempelet ble så ført ned i sylindren til det fikk kontakt med leirmassene.

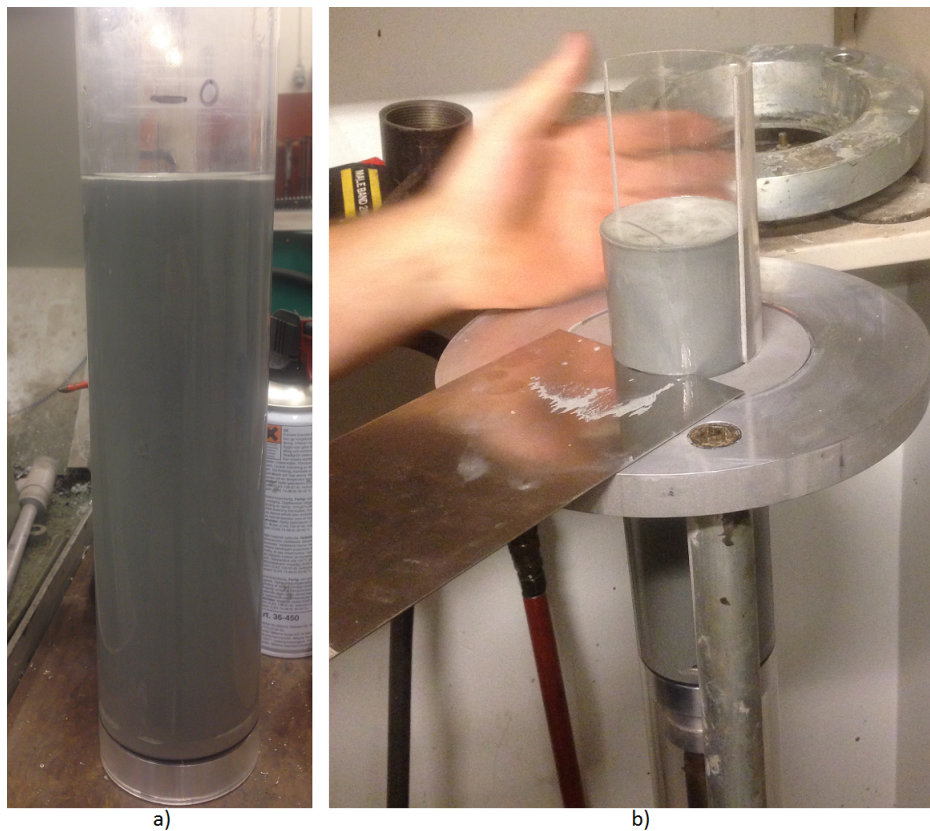
Det var ønskelig å konsolidere leira til 12,0 kPa, noe som tilsvarer omtrent 5 kg. Selve stempelet og stangen belastet leira med 1,2 kg, så det ble derfor lagt på 3,75 kg ekstra ved bruk av vektskiver. For å forhindre uttørking ble oppsettet pakket inn i plastfolie og plassert inne på lab 1 der temperaturen som kjent var omtrent 6 grader. Dette var også hensiktsmessig fordi det var planlagt å utføre et trinnvist ødometerforsøk på materialet ved lab 1, og da oppnår man like testforhold. Konsolideringen vil imidlertid ta lengre tid når det står kjølig, da vannet i leira blir mer viskøst og drenerer ikke bort like raskt som hvis det var romtemperert.

De vertikale deformasjonene i leira ble registrert hver dag for å kunne kontrollere konsolideringsprosessen. Med en konservativt valgt konsolideringskoeffisient på omtrent  $2,0 \text{ m}^2/\text{år}$ , og en drenasjevei på 28 cm, ble forventet tid for fullført konsolidering beregnet ut fra formel (3.4) til å være 12,1 dager. Det ble i beregningene ikke tatt hensyn til at leira stod kaldt. Etter 12 dager ble det fremdeles registrert betydelig deformasjonsutvikling, men etter 16 dager hadde det begynt å stabilisere seg noe. På grunn av tidspress ble det da besluttet å teste prøven. Endelig høyde av prøven var 25,5 cm, og det var da blitt presset ut 23 % av vannet som ble tilsatt under omrøring. Tøyningsutviklingen i løpet av konsolideringen av leira er vist i figur D.1 i vedlegg D.

Prøven ble skjøvet ut av sylindren ved bruk av en vertikal hydraulisk utpresser, som vist i figur 3.15. Leira var fremdeles meget bløt, men selve utpressin-



gen gikk relativt bra. Leirmassene i topp av prøven var fastere og tørrere enn resten av leira, og materialet i bunnen var preget av at de tyngste partiklene hadde sunket. Det ble derfor gjort tester kun på materialet fra midten av prøven. Det ble utført én IL-test og to kryptester på den omrørte leira. Vanninnholdet i materialet som ble testet ble målt til å være rundt 50 %. Det høye vanninnholdet til leira bød på utfordringer ved innbygging av prøvene i ødometeret, men på tross av dette gikk det som planlagt.



Figur 3.15: a) Omrørt leire konsolidert ved 12 kPa i 16 dager b) Utskyvning av prøven

# Kapittel 4

## Resultater

Det ble utført totalt 14 testserier i forbindelse med denne masteroppgaven. Hver testserie bestod primært av en IL-test, en vanlig CRS-test og et kryp-forsøk, mens det i to av seriene (testserie 13 og 14) ble utført en IL-test og en CRS-test med varierende tøyningshastighet. Detaljerte resultater fra alle gjennomførte ødometerforsøk er vist i vedlegg [A](#).

Forsøkene i hver testserie var gjort på prøver fra eksakt samme dybde, noe som gir svært gode forutsetninger for sammenligning av resultatene. For å besvare oppgavens problemstilling er det lagt stor vekt på å sammenligne IL- og krypforsøkene innenfor hver testserie.

I et IL-forsøk får man informasjon om materialets krypegenskaper for hvert lasttrinn, representert av tidsmotstandstallet  $r_s$ . Dette kan man plote mot de tilhørende effektivspenninger i et  $\sigma' - r_s$ -diagram for å se utviklingen av materialets krypmotstand ved de ulike spenningene. I krypforsøkene er  $\sigma' - r_s$ -kurven beregnet ut fra teorien om forholdet mellom  $r_s$  og modultallet  $m$ , basert på krypegenskapene til materialet ved ett lasttrinn og modulkurven fra CRS-delen av forsøket. Ved å sammenligne  $\sigma' - r_s$ -kurvene fra de to ulike for-

søkene kan man få en indikasjon på hvor pålitelige resultatene fra kryptestene er.

Teoretisk sett bør kurvene fra de to ulike forsøkene overlapse perfekt, da prøvene i utgangspunktet er så like som de kan bli. Likevel er det en del faktorer som kan påvirke resultatene. Kvaliteten til testene er avgjørende for et godt resultat. Samtidig kan de ulike materialeegenskapene ha innflytelse på hvor godt en kryptest lar seg gjøre sammenlignet med en IL-test. Eventuelle inhomogeniteter i prøvene kan også gi avvik i resultatene, noe som gjør det vanskelig å utføre sammenligninger.

#### 4.1 Vurdering av prøve kvalitet

For å kunne tolke ut korrekte parametere fra testresultatene er det viktig at de gjennomførte forsøkene, både IL-og kryptforsøk, er av god kvalitet. For å oppnå god kvalitet er det viktig at forsøkene er korrekt utført, i henhold til fremgangsmåten gitt i kapittel 3.5.

Det ble gjennomført i alt 41 ødometerforsøk i forbindelse med oppgaven, 38 ble gjort selv og 3 ble utført av Multiconsult. Av de 38 forsøkene som ble gjort selv, ble 6 mislykket. Dette skyldtes i hovedsak at toppfilteret satt seg fast i ødometerringen under forsøket, men også på grunn av forekomster av stein i ødometerprøvene samt feil kjøring av forsøket. En vurdering av prøve kvalitet er gjort ved å se på endringen i poreteknisk,  $\Delta e/e_0$ , samt forholdet mellom  $M_{OC}$ ,  $m$ , og prekonsolideringsspenningen,  $\frac{M_{OC}}{m \cdot p'_c}$ . En oversikt over denne vurderingen for alle forsøk er vist i tabell B.1 i vedlegg B.

En sammenligning av resultater fra samme type forsøk på omtrent likt ma-

teriale kan indikere på hvor gode forsøkene er, og være med på å avdekke eventuelle feil og uregelmessigheter. Alle IL-forsøk og krypforsøk på materiale fra samme borested er plottet i samme diagram. Selv om prøvene ikke er fra eksakt samme dybde bør resultatene samsvare ganske godt.

#### 4.1.1 IL-forsøk

Figur 4.1 viser et diagram med de gjennomførte IL-testene på Tillerleire, og figur 4.2 viser alle IL-testene på leire fra Grong. Forsøkene på Tillerleire er generelt av god kvalitet, og dette lar seg gjenspeile i det gode samsvaret mellom resultatene i figur 4.1. Man kan se at kurvene fra hvert forsøk er relativt parallelle, med et intervall som samsvarer med dybden prøvematerialet er fra. Modultallet ligger mellom 21 og 23, og  $p'_c$  mellom 130 og 150 kPa for testene. Forsøkene fra Grong er ikke av like god kvalitet. IL-005, -006 og -007 er på prøver fra blokk 3, mens IL-008 er fra blokk 4. Man kan tydelig se at testene fra blokk 3 er noe spesielle. Fram til prekonsolideringsspenningen viser prøvene relativt normal oppførsel, men ved høye spenninger klarer ikke materialet å holde etter for belastningen i like stor grad. Dette vises svært tydelig for test IL-005, der det ved lastøkning fra 400 til 700 kPa har oppstått en tøyningssendring på hele 19 %. Poretrykkresponsen fra denne lastøkningen var opp i 485 kPa, noe som er høyere enn den påførte spenningsendringen. Det kan se ut som det har oppstått full kollaps av materialet.

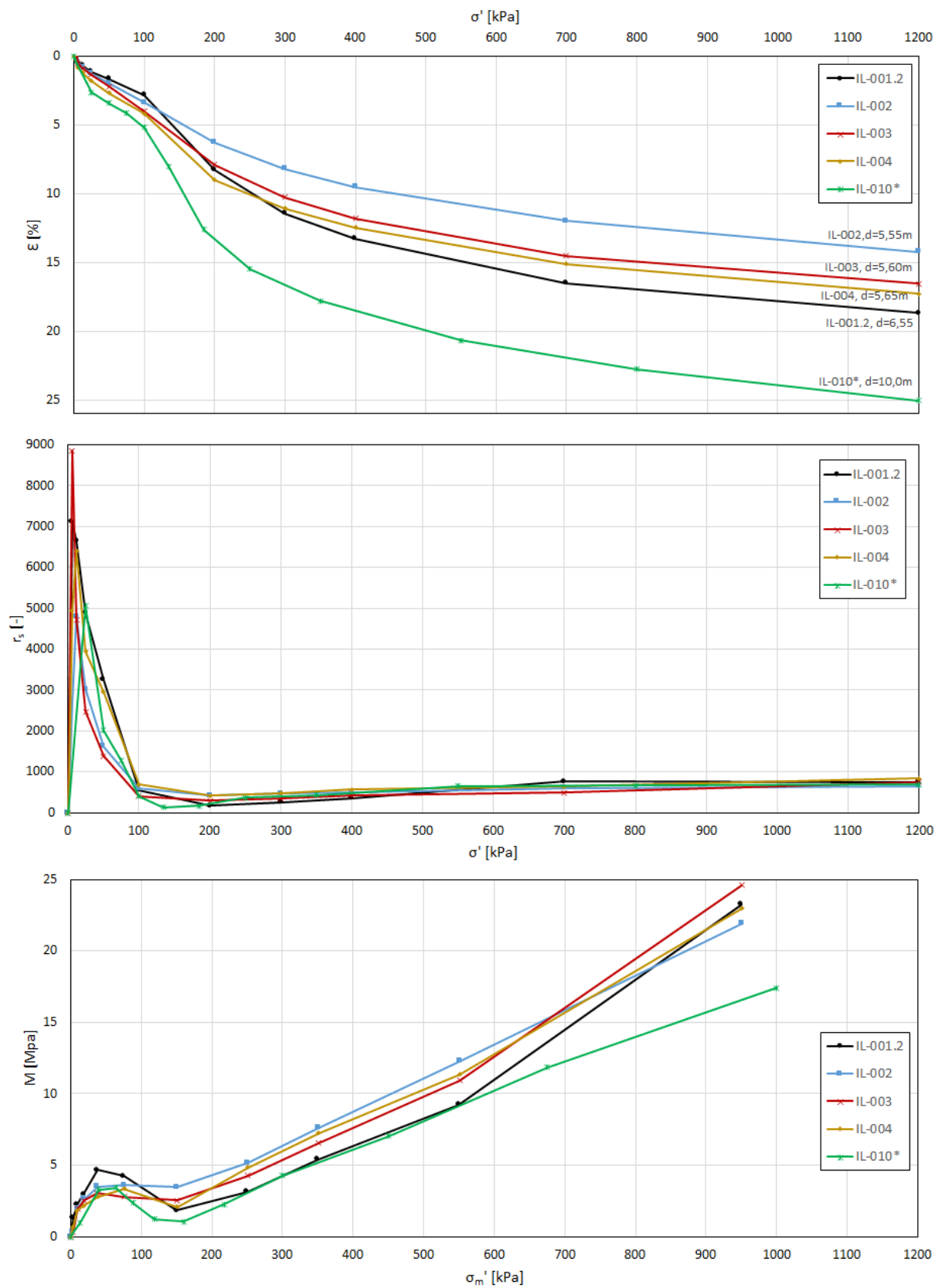
For å kunne studere oppførselen til materialet nærmere ble det lagt inn flere lasttrinn i området mellom 400 og 1200 kPa i de etterfølgende testene på blokk 3. Man kan se at tøyningene ved disse spenningene ikke ble like store i testene IL-006 og -007, men det samme fenomenet som i IL-005 kan obser-

veres.

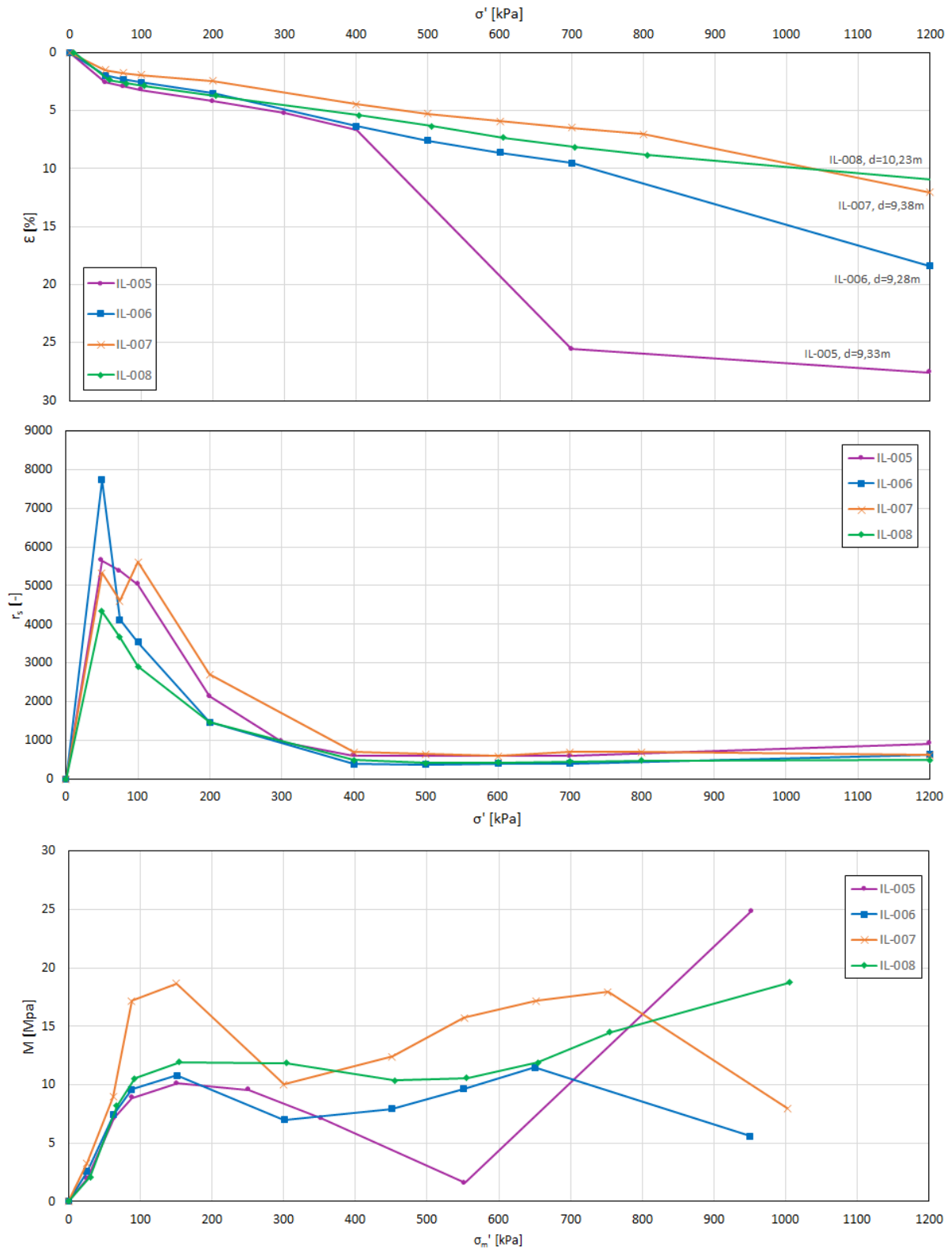
Resultater fra kornfordelingsanalyse på materialet fra blokk 3 viser at leirinnholdet var omtrent 42 %. Ellers var leira karakterisert ved at den var kvikk og hadde tynne lag av silt.



# KAPITTEL 4. RESULTATER



Figur 4.1: Resultat fra IL-forsøk på Tillerleire



Figur 4.2: Resultat fra IL-forsøk på Grongleire

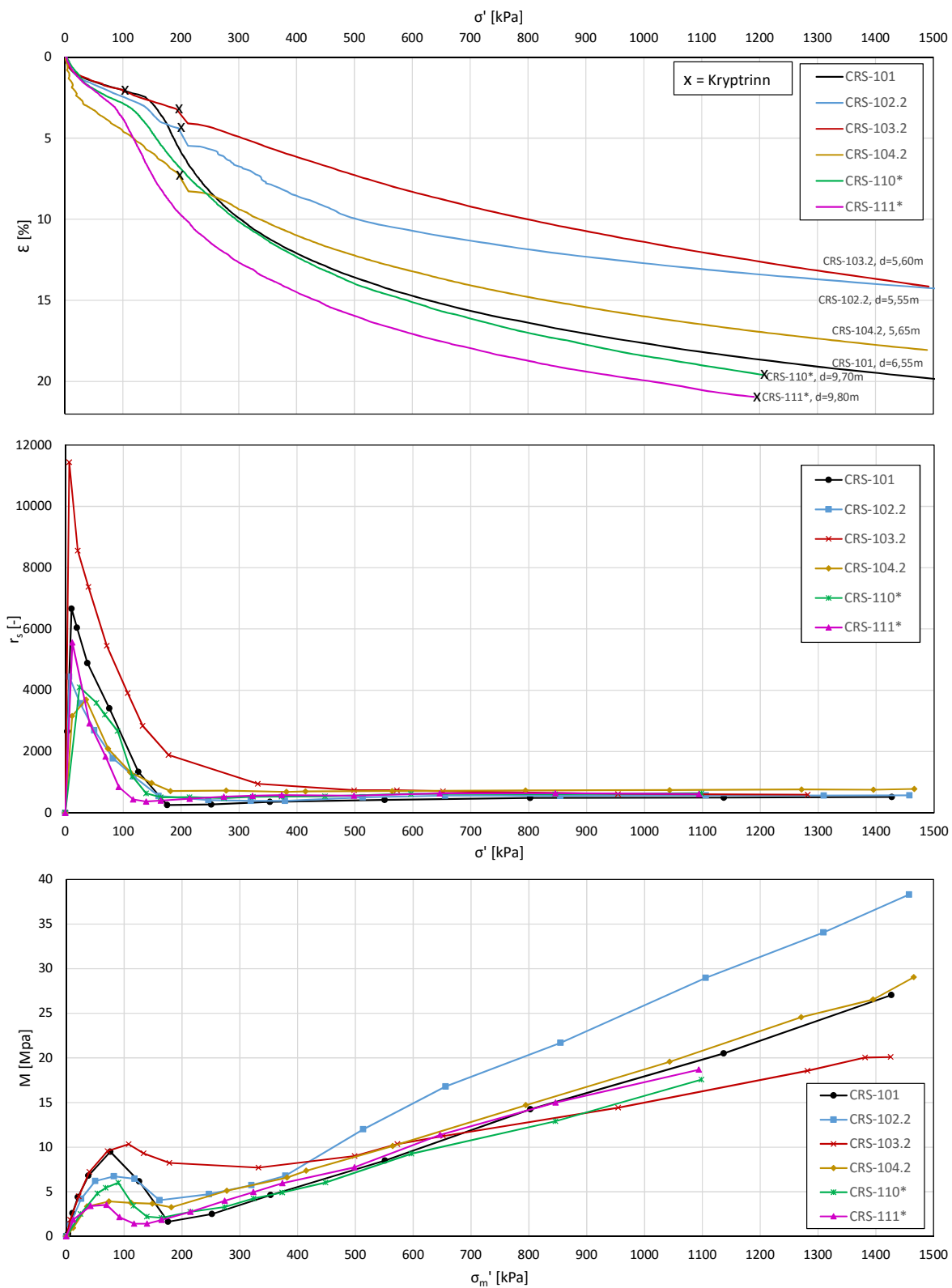
### 4.1.2 Krypforsøk

Figur 4.3 og 4.4 viser en sammenstilling av resultatene fra de gjennomførte kryptestene på henholdsvis Tillerleire og Grongleire. I disse resultatene kan man i likhet med IL-testene se relativt parallelle kurver, noe som kan tyde på at testene er av god kvalitet. Som man kan se i tabell B.1 er alle testene vurdert som brukbar til veldig god ut fra de oppgitte kriterier.

Blant testene på Tiller-materialet er det bare CRS-103.2 som skiller seg bemerket ut. Denne testen har et modultall på 11,9, mens for de andre testene varierer modultallet fra 17 til 25. Det kan tyde på at testmaterialet til CRS-103.2 er blitt utsatt for prøveforstyrrelser.

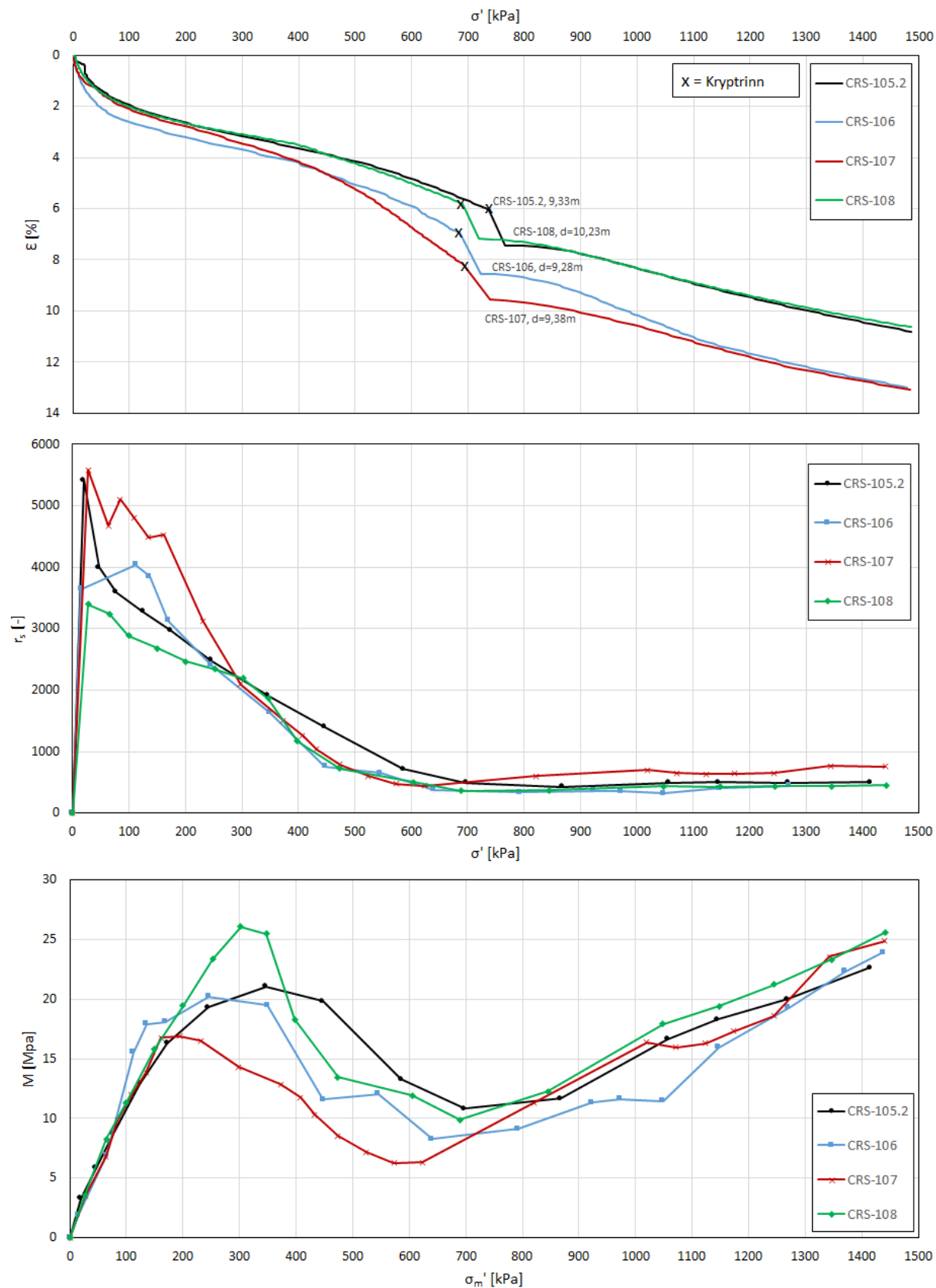
De ulike testene på Grongleire er relativt like, men man kan se at modulkurvene avviker noe fra hverandre. De virker likevel å være av bedre kvalitet enn IL-testene på samme materiale.

Modulkurvene til krypforsøkene er delt opp i stykker for å kunne få informasjon om sekanten til modultallet,  $m_{sec}$ , fra hele testen, for beregning av  $r_s$ .  $\sigma' - r_s$ -kurvene som er vist er beregnet ut fra forholdet mellom  $r_s$  fra det innlagte kryptrinnet, og den korresponderende  $m_{sec}$  fra modulkurven. Man kan tydelig se hvordan modulkurven påvirker formen til disse kurvene. I det overkonsoliderte området har man ganske stor spredning i  $r_s$ , mens etter  $p'_c$  kan man se at det stabiliserer seg. Forskjellene i prøve kvalitet og materialegenskaper viser seg tydeligst i OC-området, og fører derfor til større spredning i resultatene enn i NC-området. I OC-området vil man ikke observere like mye kryp som i normalkonsolidert område, og man er derfor mest interessert i å studere det som skjer etter  $p'_c$ . Ved sammenligning av  $\sigma' - r_s$ -kurvene fra IL- og krypforsøk vil det derfor bli fokusert mest på resultater etter  $p'_c$ .



Figur 4.3: Resultat fra krepforsøk på Tillerleire

# KAPITTEL 4. RESULTATER



Figur 4.4: Resultat fra krepforsøk på Grongleire

## 4.2 Sammenligning av resultat fra IL-forsøk og krypforsøk

Resultatene fra IL- og krypforsøkene innenfor hver testseie er i sammenlignet i detalj. Formålet er å studere forholdet mellom  $\sigma' - r_s$ -kurvene fra de to ulike forsøkene. Disse kurvene er plottet i samme diagram, som vist i figur 4.5 til 4.18. Aksene i disse diagrammene er tilpasset for å nærmere kunne studere utviklingen av  $r_s$  etter  $p'_c$ . I vedlegg A.6 er disse kurvene vist i full skala.

Det som legger grunnlag for den beregnede  $\sigma' - r_s$ -kurven til krypforsøket er som sagt informasjonen om tidsmotstand fra kryptrinnet og modulkurven til CRS-delen av forsøket. Det er derfor interessant å sammenligne  $\sigma' - \epsilon$ -kurven og modulkurven fra IL- og krypforsøkene, for å studere oppførselen til prøvene og vurdere kvaliteten til de korresponderende forsøkene. På denne måten kan man enklere forklare eventuelle avvik mellom  $\sigma' - r_s$ -kurvene. Disse kurvene er vist for alle testserier i vedlegg A.1. Tøyning- og tidsmotstandsutviklingen i kryptrinnet fra kryptesten og tilsvarende trinn fra IL-testen er også vist i detalj i  $Tid - \epsilon$ - og  $Tid - R$ -plott for alle testserier i vedlegg A.1.

Ved evaluering av resultatene er det tatt utgangspunkt i at kryppparameterne man får ut fra IL-testene representerer materialet på beste måte, og at den resulterende  $\sigma' - r_s$ -kurven fra et slikt forsøk er den «sanne» kurven til materialet. Dette er tenkt fordi man i IL-forsøk får informasjon om kryp ved mange ulike spenningnivå gjennom hele testen, og resultatene bør derfor være pålitelige. Når IL- og krypforsøkene sammenlignes, vil den beregnede tidsmotstandskurven fra krypforsøkene derfor vurderes opp mot den «korrekte» kurven fra IL-forsøket. Avvik mellom disse kurvene vil da bli vurdert som negativt for kryptestene.

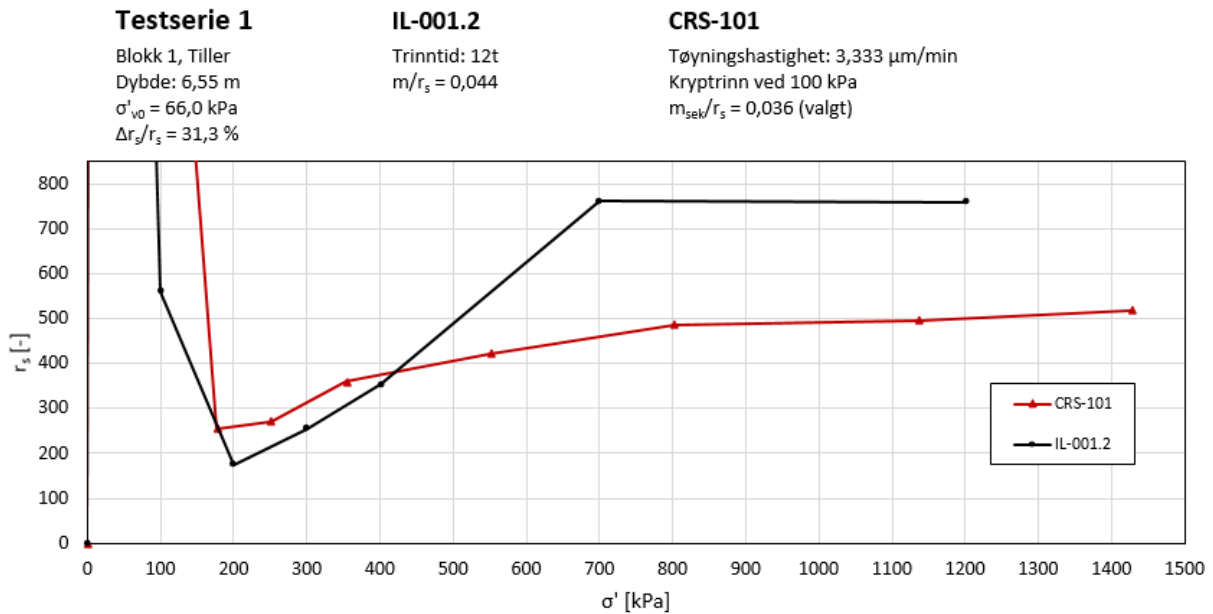
For å vurdere størrelsen på avviket i  $r_s$  fra forsøkene er følgende parameter innført:

$$\Delta r_s / r_s \quad [\%] \quad (4.1)$$

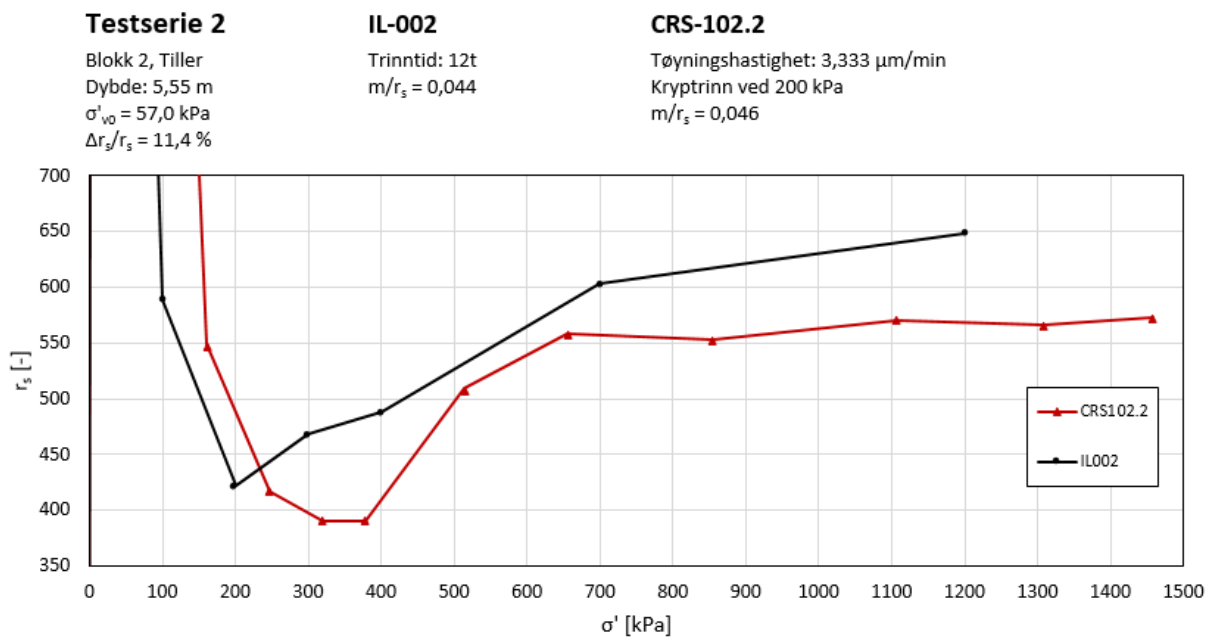
der  $\Delta r_s = r_{s,IL} - r_{s,krypforsøk}$  og  $r_s$  er  $r_{s,IL}$ .

Denne parameteren er oppgitt for hver testserie som et gjennomsnitt av absoluttverdien for dette ved utvalgte effektivspenninger etter  $p'_c$ . Den viser med andre ord hvor stor gjennomsnittlig prosentvis endring det er mellom  $r_s$ -verdiene fra krypforsøkene og IL-forsøkene i forhold til IL-forsøkene. En lav verdi tilsier at  $\sigma' - r_s$ -kurven fra krypforsøket samsvarer godt med kurven fra IL-forsøket, mens en høy verdi uttrykker store avvik.

Forholdet mellom  $m$  og  $r_s$  er også oppgitt for hver test.



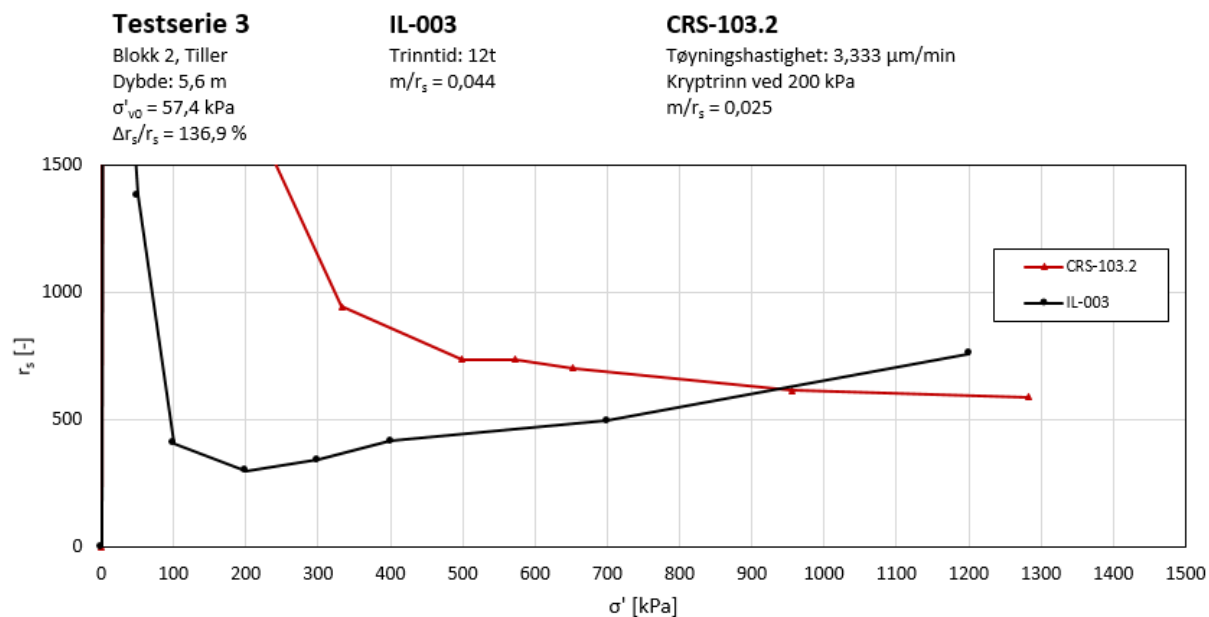
Figur 4.5: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 1



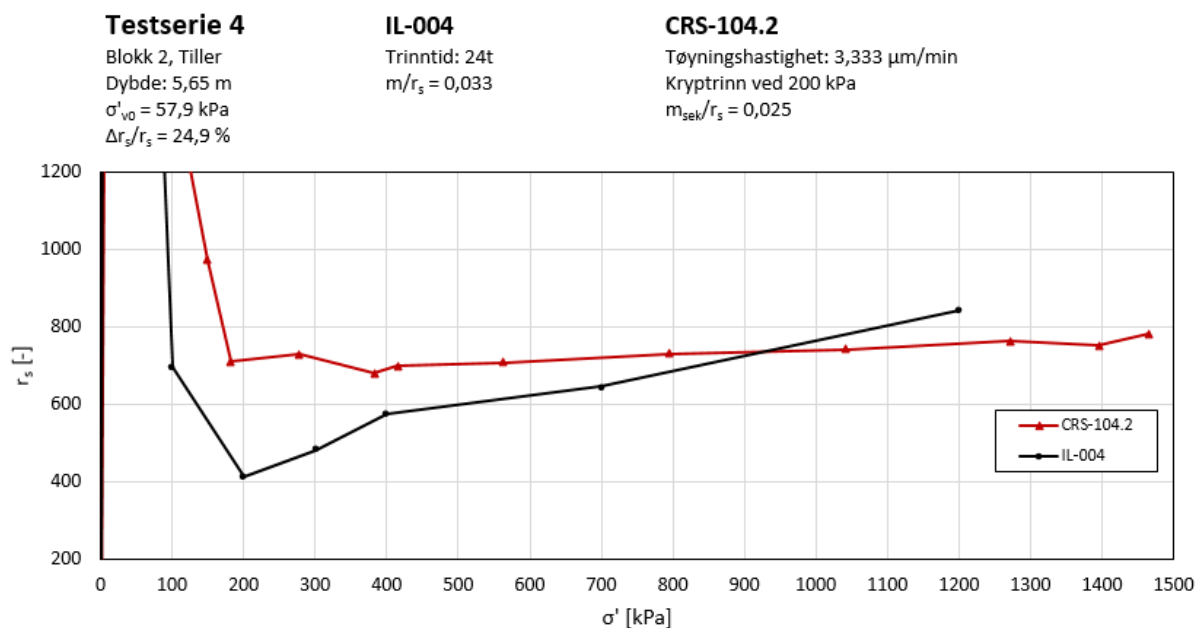
Figur 4.6: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 2



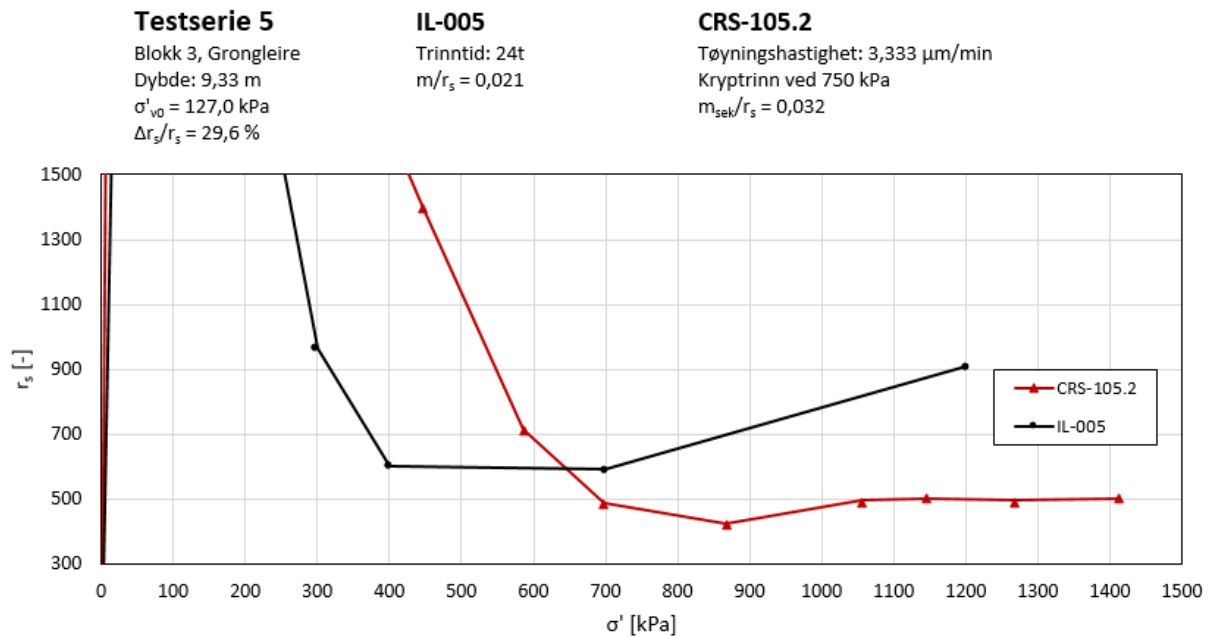
## KAPITTEL 4. RESULTATER



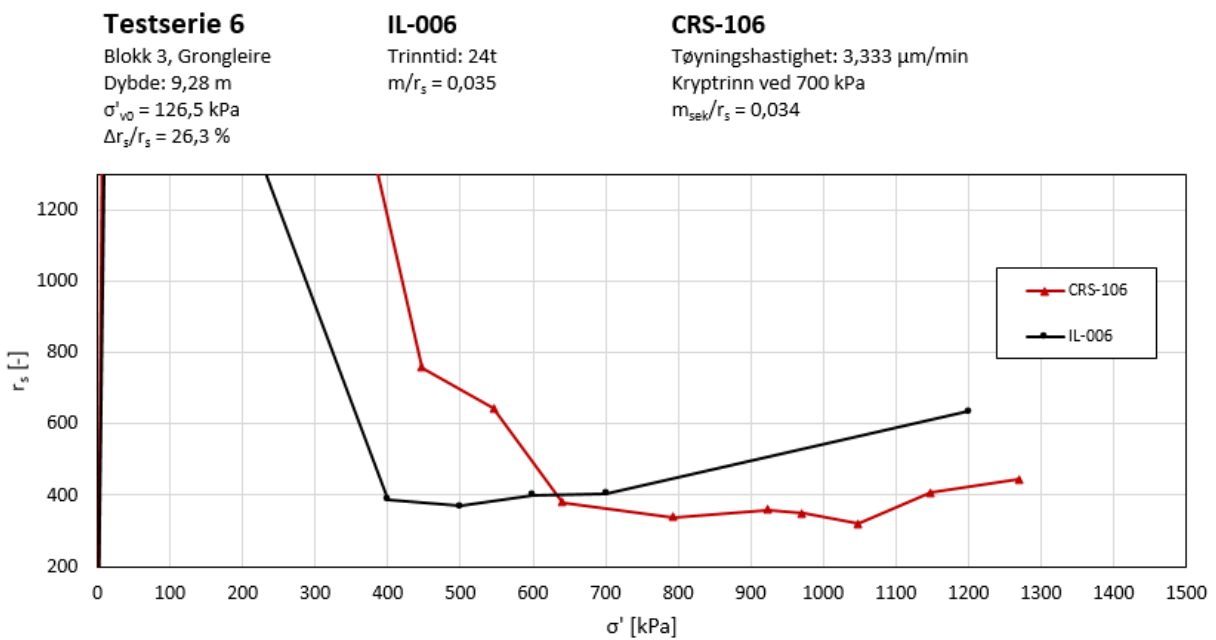
Figur 4.7: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 3



Figur 4.8: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 4

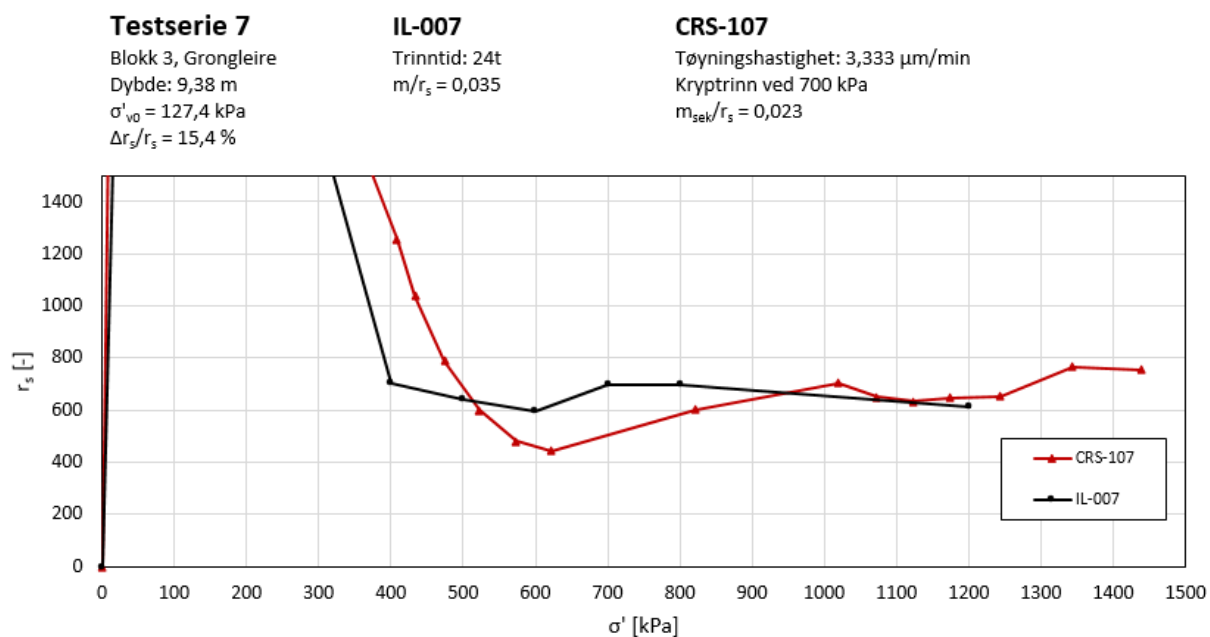


Figur 4.9: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 5

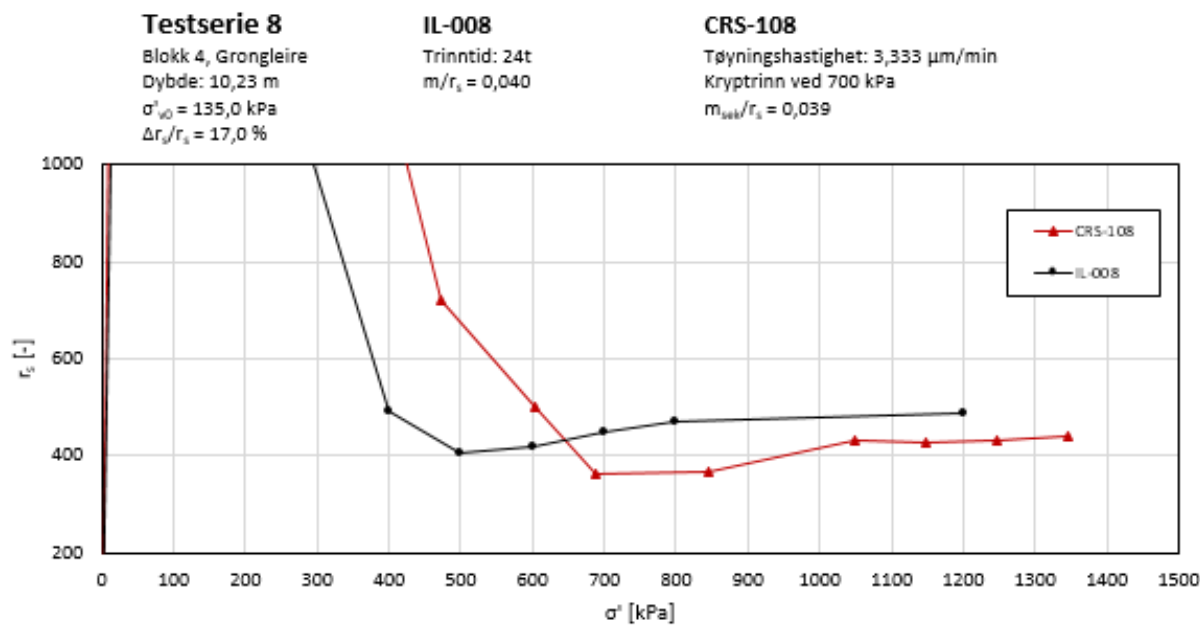


Figur 4.10: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 6

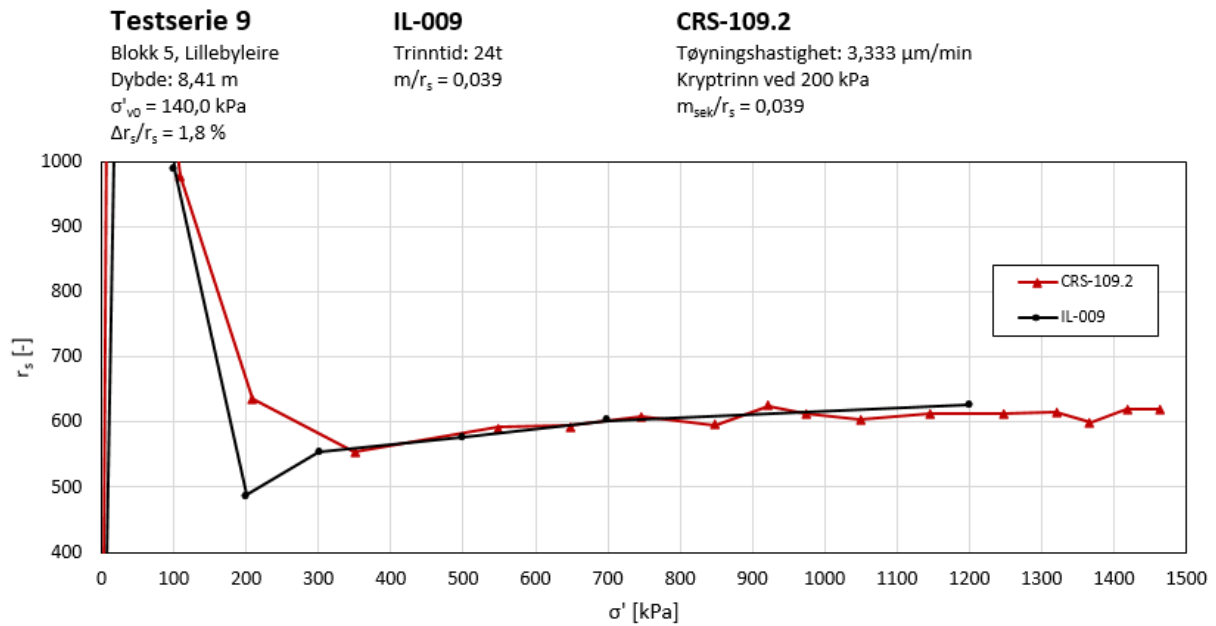
## KAPITTEL 4. RESULTATER



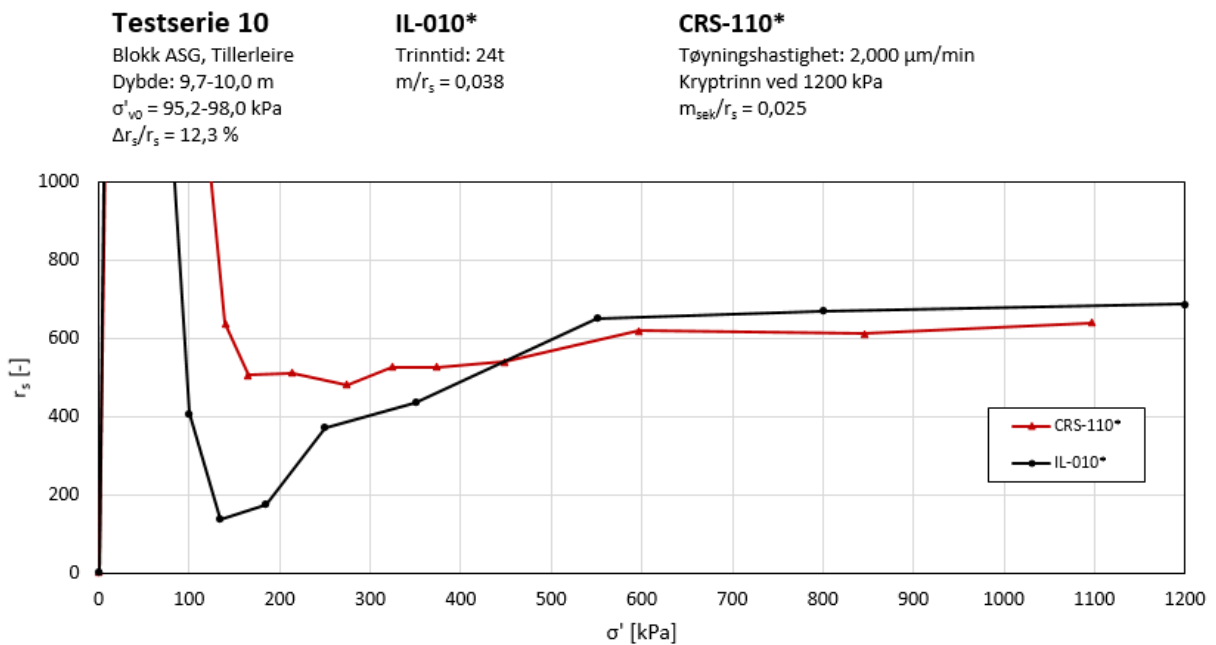
Figur 4.11: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 7



Figur 4.12: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 8

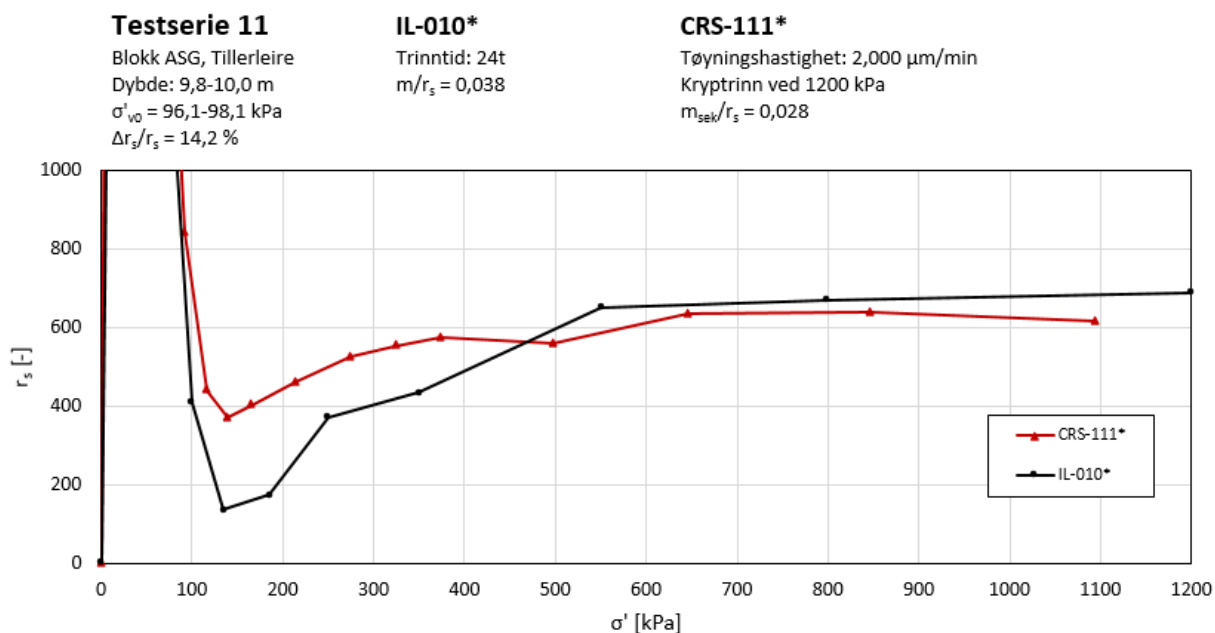


Figur 4.13: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 9

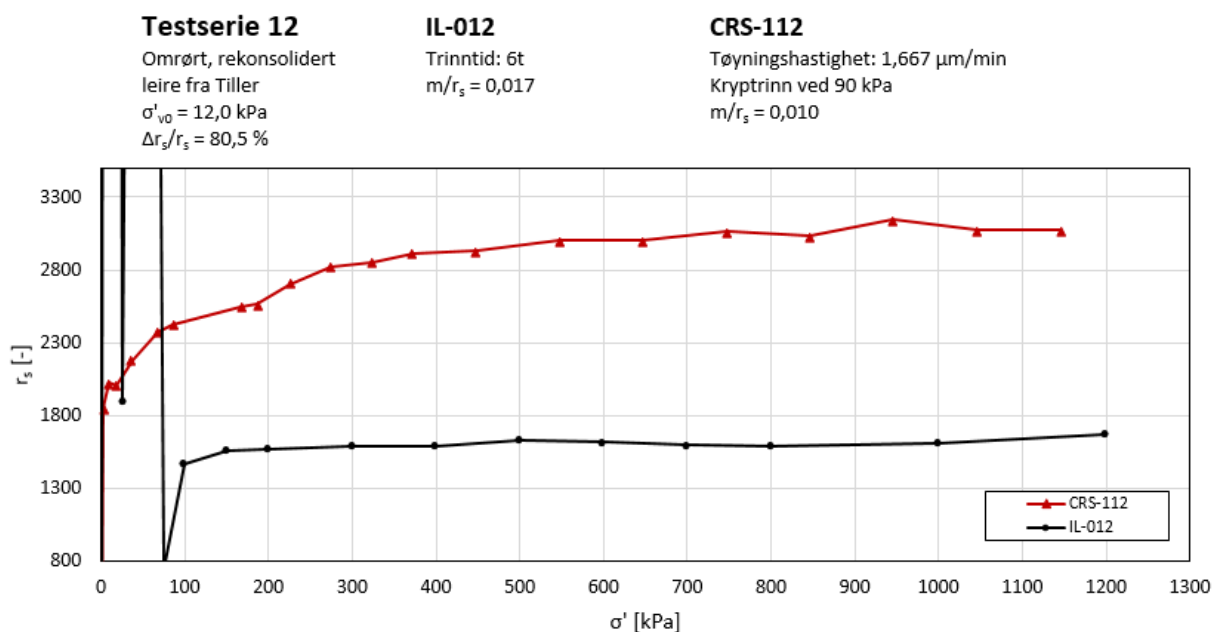


Figur 4.14: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 10. Kryptringen i krepforsøket er her lagt ved slutten av testen.

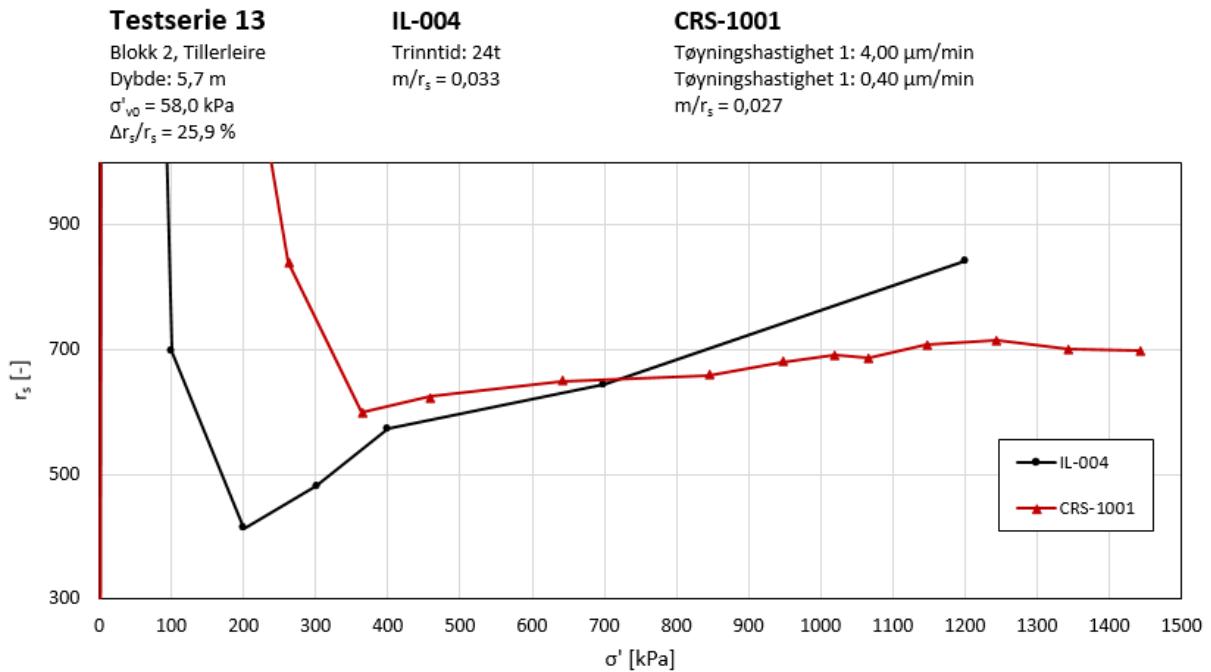
## KAPITTEL 4. RESULTATER



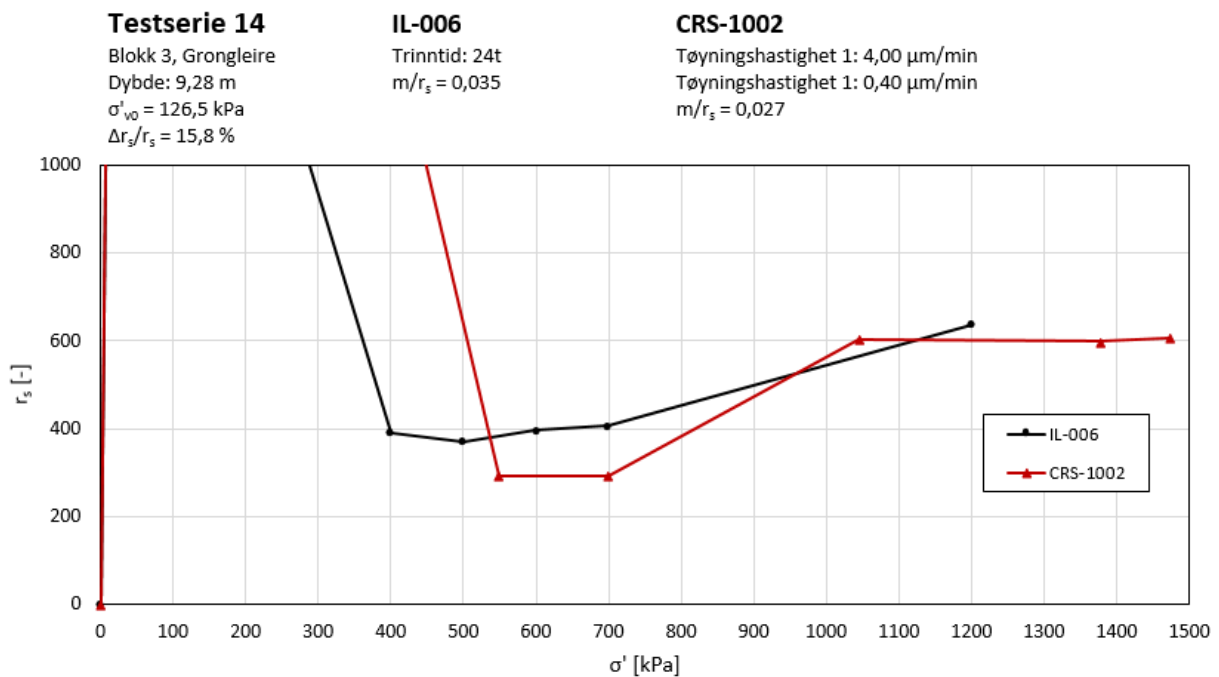
Figur 4.15: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krypforsøk i testserie 11. Kryprrinnet i krypforsøket er her lagt ved slutten av testen.



Figur 4.16: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krypforsøk i testserie 12 på omrørt, rekonsolidert leire



Figur 4.17: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 13, hvor  $r_s$  til CRS-testen er funnet ved å variere tøyningshastigheten under forsøket



Figur 4.18: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og krepforsøk i testserie 14, hvor  $r_s$  til CRS-testen er funnet ved å variere tøyningshastigheten under forsøket

Figur 4.5 viser  $\sigma' - r_s$ -kurven til IL-001 og den beregnede kurven fra kryptforsøket CRS-101. Kryptrinnet ble her lagt ved 100 kPa, noe som er før materialets  $p'_c$ . Som man kan se i figur A.1 i vedlegg A.1 avviker den faktiske  $r_s$  ved krypttrinnet mye fra IL-forsøkets  $r_s$  ved dette spenningsnivået, og det ble derfor valgt å bruke et forhold mellom  $m$  og  $r_s$  ut fra erfaringsverdier. På grunn av stor variasjon mellom tøyningutviklingen i lasttrinnet fra kryptforsøket og IL-forsøket er disse kurvene i figur A.1 vist med logaritmisk skala.

Testserie 2, som vist i figur 4.6, viser et godt samsvar mellom kryptparameterne fra de to parallellforsøkene. Disse testene er av generelt god kvalitet, og som man kan se i figur A.2 samsvarer ødometerkurven, modulkurven og  $r_s$  til forsøkene godt.

I figur 4.7 er testserie 3 vist, og man kan observere store avvik i  $r_s$  fra de to tilhørende testene. Testene viser svært ulik oppførsel, og som man kan se i figur A.3 er modultallet til krypttesten så lavt som 11,9. Ved testing ble det observert noen urenheter i leira som kan minne om organisk innhold.

Forsøkene i testserie 4 viser kurver med relativt godt samsvar, spesielt ved store spenninger, som man kan se i figur 4.8.

Resultatene fra forsøkene i testserie 5, som vist i figur 4.9, samsvarer dårlig, spesielt mot slutten av testene. Som man kan se fra figur A.5 har prøven i IL-forsøket blitt utsatt for en total tøyning på 28 % ved 1200 kPa, mens prøven i krypttesten har kun opplevd 9 % tøyning. Dette tyder på at det har vært prøveforstyrrelser til stede. På tross av det store avviket mellom testenes oppførsel er ikke forskjellen i  $r_s$  fra de to forsøkene mer enn 29,6 %.

Testserie 6 er på samme materiale som serie 5. I IL-forsøket i denne testserien er det lagt inn flere lasttrinn rundt  $p'_c$  enn i IL-forsøket i testserie 5, og man

kan i figur 4.10 se at  $\sigma' - r_s$ -kurvene samsvarer noe bedre. Det er likevel et avvik i  $r_s$  på 26,3 %, noe som tyder på prøveforstyrrelser.

Testserie 7 er også på samme materiale som de to foregående, og her er det lagt inn ytterligere et lasttrinn i IL-forsøket. Som man ser i figur 4.11 er det bedre samsvar mellom testene, noe som kan tyde på at leira hadde behov for skånsom påføring av laster for å oppnå et godt resultat.

Figur 4.12 viser resultat fra testserie 8. Testene er gjort på Grongleire fra en annen blokkprøve enn testserie 5-7, og man kan her se et noe bedre samsvar mellom de parallelle testene.

Testserie 9, som vist i figur 4.13, er på medium plastisk Lilleby-leire. Som man kan se i figur A.9 er ødometer- og modulkurvene fra IL- og krypforsøkene meget like og av god kvalitet, noe som resulterer i  $\sigma' - r_s$ -kurver med tilnærmet perfekt samsvar. Dette er det beste resultatet som er oppnådd i de gjennomførte laboratorieundersøkelsene.

Testserie 10 og 11 er utført av Multiconsult på leire fra Tiller. Kryptestene CRS-110\* og -111\* er begge sammenlignet opp mot samme IL-test, IL-010\*, og i begge testene er kryptrinnet lagt ved slutten av CRS-testen. Prøvene er ikke fra eksakt samme dybde, men de resulterende kurvene vist i figur A.10 og A.11 samsvarer likevel godt. Forholdet mellom krypparameterne stemmer også godt overens, som vist i figur 4.14 og 4.15.

Testserie 12 er på omrørt, rekonsolidert leire. Det ble utført én IL-test og to kryptester på dette materialet, hvor kryptestene hadde kryptrinn ved henholdsvis 50 og 90 kPa. Testen med kryptrinn ved 90 kPa (CRS-112) viste seg å gi best resultater av de to, og leirprøven hadde et vanninnhold som var mest likt det prøven i IL-forsøket hadde. I figur 4.16 og A.12, er resultatene fra IL-



012 og CRS-112 vist. Man kan se et stort sprik i  $r_s$  fra de to testen, men forholdet mellom kurvene er ganske konstant. Grunnen til det store spriket i  $r_s$  er diskutert nærmere i kapittel 5.

Figur 4.17 og 4.18 viser resultater fra de to testseriene hvor det ble kjørt CRS-forsøk med variert tøyningshastighet. CRS-testene er av relativt god kvalitet, og  $r_s$  fra disse testene og de korresponderende IL-forsøkene samsvarer nokså bra.

### 4.3 Sammenligning og evaluering av $\Delta r_s$

I tabell 4.1 er forholdet  $\Delta r_s/r_s$  vist for alle testseriene.

Tabell 4.1: Oversikt over gjennomsnittlig  $\Delta r_s/r_s$  for alle testserier

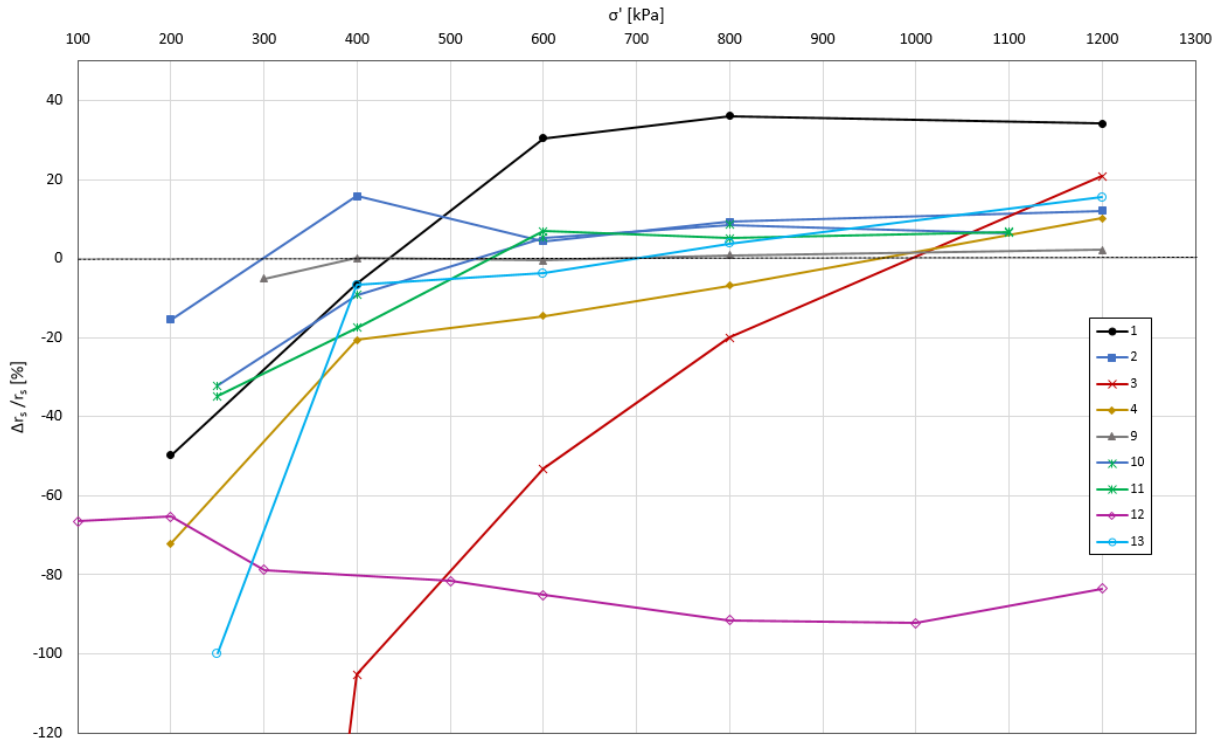
Testserie	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta r_s/r_s$ [%]	31,3	11,4	136,9	24,9	29,6	26,3	15,4
Testserie	8	9	10	11	12	1001	1002
$\Delta r_s/r_s$ [%]	17,0	1,8	12,3	14,2	80,5	25,9	15,8

Man kan se at testserie 3 skiller seg betydelig ut fra de andre testene, hvor  $r_s$  fra krypforsøket avviker med hele 136,9 % i forhold til  $r_s$  fra IL-forsøket. Testserie 9 gir klart best samsvar mellom forsøkene, med en forskjell i  $r_s$  på kun 1,8 %.

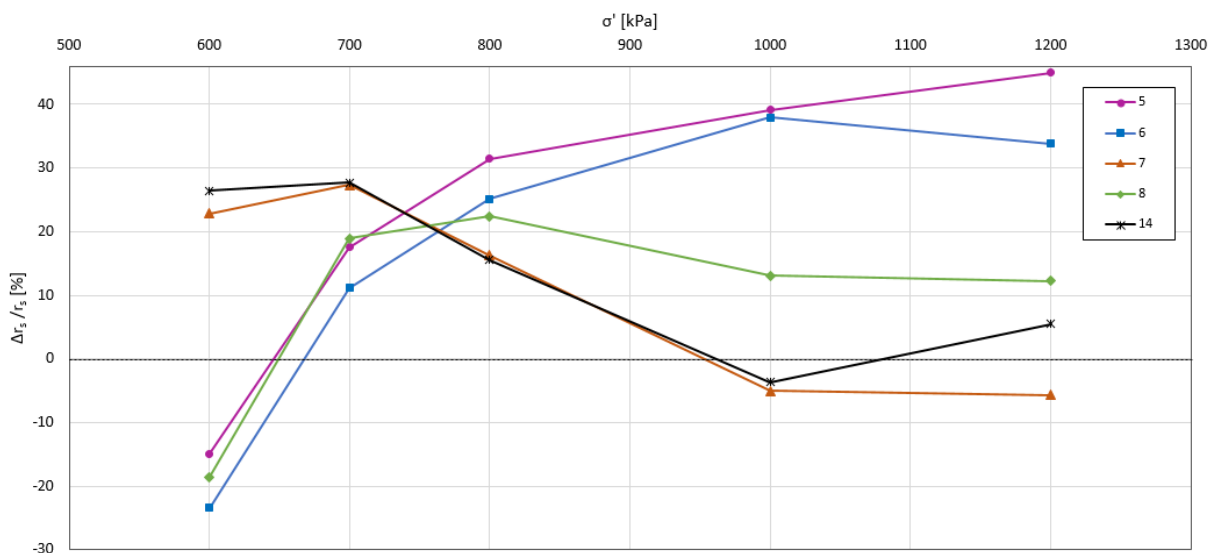
I figur 4.19 og 4.20 er  $\Delta r_s/r_s$  ved ulike effektivspenninger fra alle testseriene vist. Figur 4.19 viser kurvene fra forsøk hvor  $p'_c$  er 150 kPa og lavere, mens figur 4.20 tar for seg alle forsøkene på Grong-leire, hvor  $p'_c$  er rundt 550 kPa. I disse plottene er verdien for  $\Delta r_s/r_s$  oppgitt som den reelle verdi, ikke som en absoluttverdi slik det er gjort i de andre tilfellene.

Man kan fra disse plottene se at de fleste kurvene har en viss krumning, spe-

sielt ved spenninger i nærheten av  $p'_c$ . Kurvene har en tendens til å rette seg ut ved høye spenninger, noe som stemmer bedre overens med forventet resultat.



Figur 4.19:  $\Delta r_s/r_s$  ved ulike effektivspenninger fra testserier på omrørt leire og leire fra Tiller og Lilleby



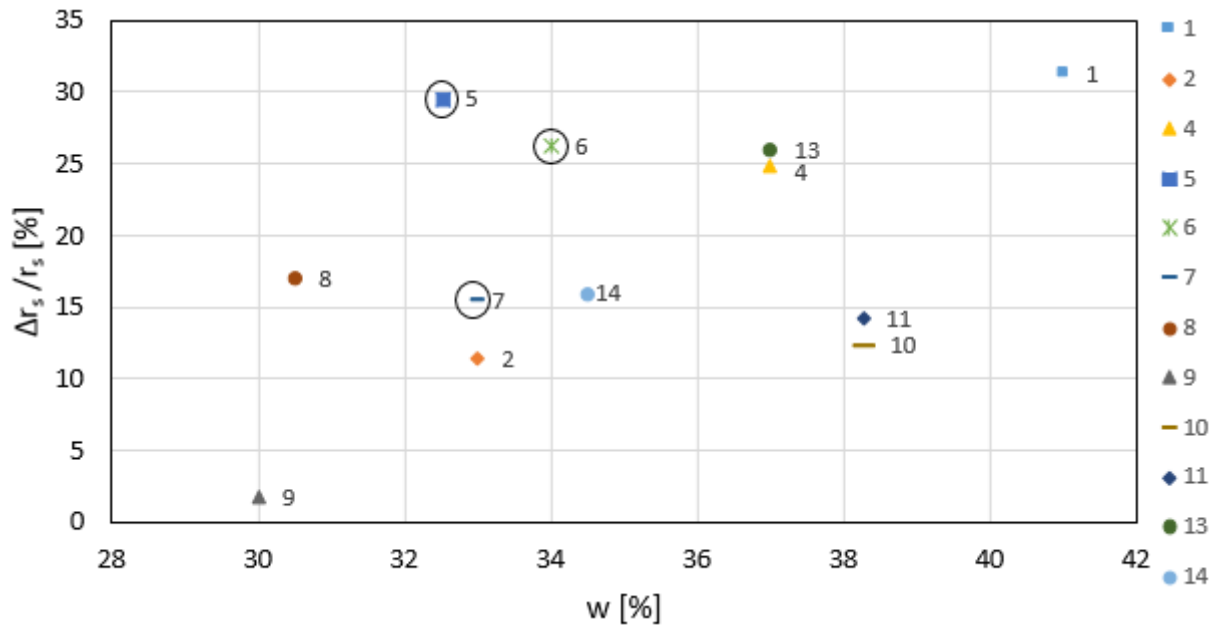
Figur 4.20:  $\Delta r_s/r_s$  ved ulike effektivspenninger fra testseriene på Grong-leire

Det er mye som kan ha innflytelse på resultatene fra de gjennomførte forsøkene. Det er blitt undersøkt hvilken betydning testmaterialets naturlige vanninnhold  $w$ , sensitivitet  $S_t$ , flyteindeks  $I_L$ , plastisitetsindeks  $I_P$  og lagringstid har på resultatene. Alle disse parameterne er plottet mot gjennomsnittlig  $\Delta r_s/r_s$ , og vist i figur 4.21 til 4.25.

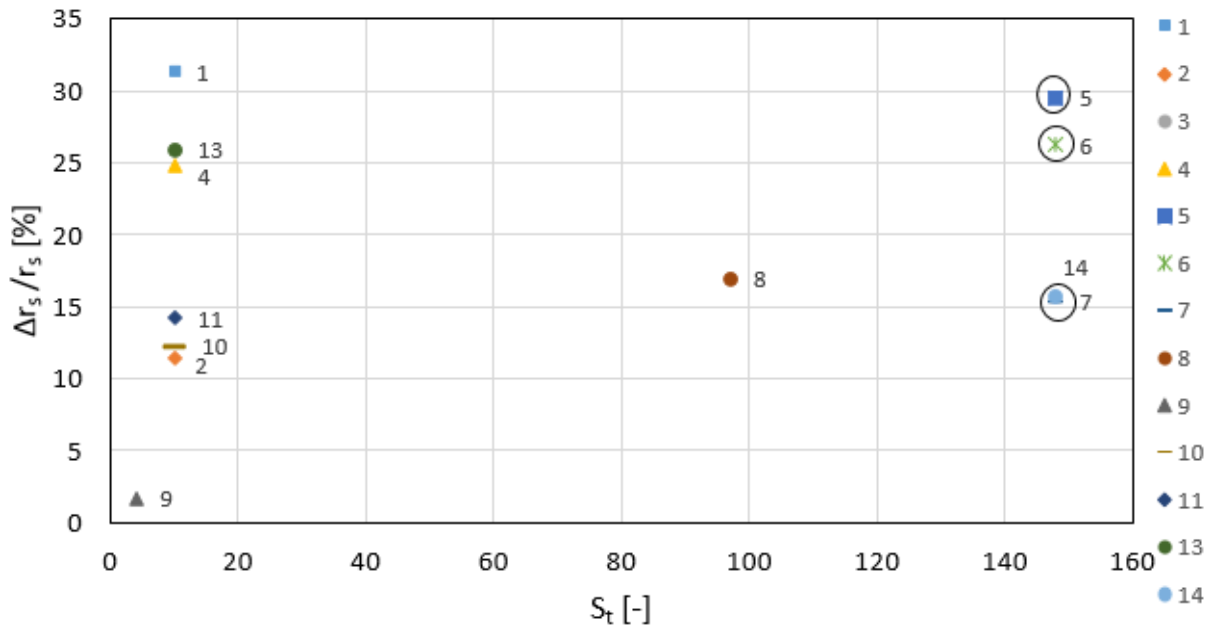
Det naturlige vanninnholdet,  $w$ , er i figur 4.21 oppgitt som gjennomsnittet av målt vanninnhold i ødometerprøvene fra IL- og krypforsøk i samme testserie. Som man kan se i oversikten over alle forsøk i tabell 3.2 og 3.3 varierer dette vanninnholdet noe, og det er undersøkt om denne forskjellen i vanninnhold påvirker resultatene. I figur 4.26 er prosentvis forskjell i vanninnhold mellom IL- og kryptesten i forhold til IL-testens vanninnhold ( $\Delta w/w$ ) plottet mot  $\Delta r_s/r_s$ .

På grunn av det store avviket i  $r_s$  som testserie 3 har i forhold til de andre seriene er ikke denne inkludert i disse undersøkelsene. Testserie 12 er heller ikke tatt med, da materialegenskapene til den omrørte leira i liten grad samsvarer med de naturlige leirene, og man her er ute etter å undersøke egenskapene til naturlige leirer.

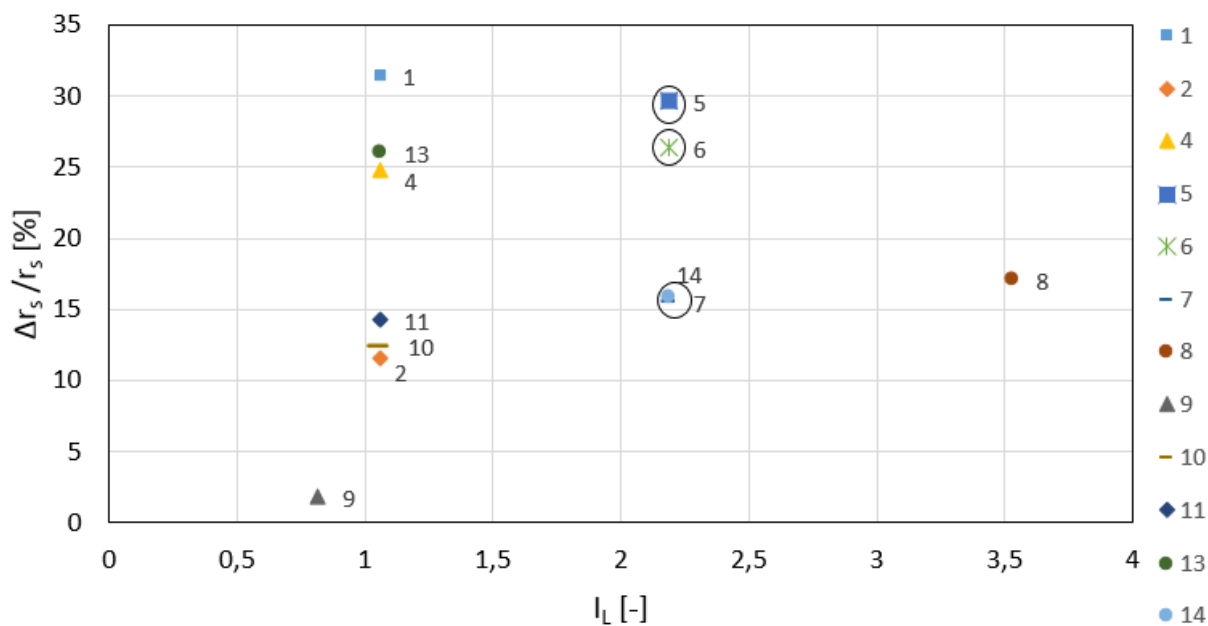
Testene gjort på leire fra blokk 3 fra Grong har vist en noe merkelig oppførsel, og det er usikkert om resultatene er sammenlignbare. Disse testene er i de påfølgende plottene merket med en ring, slik at man kan velge å fokusere mer på resultatene av bedre kvalitet ved evaluering av resultatene.



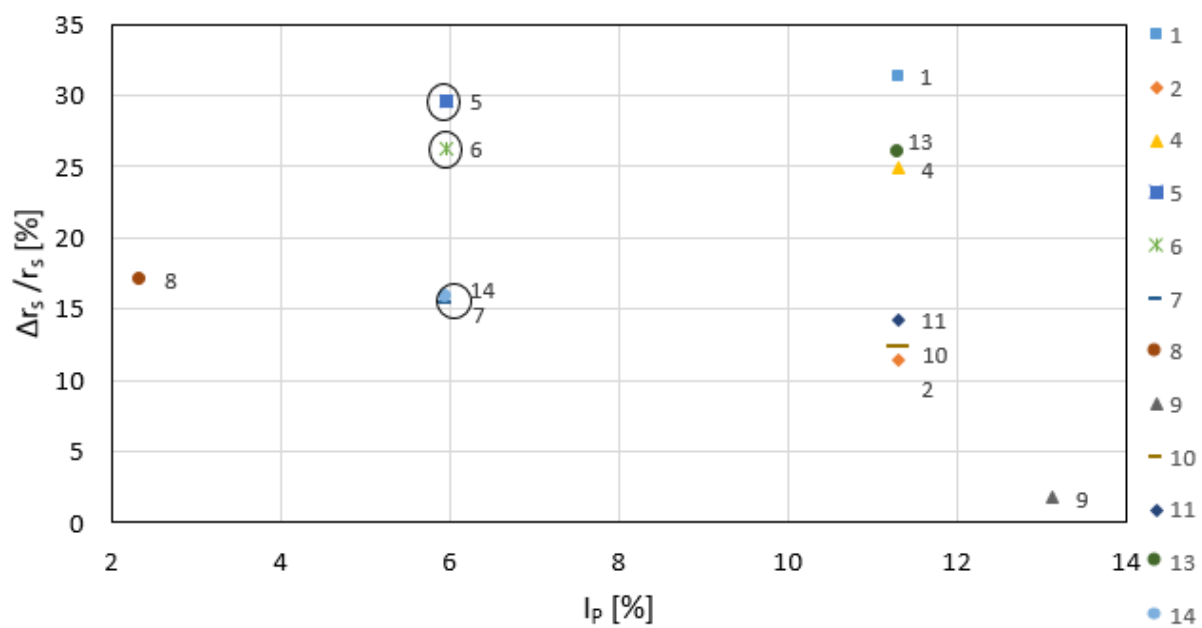
Figur 4.21: Sammenheng mellom  $\Delta r_s/r_s$  og naturlig vanninnhold



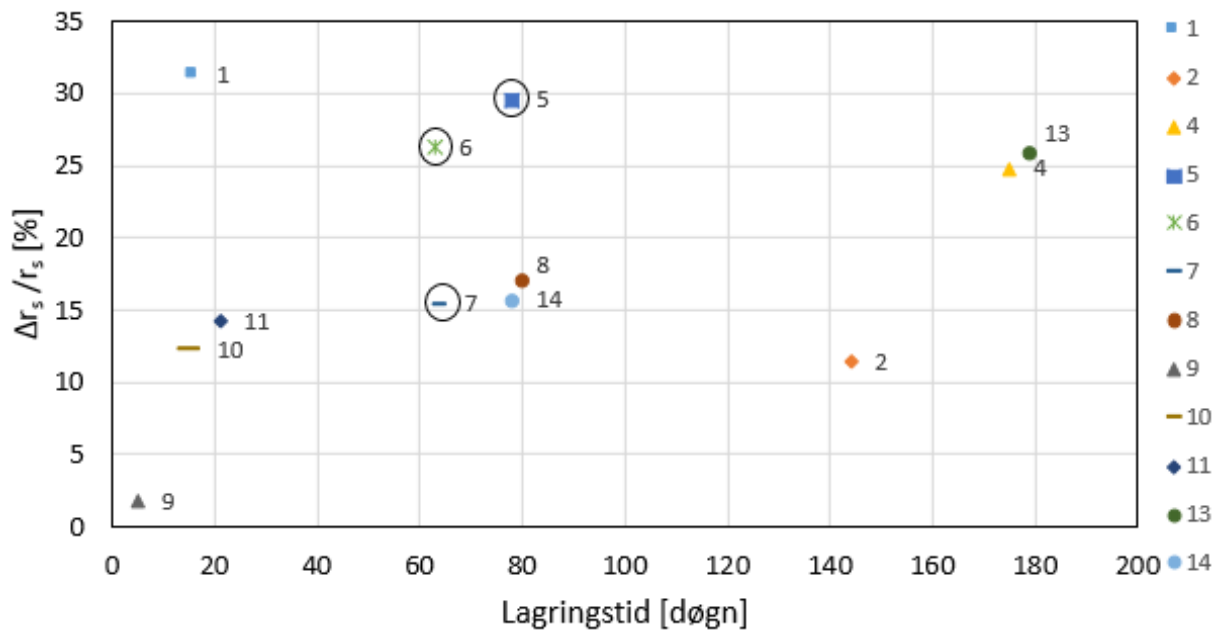
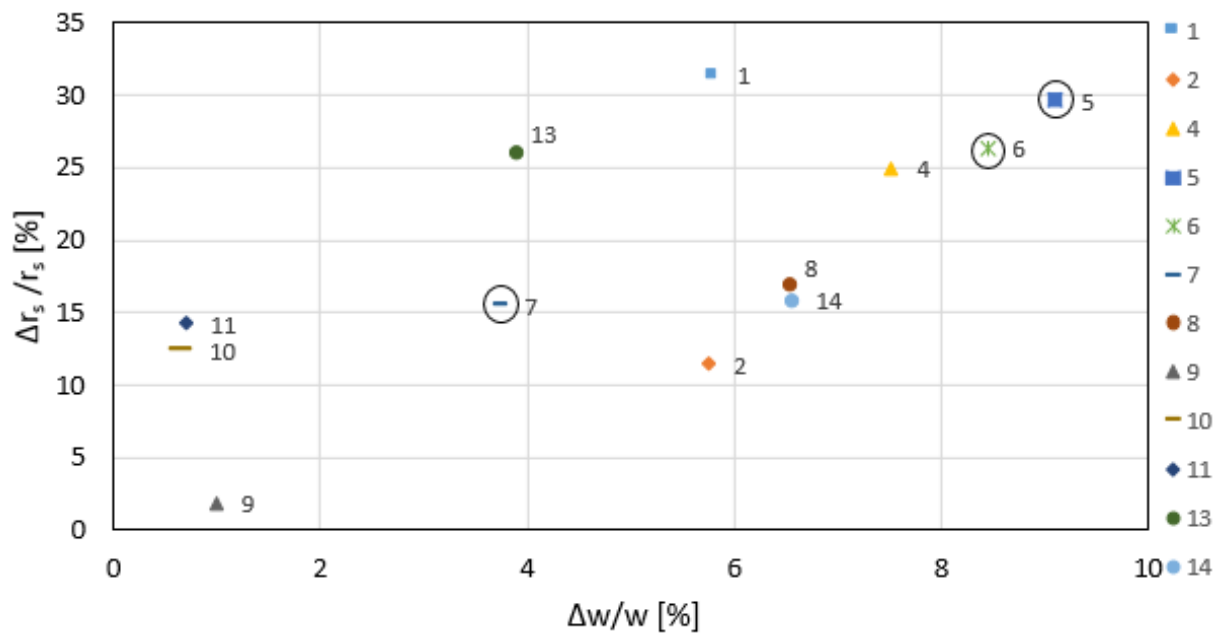
Figur 4.22: Sammenheng mellom  $\Delta r_s/r_s$  og sensitivitet



Figur 4.23: Sammenheng mellom  $\Delta r_s / r_s$  og flyteindeks



Figur 4.24: Sammenheng mellom  $\Delta r_s / r_s$  og plastisitetsindeks

Figur 4.25: Sammenheng mellom  $\Delta r_s/r_s$  og lagringstidFigur 4.26: Sammenheng mellom  $\Delta r_s/r_s$  og forskjellen mellom vanninnhold i IL- og krepforsøk fra samme testserie

# Kapittel 5

## Diskusjon

### 5.1 Evaluering av testserienes kvalitet og pålitelighet

Resultatene fra de gjennomførte laboratorieforsøkene viser stor spredning. Denne spredningen gir usikkerhet ved evaluering av resultatene, og gjør det utfordrende å svare entydig på problemstillingen. For å vurdere årsaken til den store spredningen er det lagt vekt på å undersøke hvordan kvaliteten til forsøkene har påvirket resultatene, og spesielt samsvaret mellom forsøkens kryppparametere.

Ved vurdering av prøve kvalitet er det blitt lagt størst vekt på sammenligning av de korresponderende testene innenfor hver testserie som vist i vedlegg [A.1](#), samt sammenligningen av like tester på tilsvarende prøvemateriale som vist i kapittel [4.1.1](#). Det er ikke lagt så stor vekt på kriteriene for prøve kvalitet ut fra  $\Delta e/e_0$ , da det er sett at disse verdiene ikke alltid er representative for testene. I ødometerforsøkene tar det ofte litt tid før man får utnyttet den sideveis støtten som ringen gir, og det oppstår derfor store tøyninger i starten av testen. Disse tøyningene fører til en høy verdi av  $\Delta e/e_0$ , og ut fra kriteriene blir da testen vurdert som dårlig. Denne måten å indikere prøve kvalitet på passer

bedre for laboratorietester som tillater påføring av både aksielle og radielle spenninger, slik som treaksialforsøk.

Det er forsøkt å finne en forklaring på hvorfor noen testserier viser bedre samsvar mellom testenes  $r_s$  enn andre serier. Om man studerer forsøkene innenfor hver testseriene kan man ofte se at det er de seriene som har tester med best samsvarende ødometer- og modulkurvene som viser best overensstemmelse mellom kryppparameterne. Et eksempel er testserie 9, der modulkurvene til de tilhørende testene stemmer omtrent perfekt overens og  $\Delta r_s / r_s$  er så lav som 1,8 %. Som man kan se fra de to testseriene med dårligst samsvar mellom kryppparameterne, serie 3 og 5, stemmer modulkurvene dårlig overens.

Testseriene som er gjort på leire fra Grong viser generelt svært dårlig samsvar mellom de korresponderende IL- og kryptestene, spesielt fra blokk 3. Det store avviket mellom testene gjør det vanskelig å sammenligne de på en god måte. Alle ødometerprøvene fra dette materialet ble behandlet med forsiktighet under innbygging, så selve innbyggingen kan ikke være årsak til oppførselen. Det kan heller ikke være ødometeret som førte til de merkelige resultatene, da flere ulike ødometere ble utprøvd. Det ble undersøkt om resultatene kunne skyldes at materialet hadde uvanlig lavt leirinnhold, men ut fra kornfordelingsanalysen på materialet var ikke dette tilfelle. Blokkprøvene hadde derimot blitt fraktet langt i forhold til de andre prøvene, og dette i kombinasjon den hyppige lagdelingen og noe lang lagringstid kan være med på å forklare det dårlige resultatet. Det kan se ut som det er IL-testene på dette materialet som har latt seg påvirke mest av forstyrrelsene, spesielt ved spenninger over  $p'_c$ .



I noen ødometerforsøk, både IL- og kryptester, har man i resultatene oppnådd materialparametere som ikke er forventet i forhold til erfaringsverdier fra tilsvarende materiale. I kryptesten i testserie 3 fikk man for eksempel et modultall på 11,9, noe som er mye lavere enn modultallet fra IL-testen og vanlige modultall til denne type materiale. Materialparameterne fra forsøket gir uttrykk for at materialet ikke er leire. Det ser altså ut som om testene i testserien er gjort på to ulike typer materiale, på tross av at de er tatt fra samme blokk ved eksakt samme dybde. I begge testene ble det observert noe organisk materiale, og dette sammen med den lange lagringstiden på 5 måneder, kan trolig forklare avviket.

Når resultatene avviker så mye som i de sistnevnte testseriene er det ikke testprosedyren som er grunnen til avviket, men prøveforstyrrelsene som er til stede. Den mest utpregede grunnen til store avvik mellom kryppparameterne fra korresponderende tester virker altså å være prøveforstyrrelser. Når effekten av prøveforstyrrelser gir tydelige utslag på tester fra samme materiale er ikke testene sammenlignbare. I videre diskusjon er det derfor valgt å ikke legge like stor vekt på testserie 3, 5, 6 og 7.

Som nevnt tidligere er kryptestene sammenlignet og vurdert opp mot IL-testene, da trinnvise forsøk i utgangspunktet anses som de mest pålitelige fordi man får direkte informasjon om  $r_s$  ved flere spenninger. Det er viktig å ha med i vurderingen at det ikke nødvendigvis er kryptestene som er grunnen til stort avvik, men at det også kan skyldes dårlig kvalitet på IL-testene. Som eksempel ga de fleste kryptestene på Grongleire bedre resultat enn IL-testene.

## 5.2 Utvikling av $\Delta r_s/r_s$ ved ulike effektivspenninger

Spredningen blant resultatene viser seg tydelig i  $\sigma' - \Delta r_s/r_s$ -plottene vist i figur 4.19 og 4.20. I disse plottene kan man se en tendens til at kurvene er krumme ved lave spenninger. Ut fra teorien om det konstante forholdet mellom  $m$  og  $r_s$  burde disse kurvene vært tilnærmet horisontale, og denne tendensen strider derfor imot teorien som kryptestenes  $\sigma' - r_s$ -kurve er basert på. Det er imidlertid verdt å merke seg at det er testseriene av dårligst kvalitet som gir kurver med størst krumning, så dette kan også knyttes opp mot dårlig prøve kvalitet.

Det er også en trend til at kurvene retter seg ut ved større spenninger, noe som kan tyde på at dårlig prøve kvalitet i størst grad lar seg gjenspeile i nærheten av  $p'_c$ . Det er derfor interessant å se på ødometer- og modulkurvene til de korresponderende testene vist i vedlegg A.1. Man kan i de fleste testserier se at IL- og krypforsøkene har ulik oppførsel i overkonsolidert område, men at de etter  $p'_c$  viser mer parallelle kurver. Dette kan rett og slett skyldes det at CRS-forsøkene går raskere enn IL-forsøkene. Tøyningshastigheten påvirker effektivspenningene som prøven opplever, som diskutert i kapittel 2.5. Dette fører til at man gjerne får høyere  $M_{OC}$  og  $p'_c$  i kryptesten enn i IL-testen, og dette fenomenet kan man her se i samtlige testserier.

Det kan se ut til at den ulike oppførselen i overkonsolidert område påvirker resultatene ved spenninger like etter  $p'_c$ , men at forholdet mellom  $r_s$  fra de to testene blir mer parallelt jo lengre man beveger seg ut i normalkonsolidert område. Det kan på grunn av dette tenkes at man får et bedre og entydig samsvar mellom  $r_s$  ved flere spenningsnivå om man utfører krypforsøkene med lavere tøyningshastighet.

### 5.3 Sammenheng mellom $\Delta r_s$ og materialegenskaper

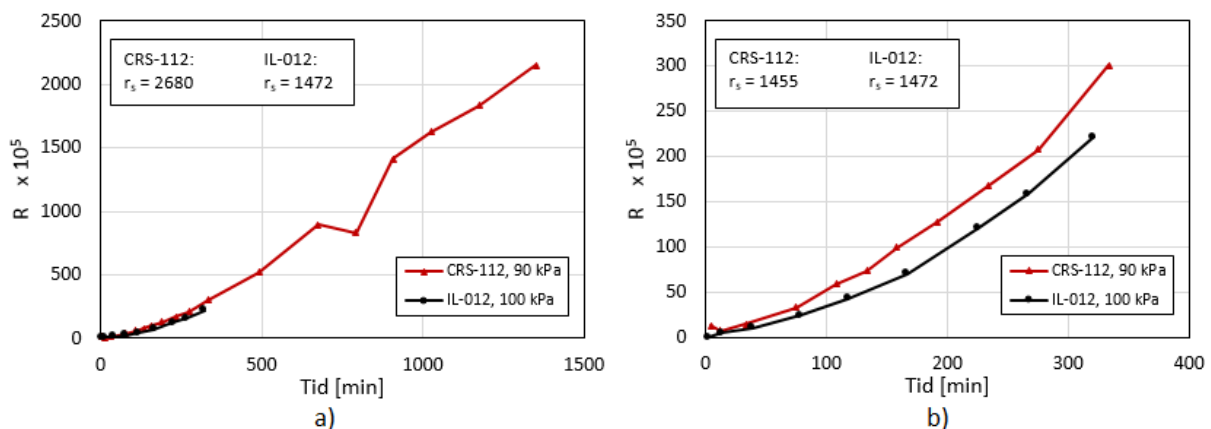
Ut fra resultatene som er samlet i figur 4.21 til 4.26 er det vanskelig å se en entydig sammenheng mellom de oppgitte materialegenskapene og avvik i  $r_s$  fra de korresponderende IL- og krypforsøkene. Vanninnholdet, som vist i figur 4.21 virker ikke å påvirke resultatene, og det gjør heller ikke flyteindeksen, som vist i figur 4.23. Hvis man imidlertid ser helt bort fra forsøkene som er merket som lite sammenlignbare, kan man med litt godvilje se en tendens til at leirene som er plastiske, lite sensitiv og utsatt for kort lagringstid gir de beste resultatene.

Dette trenger ikke direkte å bety at kryptester fungerer bedre for plastiske, ikke-sensitive leirer enn for sensitive leirer, men det gir en indikasjon på at sammenligning av parallelle forsøk, som gjort i denne oppgaven, er mer utfordrende for leirer som er sensitive for forstyrrelser. Kvikkleire lar seg forstyrre av ytre faktorer i mye større grad enn det plastiske leirer gjør. Et eksempel på dette er leira fra Grong, som sannsynligvis ble veldig forstyrret under transport. Hvis dette hadde vært plastisk leire hadde man kanskje sett bedre resultater.

### 5.4 Tester på omrørt materiale

Testserie 12, på omrørt og rekonsolidert materiale, ble utført med forventning om perfekt samsvar mellom resultatene fra IL- og krypforsøk. Som man kan se i figur 4.16 er avviket mellom testenes  $r_s$  mye større enn forventet. Det ble først tenkt at dette kunne forklares ut fra forskjellen i vanninnhold på 3 % i de to prøvene, i kombinasjon med at prøvene ikke var tatt fra helt sam-

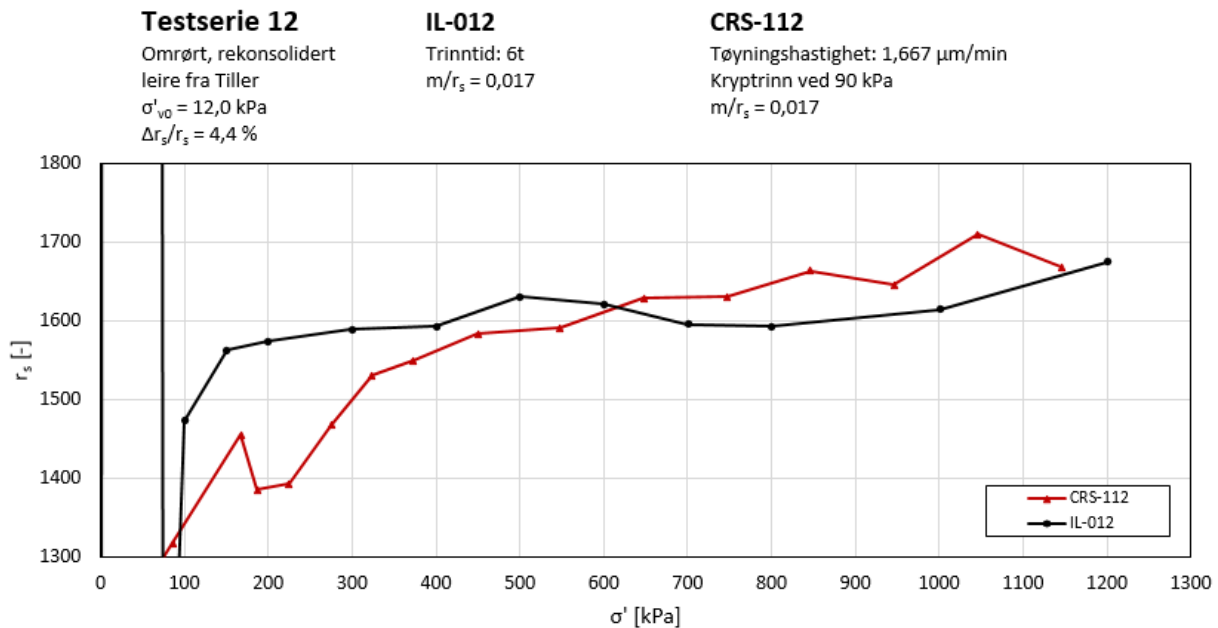
me nivå i sylindren og derfor hadde noe ulik spenningstilstand. Den største grunnen til avviket er derimot knyttet opp mot varigheten av lasttrinnene i IL-testen. På grunn av tidsbegrensninger ble trinntiden satt til 6 timer, mens kryptrinnet i kryptesten varte i 24 timer. Som man kan se i figur 5.1 a) er det stor forskjell mellom utviklingen av tidsmotstand etter henholdsvis 6 og 24 timer, men om man kun ser på utviklingen etter 6 timer er stigningen fra de to forsøkene meget lik, noe som man kan se i figur 5.1 b) gir omtrent lik  $r_s$ . Man kan derfor anta at man hadde fått like stor tidsmotstand i IL-forsøket som i kryptforsøket om trinntiden hadde vært like lang.



Figur 5.1: Utvikling av tidsmotstand fra korresponderende lasttrinn i testene IL-012 og CRS-112. a)  $r_s$  fra CRS-112 funnet etter 24 timer, og  $r_s$  fra IL-012 funnet etter 6 timer. b)  $r_s$  bestemt etter 6 timer i begge forsøkene.

Ved bruk av tidsmotstandstall funnet etter 6 timer i både IL- og kryptesten, som vist i figur 5.1 b), ville man ha fått  $\sigma' - r_s$ -kurver som samsvarer mye bedre, som man kan se i figur 5.2.

Oppførselen til forsøkene er noe ulik i begynnelsen av testen. Dette kan forklares ut fra at prøven tøyes mye i starten av testen som følge av det høye vanninnholdet.



Figur 5.2: Tidsmotstandstall ved ulike effektivspenninger fra IL- og kryptforsøk i testserie 12 basert på tidsmotstand ved trinntid på 6 timer

## 5.5 Vurdering av krypparametere fra kryptester i forhold til IL-forsøk

Man kan i flere testserier se en tendens til at den  $r_s$  som er beregnet fra kryptforsøkene er lavere enn  $r_s$  fra IL-forsøkene, spesielt ved store spenninger. Om man ved setningsdimensjonering bruker krypparameterne fra kryptforsøkene vil man altså regne med at materialet har mindre motstand mot kryp enn om man hadde brukt data fra IL-forsøkene. Dette kan gi et konservativt utslag om man i et byggeprosjekt vil motvirke at det skal oppstå setninger, men om man dimensjonerer bygget ut fra forventede setningene er det uheldig, og derfor ikke særlig konservativt.

Resultatene viser at i fleste testseriene har man en prosentvis forskjell i  $r_s$  fra de korresponderende IL- og kryptforsøkene på mellom 2 og 25 %. Ser man dette i en praktisk sammenheng vil en forskjell i  $r_s$  på eksempelvis 20 % utgjøre 20 % forskjell i setningsberegninger.

Ved bruk av formlene oppgitt i kapittel 2.3.2 kan man gjøre et enkelt regneeksempel. La oss si at man fra et IL-forsøk har fått informasjon om at  $r_s$  er 1000, og skal beregne forventede sekundærsetninger til et 10 meter tykt lag etter 50 år. Man kan anta at referansetiden,  $t_r$ , er lik null, og at tiden det tar før primærkonsolideringen er fullført,  $t_p$ , er et halvt år. Da får man følgende kryptøyning:

$$\epsilon_s = \frac{1}{r_s} \ln \frac{t - t_r}{t_p - t_r} = \frac{1}{1000} \ln \frac{50}{0,5} = 0,46\%$$

Dette vil for  $H=10$  m gi følgende sekundærsetninger:

$$\delta_s = \int_0^H \epsilon dH = 0,46\% * 10m = 4,6cm$$

Om man fra krypforsøk hadde fått ut en  $r_s$  som var 20 % lavere,  $r_s = 1000 * (1 - 20\%) = 800$ , ville sekundærtøyningene for laget blitt beregnet til å være 0,57 %, og de forventede sekundærsetningene til å være 5,7 cm.

Man hadde altså beregnet sekundærsetningene med en forskjell på 1,1 cm.

I diskusjon med veiledere er det kommet frem til at 20 % avvik i disse beregningene ikke er mye om man sammenligner det med konsekvensene som kommer av å dimensjonere med en prekonsolideringsspenning som avviker like mye fra den faktiske verdien.

## 5.6 Evaluering av de ulike testprosedyrene

De fleste kryptestene ble utført med ett kryptrinn like etter  $p'_c$ , men i to av testene, test CRS-111\* og CRS-112\* ble kryptrinnet lagt ved slutten av testen. Man kan se at disse to forsøkene gir minst like gode resultater som de andre

med tanke på samsvar mellom  $r_s$ . Det kan virke som at den beregnede  $\sigma' - r_s$ -kurven til krypforsøkene ikke blir påvirket mye av hvor man velger å plassere kryptrinnet, så lenge det er etter  $p'_c$ . De gode resultatene fra disse testene kan også komme av at kvaliteten til forsøkene i disse testseriene er god.

Prosedyren med å variere tøyningshastigheten under CRS-testen viser resultater av omtrent lik kvalitet som CRS-forsøkene med ett kryptrinn. Metoden og beregningene er enkel å utføre, og man får god informasjon om kryppparameterne gjennom store deler av testen. En ting man kan peke på ved slike forsøk er at de gjerne tar noe lengre tid enn forsøkene med ett kryptrinn. Ved beregning av  $m/r_s$  er man avhengig av at forskjellen mellom tøyningshastighetene er stor nok, noe som betyr at den minste tøyningshastigheten bør være meget lav.

Det er vanskelig å utpeke hvilken metode som er best da det kun er utført to tester med variert tøyningshastighet. Ut fra det oppnådde datagrunnlaget vil det anbefales å utføre CRS-forsøk med variert tøyningshastighet om man vil ha informasjon om kryppparameterne ved ulike spenningsnivå, og om man har tilstrekkelig med tid. CRS-forsøk med ett kryptrinn anbefales om man er interessert i å undersøke kryppparameterne til et materiale ved en spesifikk spenning, og om man har stort tidspress. Det er sett at kryptrinnet gir god informasjon om materialets kryppparameterne ved og i området rundt kryptrinnets spenning.





## Kapittel 6

### Konklusjon og videre arbeid

Ved sammenligning av parallelle IL- og krypforsøk er man avhengig av god prøve kvalitet. Prøvene som er testet er tatt ut fra samme blokkprøve ved eksakt samme dybde, og skal i utgangspunktet gi perfekt grunnlag for sammenligning. Likevel har det oppstått store avvik mellom tester på tilsvarende materiale, og det er derfor tydelig at det har vært prøveforstyrrelser tilstede.

Det er sett en tendens til at kryptestene på ikke-sensitive leirer gir bedre resultater enn testene på kvikkleire. Det er ikke med det sagt at kryptester ikke lar seg gjøre på kvikkleire, men det reflekterer effekten som prøveforstyrrelser har på resultatet. Kvikkleire er mer sensitiv for forstyrrelser enn ikke-sensitive leirer, og det vil derfor være mer utfordrende å få helt uforstyrrede prøver som kan sammenlignes på en pålitelig måte.

Om man fokuserer på testene av best kvalitet, ser man at kryppparameterne man får ut fra kryptestene samsvarer relativt godt nok med de man får fra IL-testene. Man har i de fleste testserier et avvik på mellom 2 og 25 %, noe som kan føre til at man under- eller overdimensjonerer de forventede krypsetningene noe. Konsekvensene av dette er imidlertid små i forhold til konse-

kvensene av å dimensjonere med en prekonsolideringsspenning som avviker i samme størrelsesorden fra den faktiske verdien. Med grunnlag i resultatene som er oppnådd fra gjennomført laboratoriearbeid kan det konkluderes om at kryptestene gir pålitelig informasjon om kryppparameterne til et materiale.

De to foreslåtte metodene for å tolke ut kryppparameterne fra CRS-forsøk viser seg å gi omtrent like gode resultater. Prosedyren med å variere tøynings-hastigheten har den fordel at man får god informasjon om kryppparameterne til et materiale ved flere spenningsnivå. Prosedyren med CRS-forsøk med ett kryptrinn gir imidlertid veldig god informasjon om kryppparameterne ved en spesifikk spenning, og tar kortest tid av de to testene.

Det er undersøkt om avvikene mellom kryppparameterne fra IL- og CRS-forsøk kan skyldes faktorer som naturlig vanninnhold, flyteindeks, lagringstid og lignende, men her er det ikke funnet noen tydelig sammenheng. Det kan hende at man ser en mer utpreget sammenheng om man utfører mange flere tester på forskjellige typer leirer med ulike egenskaper.

## 6.1 Videre arbeid

Ved videreføring av dette arbeidet er det ut fra erfaringer og tanker funnet en del faktorer som kan forbedres for oppnåelse av bedre resultat. De fleste faktorene retter seg mot et større fokus på prøve kvalitet.

- For å sikre et godt sammenligningsgrunnlag bør parallelle IL- og krypt-forsøk gjøres på leire som er utsatt for minimale forstyrrelser. For optimale resultater anbefales det at testene utføres på helt ferske blokkprøver som verken er utsatt for transport eller lagring. Den beste løsningen

er å utføre testene like ved borestedet. Bruk av mobile ødometere kan da være nødvendig.

- Det vil anbefales å gjennomføre et slikt testprogram på mange forskjellige leirer med ulike egenskaper. Man har da et større grunnlag for å se om krypforsøkene er mer anvendelige for noen leirtyper enn andre.
- Det anbefales å utføre alle testene under like forhold, og helst ved temperaturer som tilsvarer in situ-temperatur. Da unngår man usikkerhet rundt temperatureffekter på resultatene.
- For å oppnå IL- og kryptester som viser lik oppførsel før og rundt prekonsolideringsspenningen kan det være hensiktsmessig å utføre krypforsøkene med lavere tøyningshastighet enn det som er gjort i dette arbeidet.
- Ved tester på omrørt, rekonsolidert materiale bør det før testing forsikres om at materialet er ferdig konsolidert. I tillegg bør prøvestykkene tas fra samme nivå for å sikre at de har blitt utsatt for like spenningsforhold under konsolidering, samt at prøvenes vanninnhold er likt. En løsning kan være å konsolidere leira i en sylinder med stor nok diameter til å ta ut flere ødometerprøver fra samme nivå. For at konsolideringen skal gå raskere bør leira plasseres i romtemperatur. For å oppnå best mulig samsvare mellom kryppparameterne fra testene er det dessuten nødvendig å utføre IL-testen i en slik testserie med lang trinntid, gjerne 24 timer, for å oppnå representativ tidsmotstand.

# Referanser

Airports (2016). Kansai airports. <http://www.kansai-airports.co.jp/en/index.htm/1>. [Online; accessed 10-Oktober-2016].

Andersen, K. H., Lunne, T., Kvalstad, T. J., og Forsberg, C. F. Deep water geotechnical engineering. In *Proc. 24th Nat. Conf. of Mexican Soc. of Soil Mechanics*, pages 1–57.

Berre, T. og Iversen, K. (1972). Oedometer test with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression. *Géotechnique*, 22(1):53–70.

Bjerrum, L. (1967). Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings.

Buisman, A. (1936). Results of long duration settlement tests. *Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass*, 1:103–107.

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

Degago, S., Grimstad, G., Jostad, H., Nordal, S., og Olsson, M. (2011). Use and misuse of the isotache concept with respect to creep hypotheses a and b. *Géotechnique*, 61(10):897–908.

- Degago, S. A. (2011). On creep during primary consolidation of clays.
- Diaz-Rodriguez, J., Leroueil, S., og Aleman, J. (1992). Yielding of Mexico city clay and other natural clays. *Journal of geotechnical engineering*, 118(7):981–995.
- Emdal, A. (2009). *Introduksjon til Geoteknikk*. NTNU.
- Emdal, A., Gylland, A., Amundsen, H. A., Kåsin, K., og Long, M. (2016). Mini-block samplers. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(999):1–11.
- Erol, O. (1977). Clay structure and creep behavior of clays as a rate process. *Retrospective Theses and Dissertations*, Paper 5823.
- Garathun, M. G. (2016). «dette bygget har sunket 40 centimeter på syv år». <http://www.tu.no/artikler/dette-bygget-har-sunket-40-centimeter-pa-syv-ar/358912/>. [Online; accessed 08-Oktober-2016].
- Grimstad, G., Dijkstra, J., Jostad, H. P., Degago, S. A., Olsson, M., Karstuen, M., Yin, Z.-Y., Qi, J., Zwanenburg, C., og den Haan, E. Creep - creep of geomaterials. <https://www.ntnu.edu/web/creep/about-creep/>. [Online; accessed 15-Oktober-2016].
- Gylland, A., Long, M., Emdal, A., og Sandven, R. (2013). Characterisation and engineering properties of tiller clay. *Engineering Geology*, 164:86–100.
- Jacobsen, H. M. (1993). Sætninger i jord. *Laboratoriet for Fundering, AUC, Lærebog i videregående geoteknik*, 2.
- Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxi-

- al tests. *Proceedings of the European conference on soil mechanics and foundation engineering*, 1:19–25.
- Johnsen, K. L. (2015). Effekten av spenningsavlastning i rekonsoliderte leirprøver.
- Karlsruud, K. (2015). Workshop: Creep Behaviour of Soils – Focus on Practical Applications. Technical report.
- Karlsruud, K. og Hernandez-Martinez, F. G. (2013). Strength and deformation properties of norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(12):1273–1293.
- Karlsruud, K., Otter, R., og Gjelsvik, V. (2013). State-of-the-art: Blokkprøver.
- King, J. R. (2013). Udrenert skjærkryp i kvikkleire: Utvikling av treaksialrigg og vurdering av esp, byneset, som forsøksfelt.
- Leoni, M., Karstunen, M., og Vermeer, P. A. (2008). Anisotropic creep model for soft soils. *Géotechnique*, 58(3):215–226.
- Leroueil, S. (2006). The isotache approach. where are we 50 years after its development by professor Šuklje? 2006 prof. Šuklje's memorial lecture. *Proceedings of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana, Slovenia*, pages 29–31.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., og Bouchard, R. (1985). Stress-strain-strain rate relation for the of sensitive natural clays.
- Liingaard, M., Augustesen, A., og Lade, P. V. (2004). Characterization of models for time-dependent behavior of soils. *International Journal of Geomechanics*, 4(3):157–177.

## REFERANSER

- Länsivaara, T. (1995). A critical state model for anisotropic soft soils. *Proceedings 11th European Conference Soil Mechanics Foundation Engineering Copenhagen, Denmark (6)*, 101106.
- Länsivaara, T. T. (1999). *A study of the mechanical behavior of soft clay*. Thesis.
- Lunne, T., Berre, T., og Strandvik, S. Sample disturbance effects in soft low plastic norwegian clay. In *Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*.
- Mesri, G. (1987). Fourth law of soil mechanics: A law of compressibility. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, Mexico*, 2:179–187.
- Mesri, G. og Castro, A. (1987).  $c_\alpha/c_c$  concept and  $k_0$  during secondary compression. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(3):230–247.
- Mesri, G. og Godlewski, P. M. (1977). Time-and stress-compressibility inter-relationship. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103(ASCE 12910).
- Mitchell, J. (1960). Fundamental aspects of thixotropy in soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 86(3):19–52.
- Mitchell, J. K. og Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior.
- Multiconsult (2016). Høykvalitets prøvetaking i kvikkleire. <http://www.multiconsult.no/hoykvalitets-provetaking-kvikkleire/>. [Online; accessed 15-November-2016].
- NGU. Kvartærgeologisk kart. <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>. [Online; accessed 30-November-2016].

- Nikolaisen, P.-I. (2014). «det rosa palasset» påført store skader av e18. <http://www.tu.no/artikler/Det-rosa-palasset-pafort-store-skader-av-E18/230623/>. [Online; accessed 05-Oktober-2016].
- Norgeskart. Norgeskart. <http://www.norgeskart.no/#5/378604/7226208/>. [Online; accessed 10-November-2016].
- Puzrin, A. M., Alonso, E. E., og Pinyol, N. (2010). *Unexpected excessive settlements: Kansai international airport, Japan*, pages 23–43. Springer.
- Sallfors, G. (1975). Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays.
- Sandven, R., Senneset, K., Emdal, A., Nordal, S., Janbu, N., Grande, L., og Amundsen, H. A. (2014). *Geotechnics Field and Laboratory Investigations*. Geotechnical Division, NTNU, Trondheim.
- Santamarina, J. C. (2003). Soil behavior at the microscale: particle forces. *Geotechnical Special Publication*, pages 25–56.
- Terzaghi, K. v. (1923). Die berechnung der durchlässigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung IIA*, 132:125–138.
- Torpe, G. R. (2014). Utvikling og evaluering av prosedyrer for gjennomføring av udrenerte skjærkrypforsøk i kvikkleire.
- Šuklje, L. (1957). The analysis of the consolidation process by the isotache method. *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London*, 1:200–206.



## REFERANSER

Vegvesen, S. (2010). Geoteknikk i vegbygging. håndbok v220.

Verruijt, A. og Van Baars, S. (2007). *Soil mechanics*. VSSD Delft, the Netherlands.

# Vedlegg A

## Fullstendig resultat fra ødometerforsøk

### Innhold:

**A.1:** Detaljert sammenligning av IL- og krypforsøk

**A.2:** IL-forsøk

**A.3:** Krypforsøk

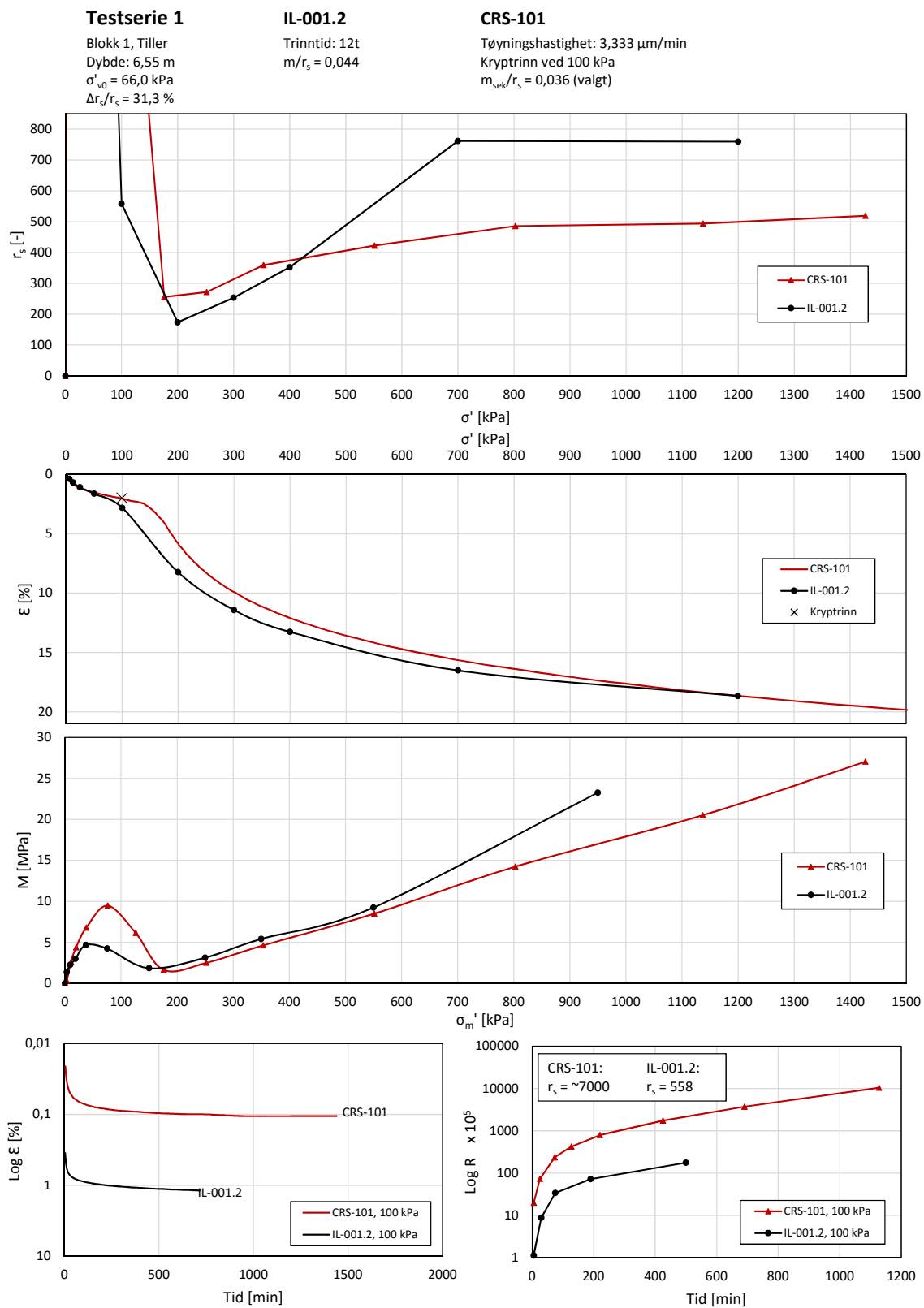
**A.4:** CRS-forsøk med variert tøyningshastighet

**A.5:** CRS-forsøk

**A.6:**  $\sigma' - r_s$ -kurver fra IL- og krypforsøk i full skala

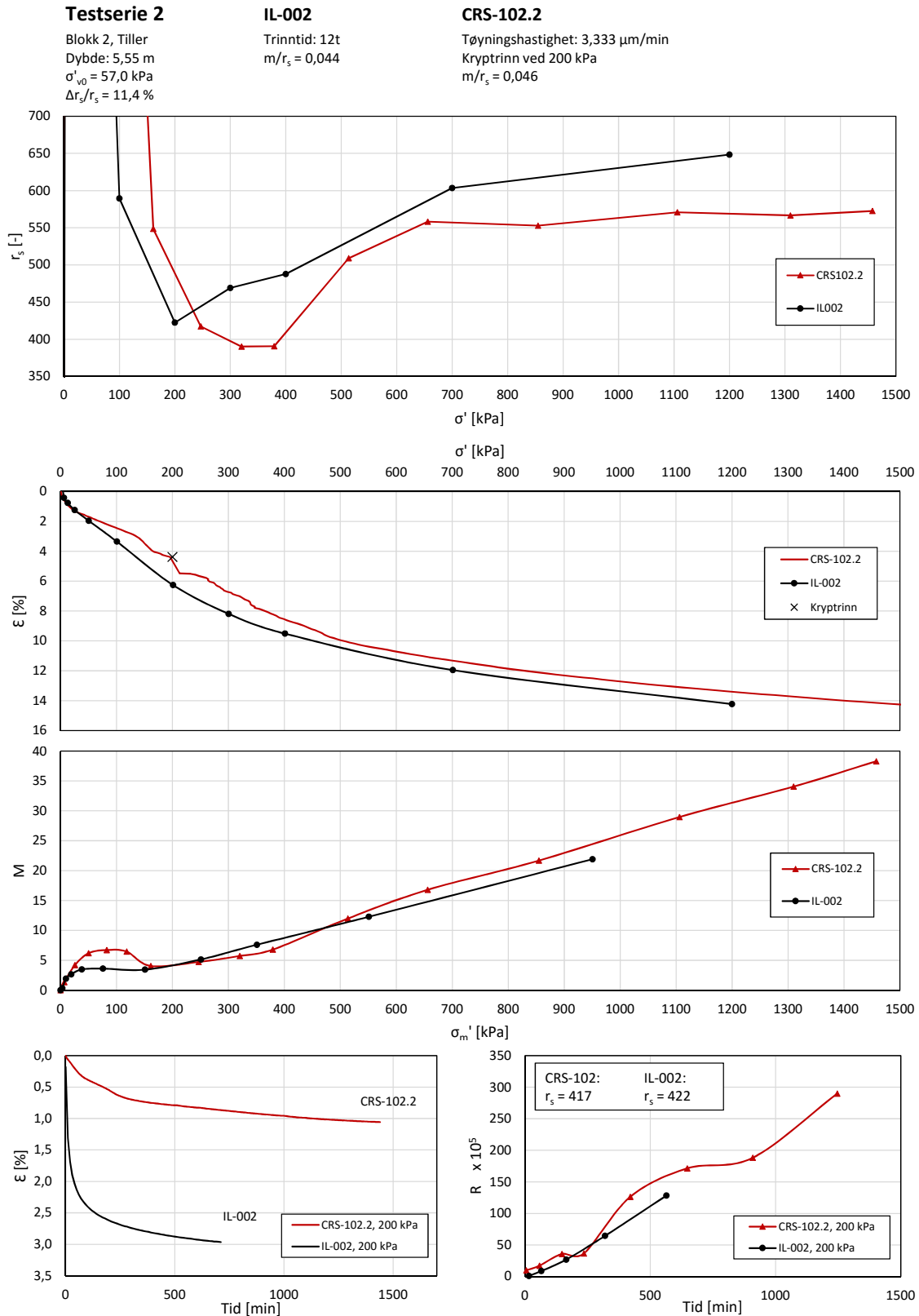
### **A.1 Detaljert sammenligning av IL- og krypforsøk**

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



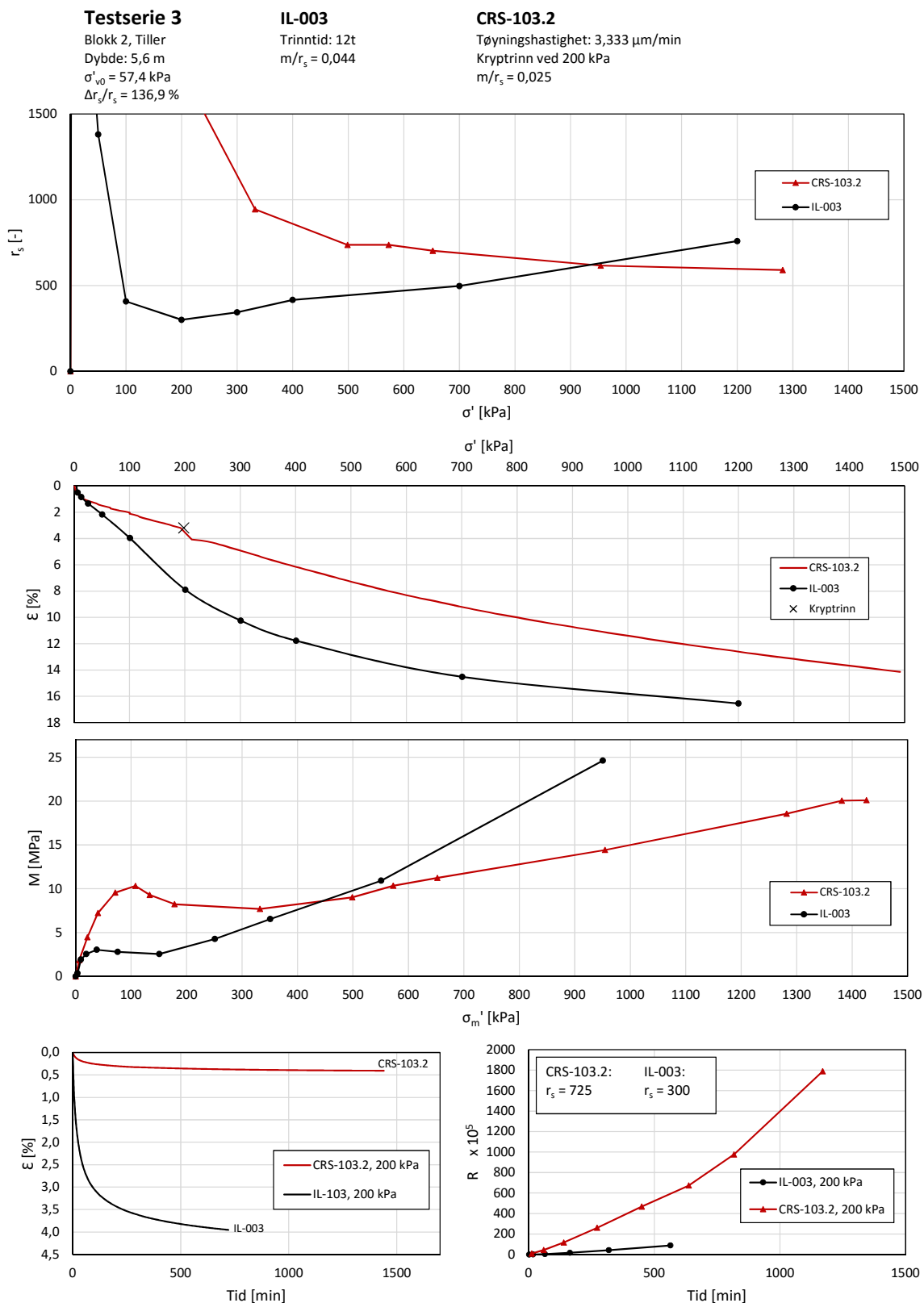
Figur A.1: Resultat fra testserie 1

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.2: Resultat fra testserie 2

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.3: Resultat fra testserie 3

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## Testserie 4

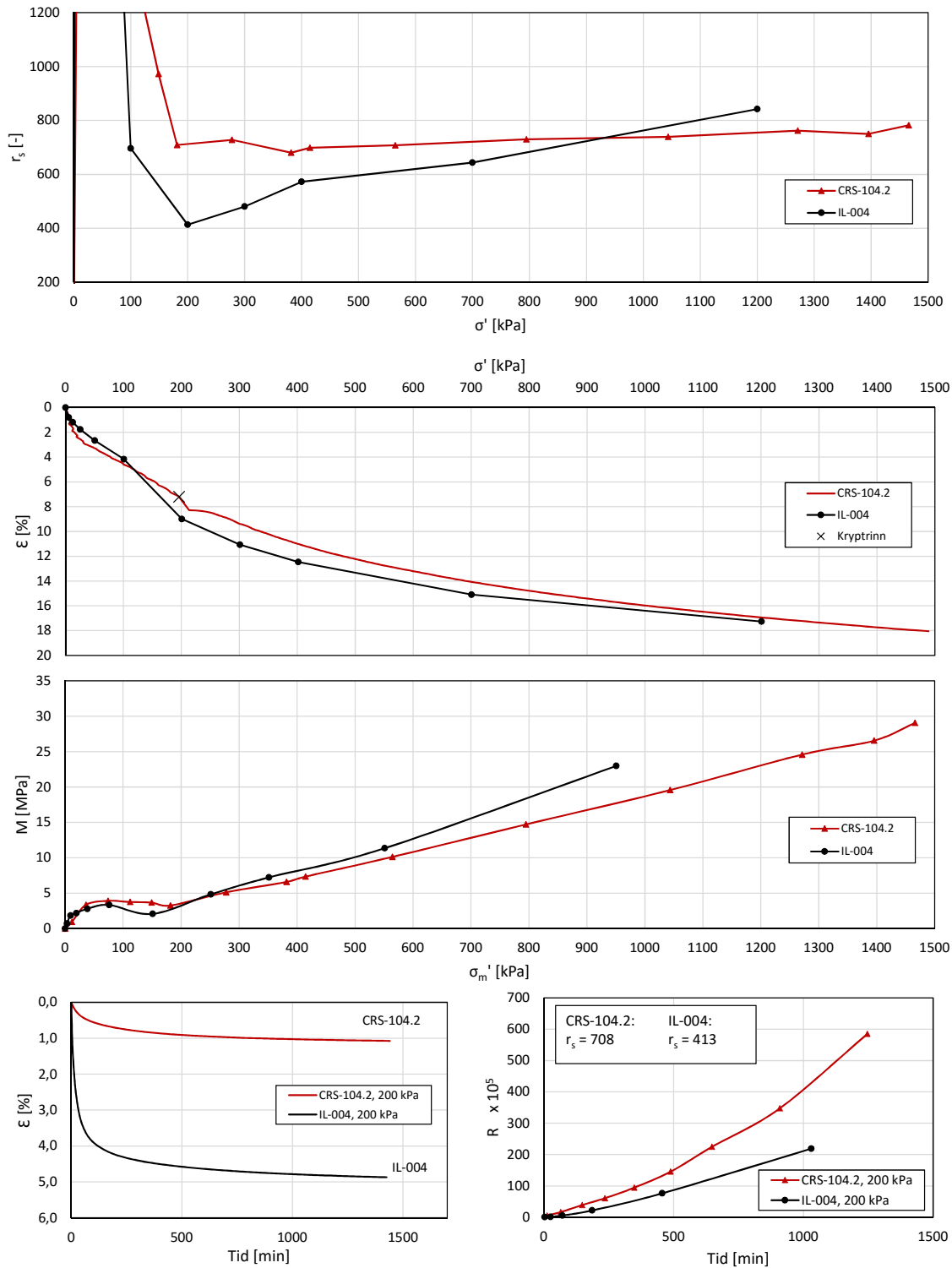
Blokk 2, Tiller  
 Dybde: 5,65 m  
 $\sigma'_{v0} = 57,9 \text{ kPa}$   
 $\Delta r_s / r_s = 24,9 \%$

## IL-004

Trinntid: 24t  
 $m/r_s = 0,033$

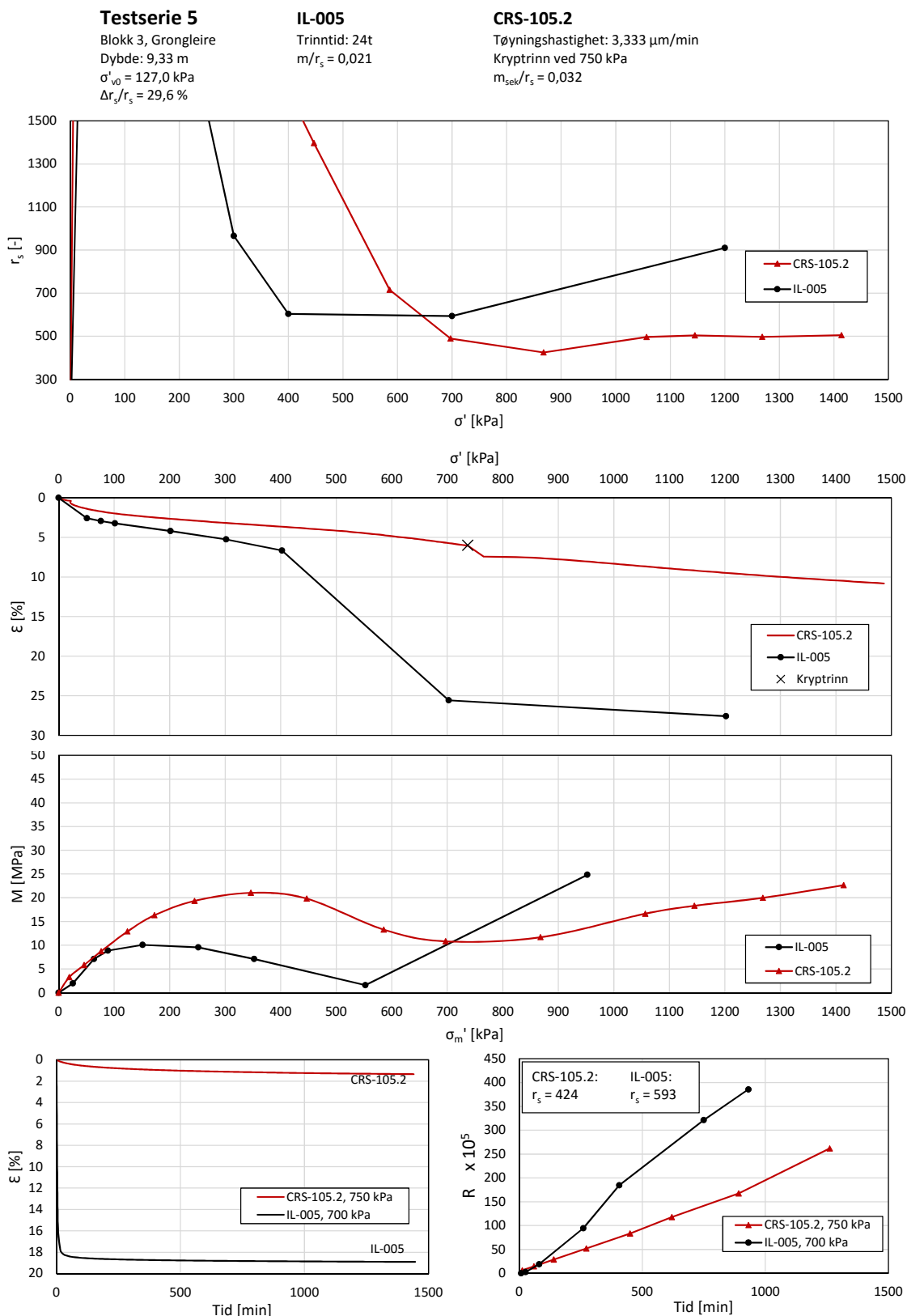
## CRS-104.2

Tøyningshastighet:  $3,333 \mu\text{m}/\text{min}$   
 Kryptring ved 200 kPa  
 $m_{sek}/r_s = 0,025$



Figur A.4: Resultat fra testserie 4

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.5: Resultat fra testserie 5

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## Testserie 6

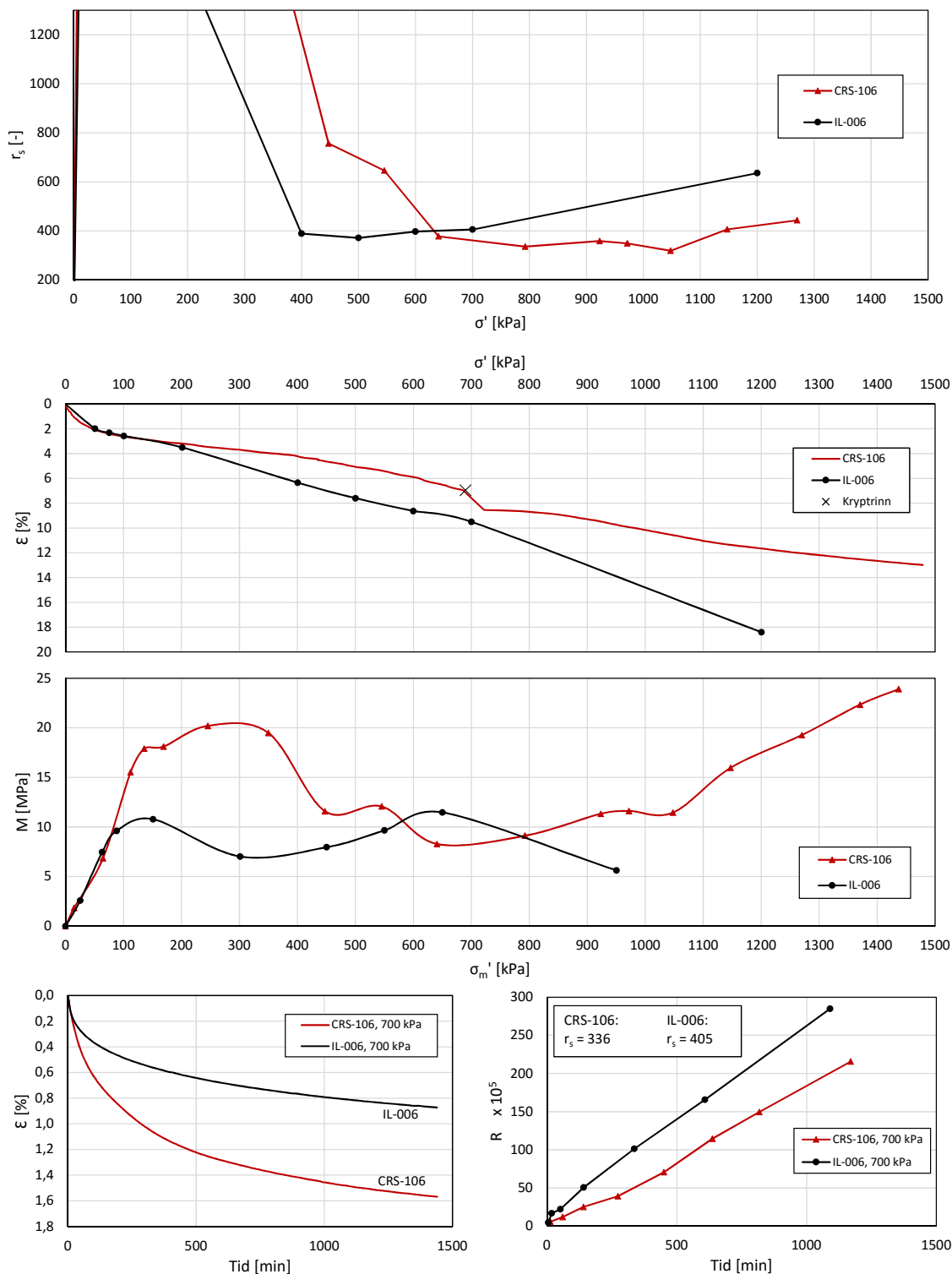
Blokk 3, Grongleire  
 Dybde: 9,28 m  
 $\sigma'_{v0} = 126,5$  kPa  
 $\Delta r_s / r_s = 26,3$  %

## IL-006

Trinntid: 24t  
 $m/r_s = 0,035$

## CRS-106

Tøyningshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$   
 Kryprrinn ved 700 kPa  
 $m_{sek}/r_s = 0,034$



Figur A.6: Resultat fra testserie 6



# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## Testserie 7

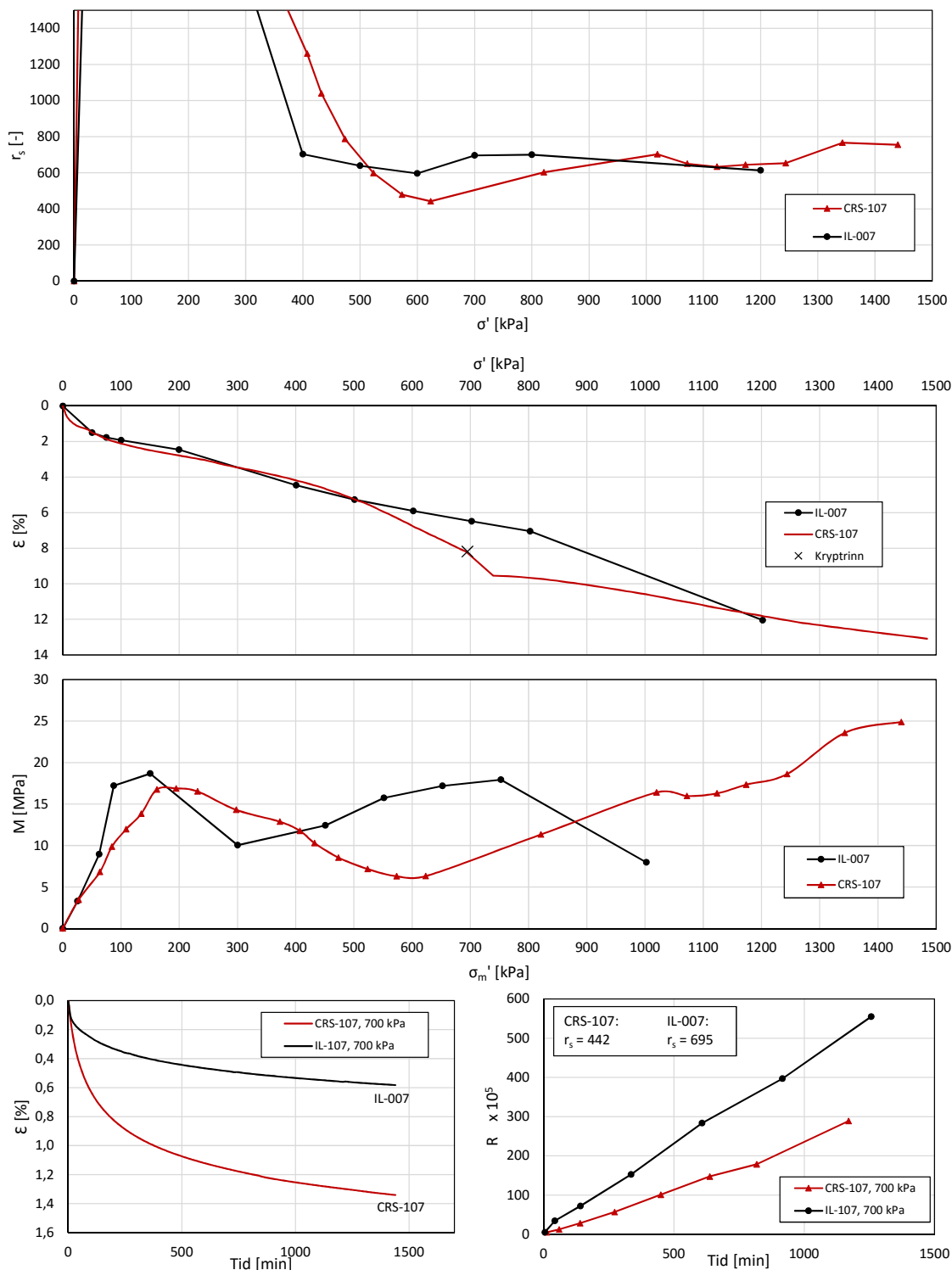
Blokk 3, Grongleire  
 Dybde: 9,38 m  
 $\sigma'_{v0} = 127,4$  kPa  
 $\Delta r_s / r_s = 15,4$  %

## IL-007

Trinntid: 24t  
 $m/r_s = 0,035$

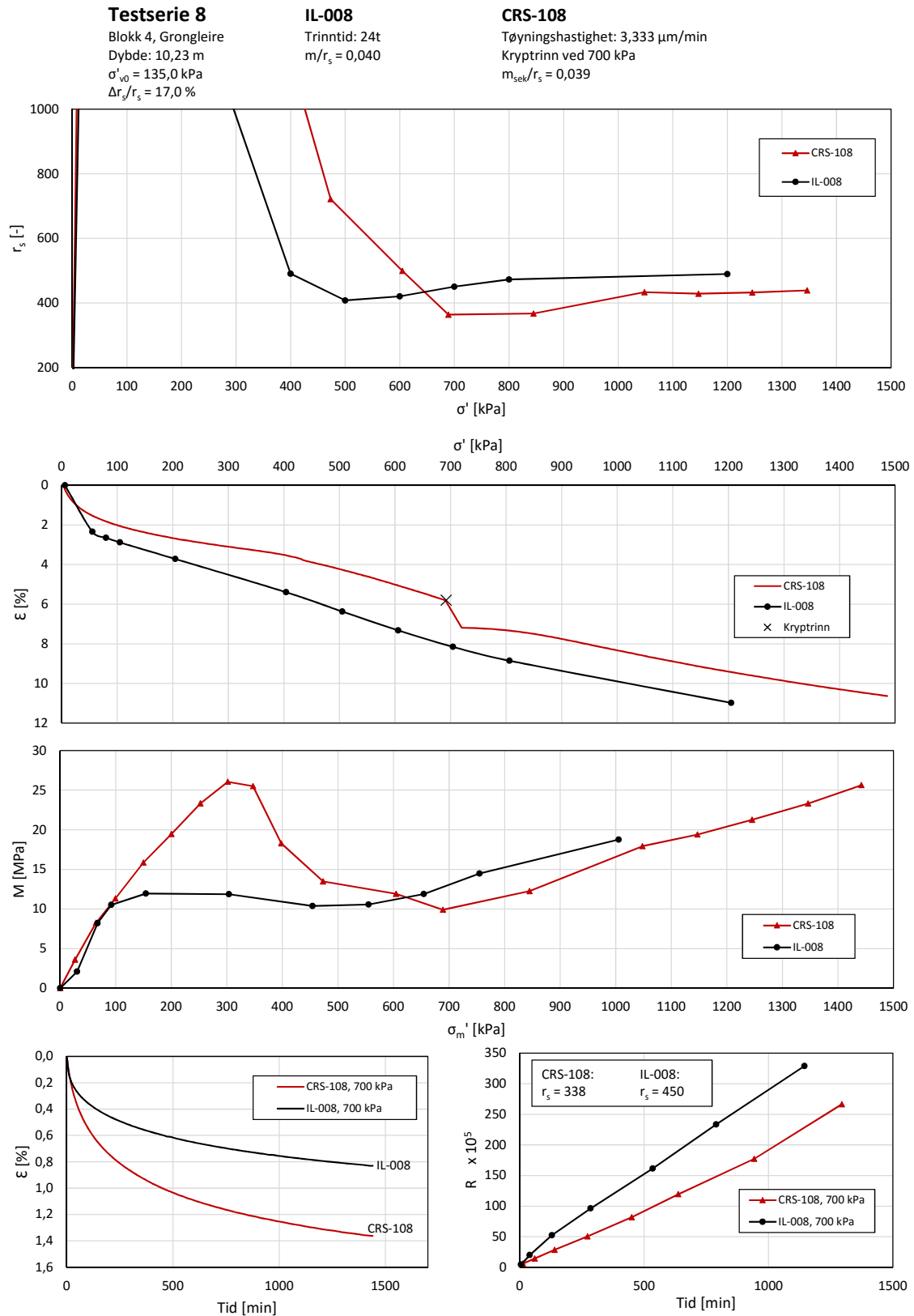
## CRS-107

Tøyningshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$   
 Kryprrinn ved 700 kPa  
 $m_{sek}/r_s = 0,023$



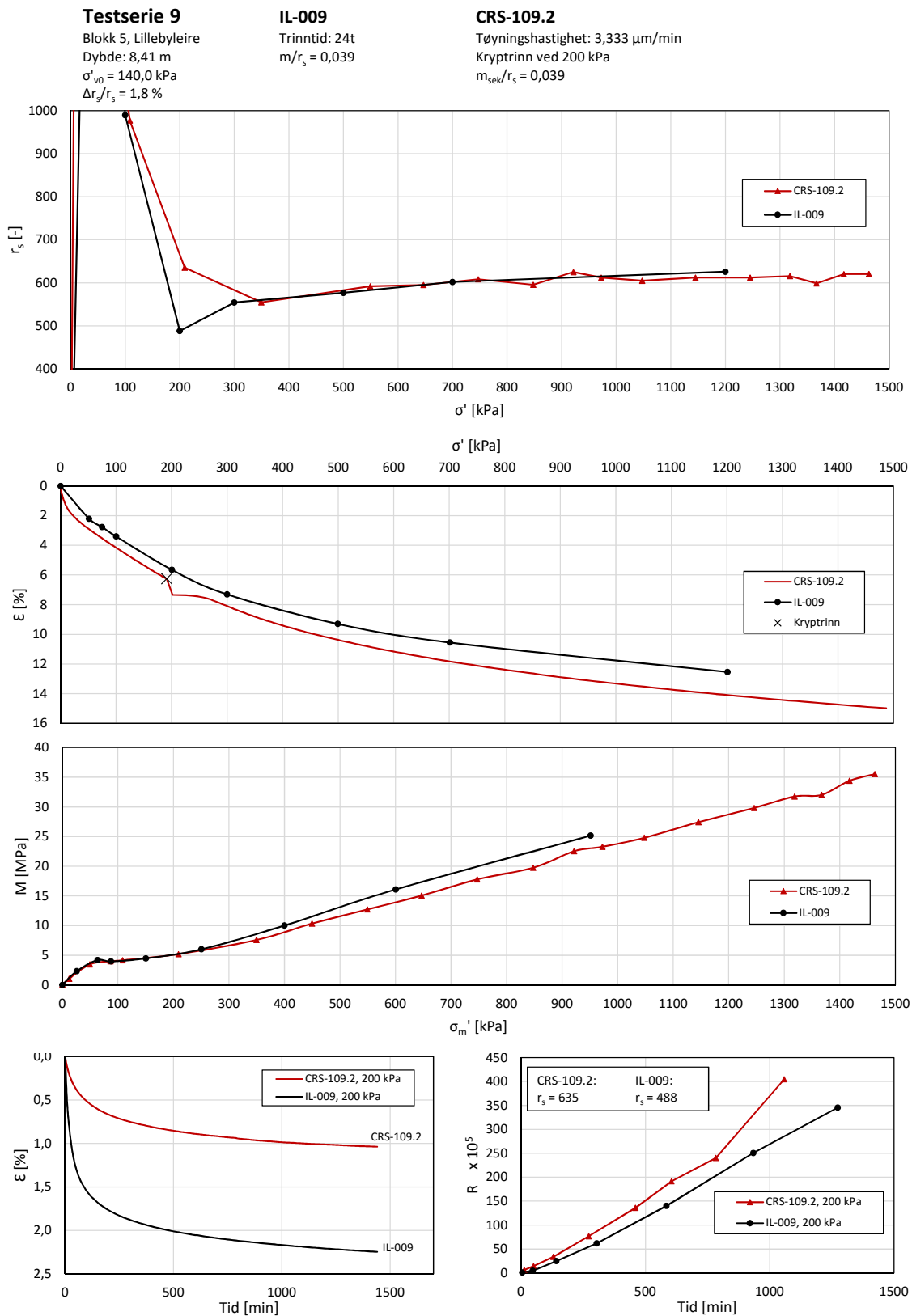
Figur A.7: Resultat fra testserie 7

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



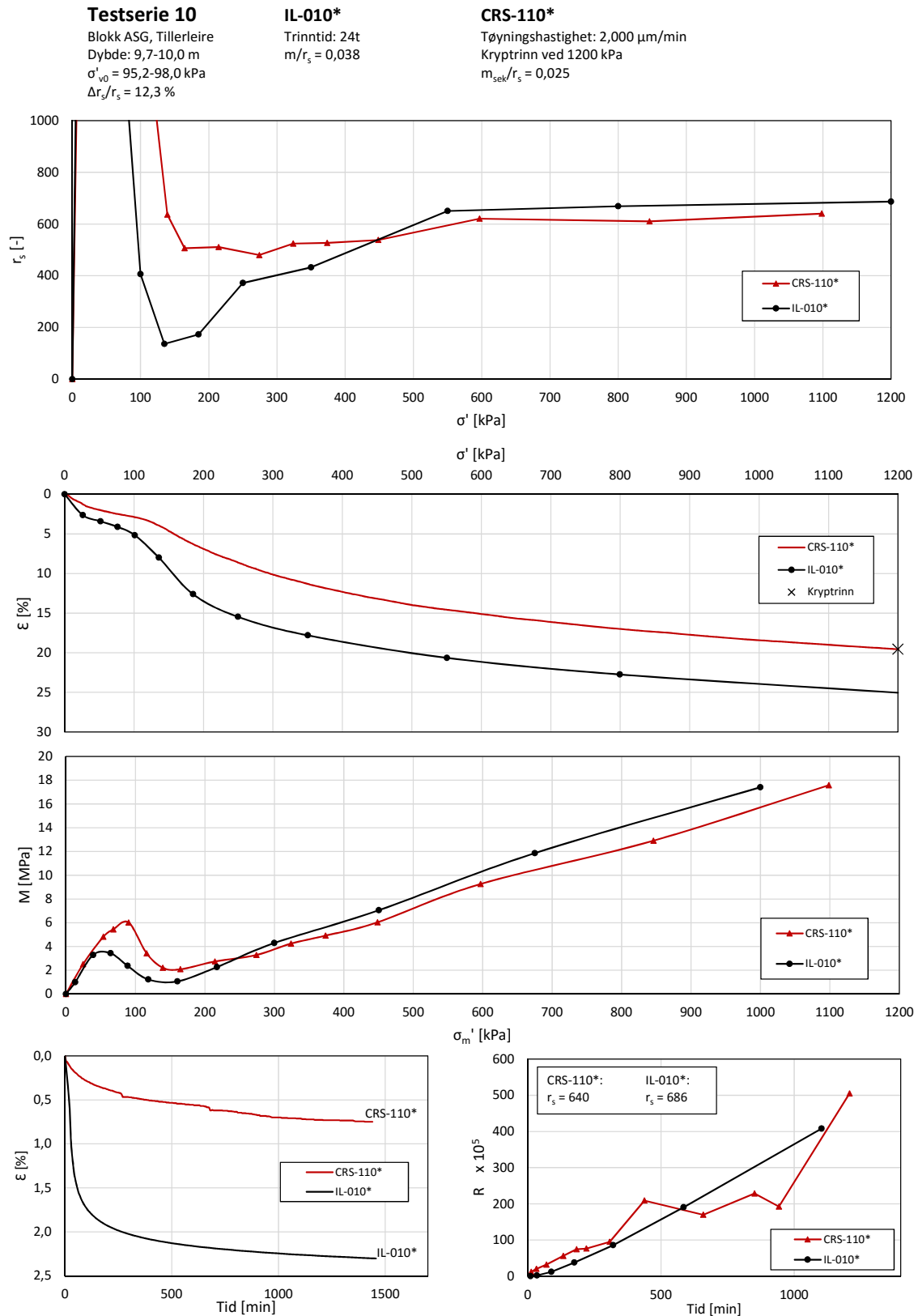
Figur A.8: Resultat fra testserie 8

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



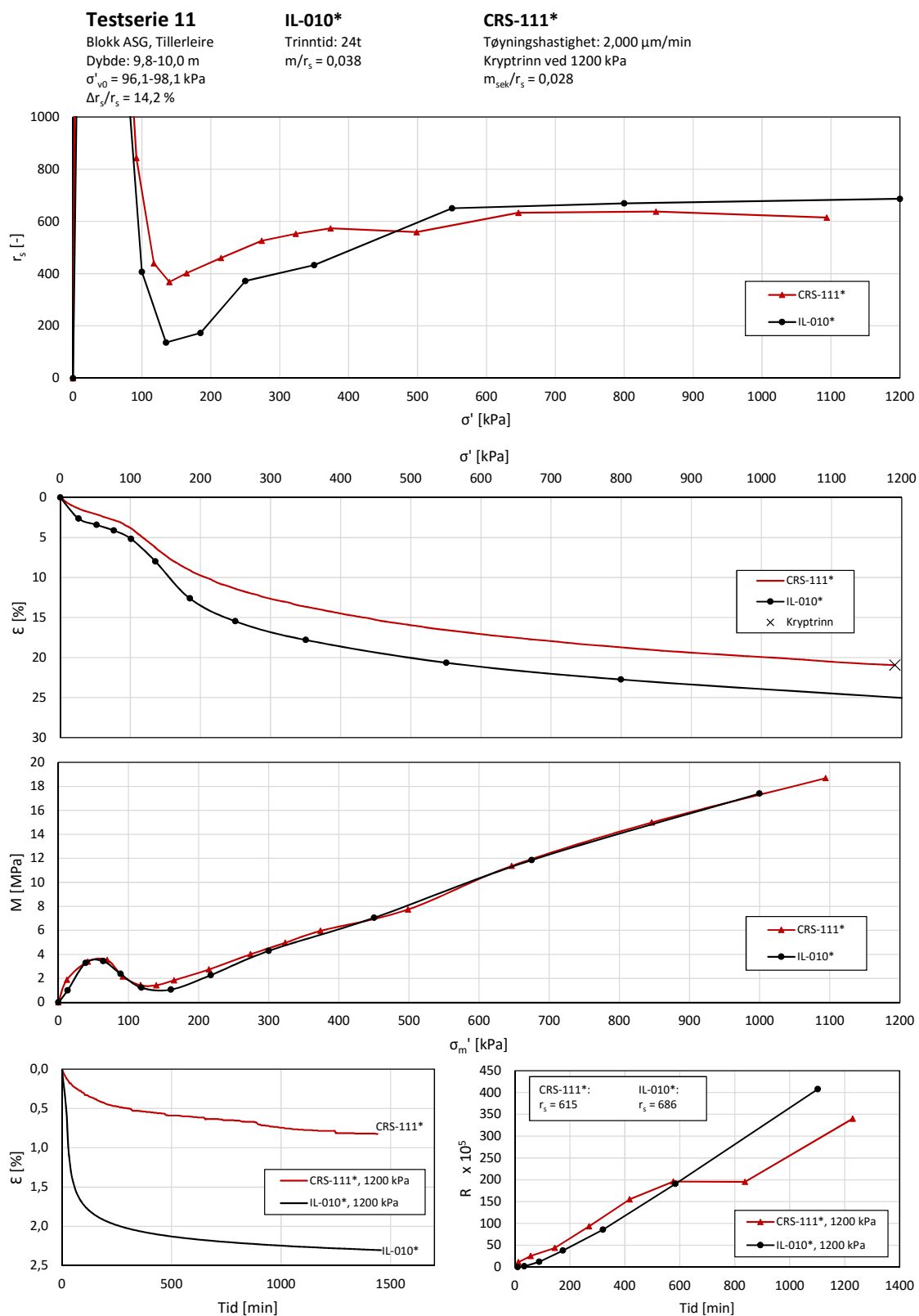
Figur A.9: Resultat fra testserie 9

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



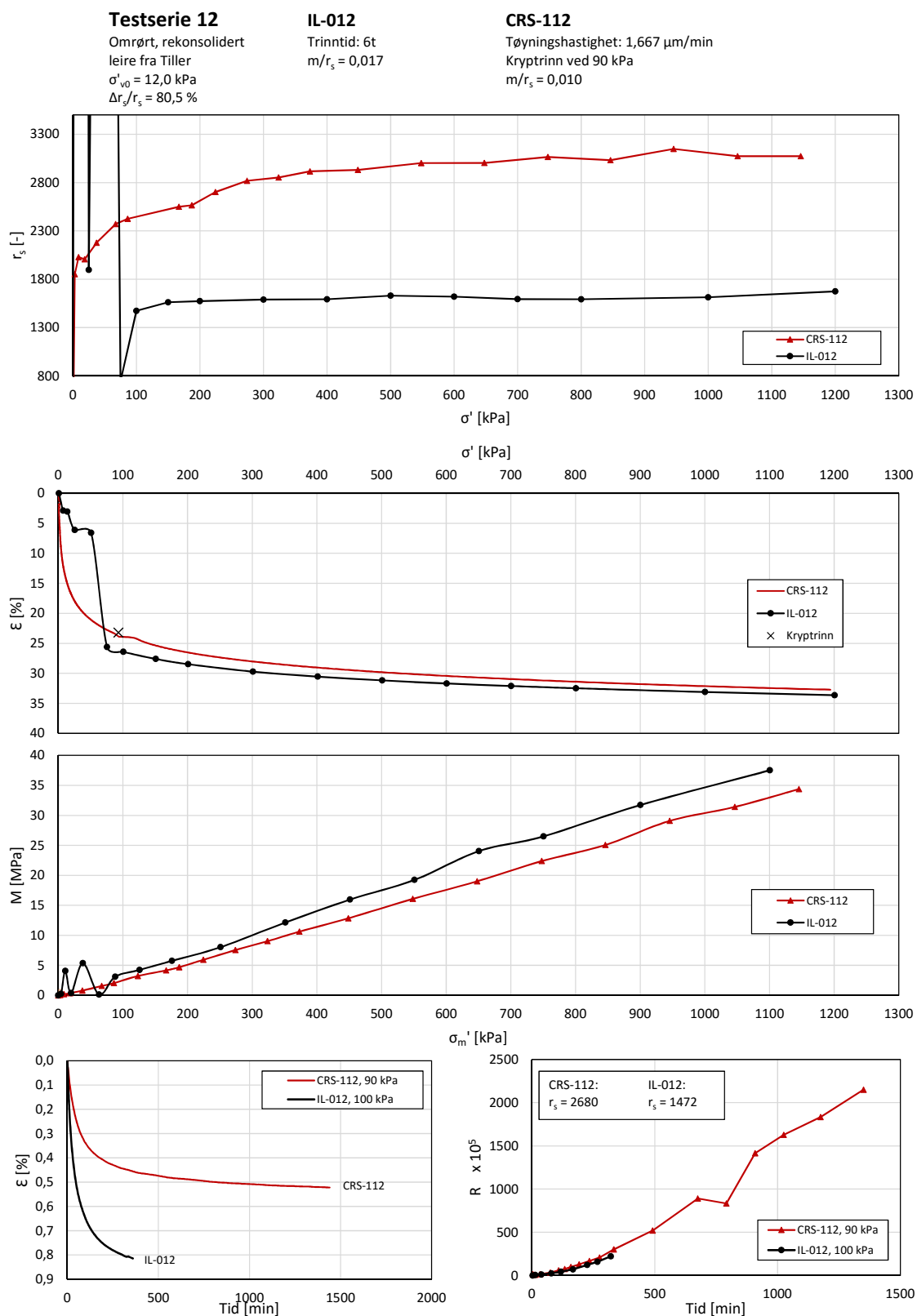
Figur A.10: Resultat fra testserie 10, hvor krepstrinnet i krepforsøket er lagt ved slutten av testen

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



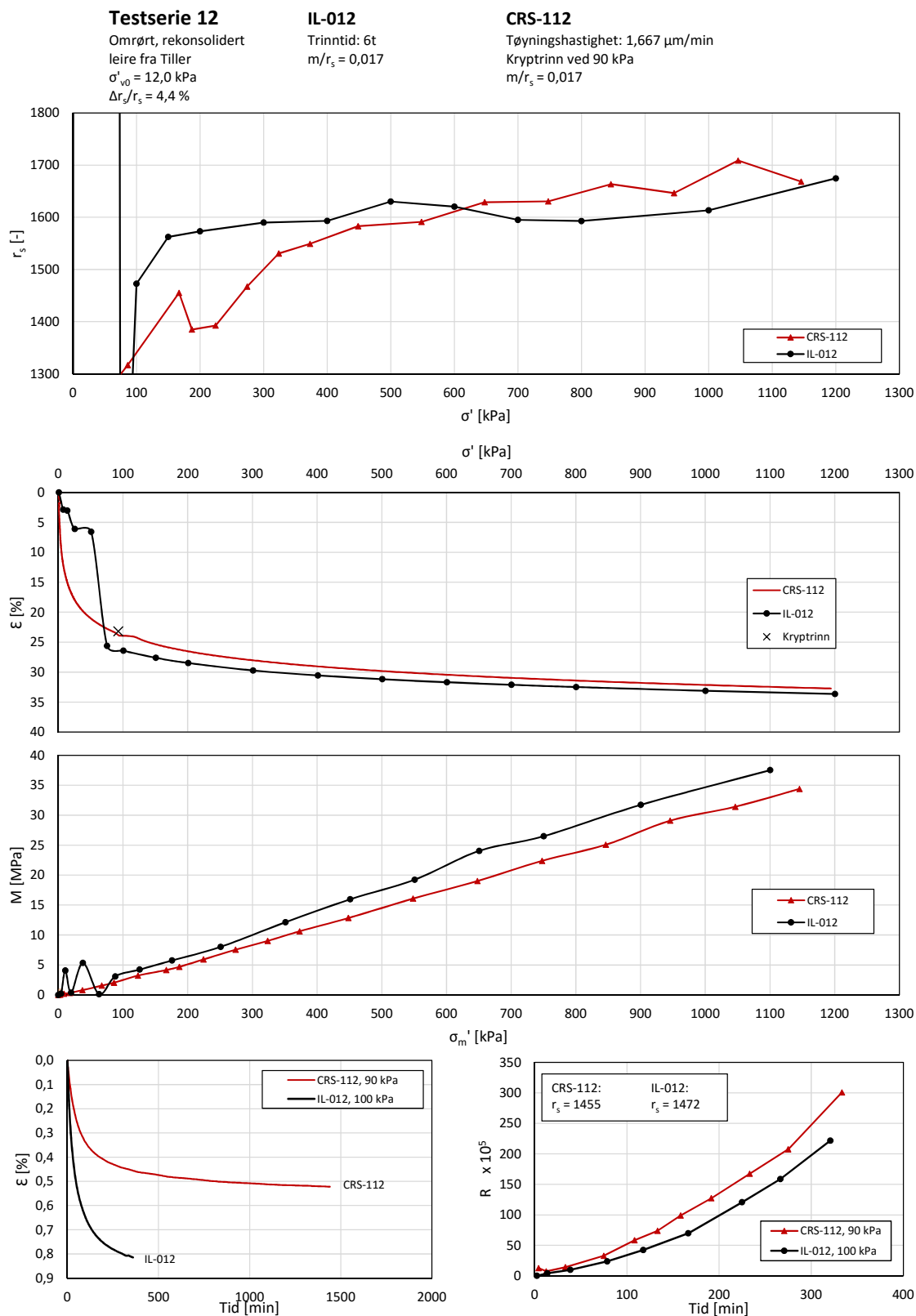
Figur A.11: Resultat fra testserie 11, med kryptrinn ved slutten av kryptforsøket

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



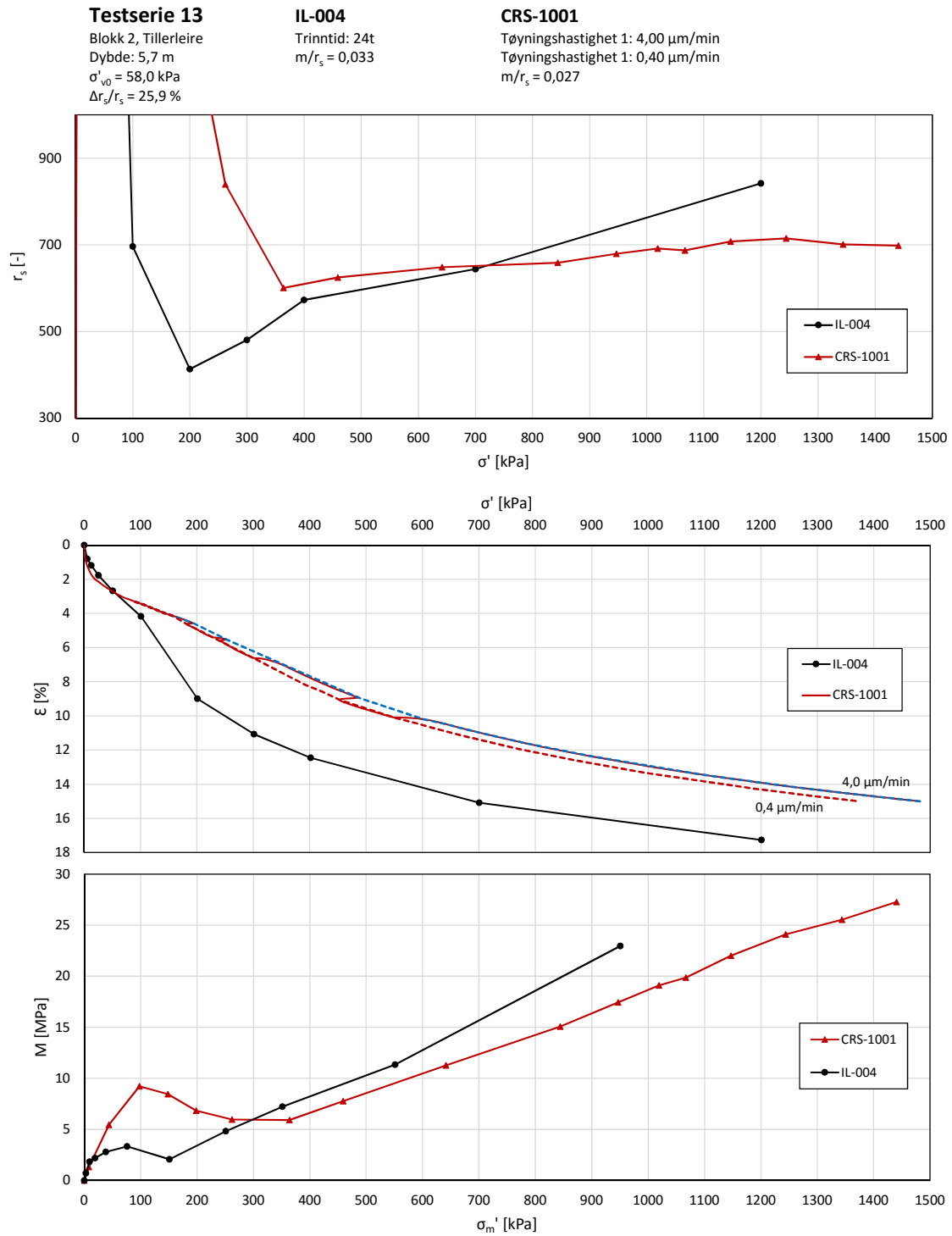
Figur A.12: Resultat fra testserie 12 på omrørt, rekonsolidert leire

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.13: Resultat fra testserie 12 på omrørt, rekonsolidert leire.  $r_s$  er her beregnet ut fra tidsmotstanden etter 6 timer i det aktuelle lasttrinnet, både i IL- og i kryptesten.

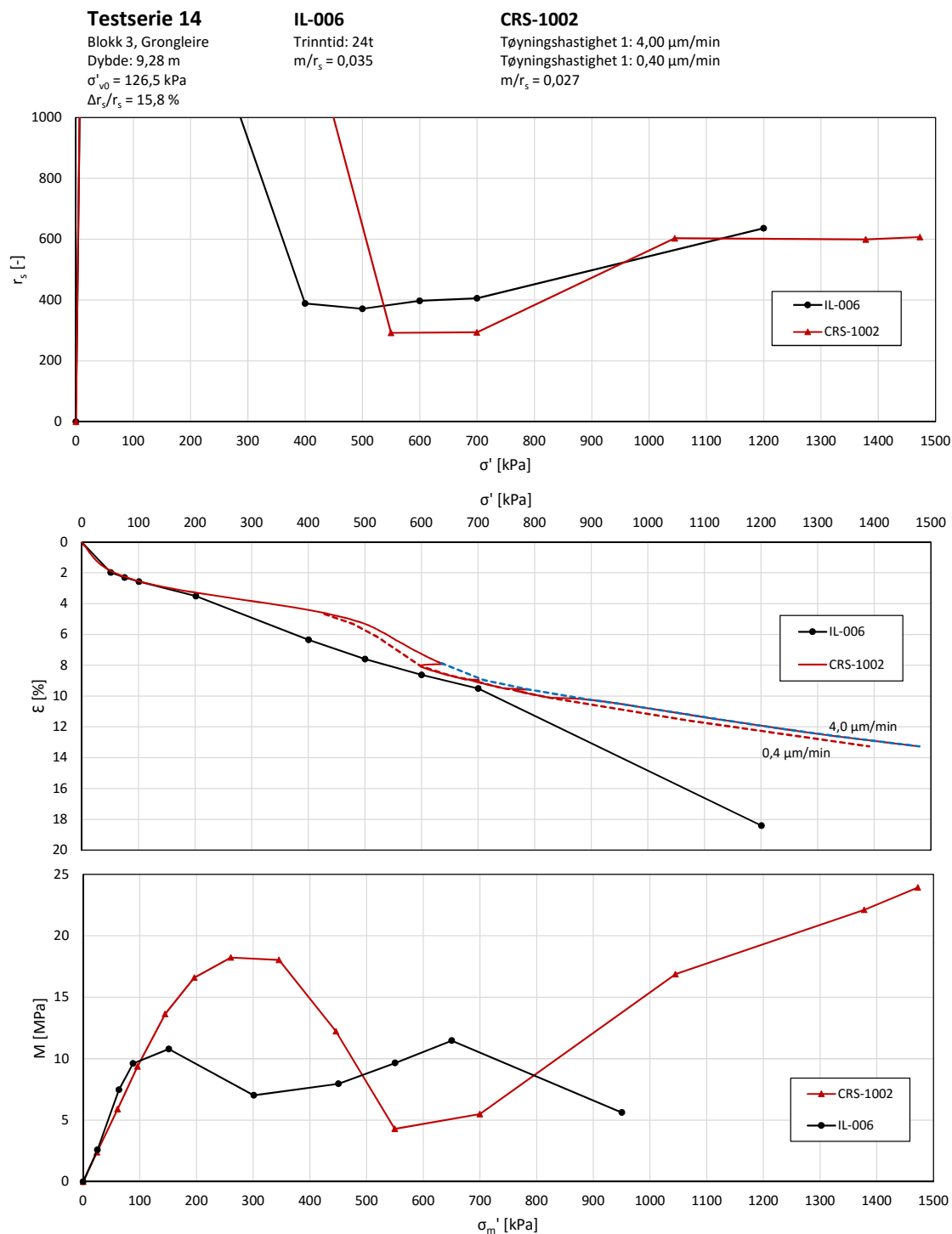
# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.14: Resultat fra testserie 13, hvor forholdet mellom  $m$  og  $r_s$  er funnet fra CRS-test med variert tøyningshastighet



VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.15: Resultat fra testserie 14, hvor forholdet mellom  $m$  og  $r_s$  er funnet fra CRS-test med variert tøyningshastighet

## **A.2 IL-forsøk**

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-001.2, Tillerleire

Blokk 1

Dybde: 6,55 m

Prøvetakingsdato: 16.08.16

Forsøksdato: 13.09.16

Trinntid: 12 t

$w_0 = 41,3 \%$

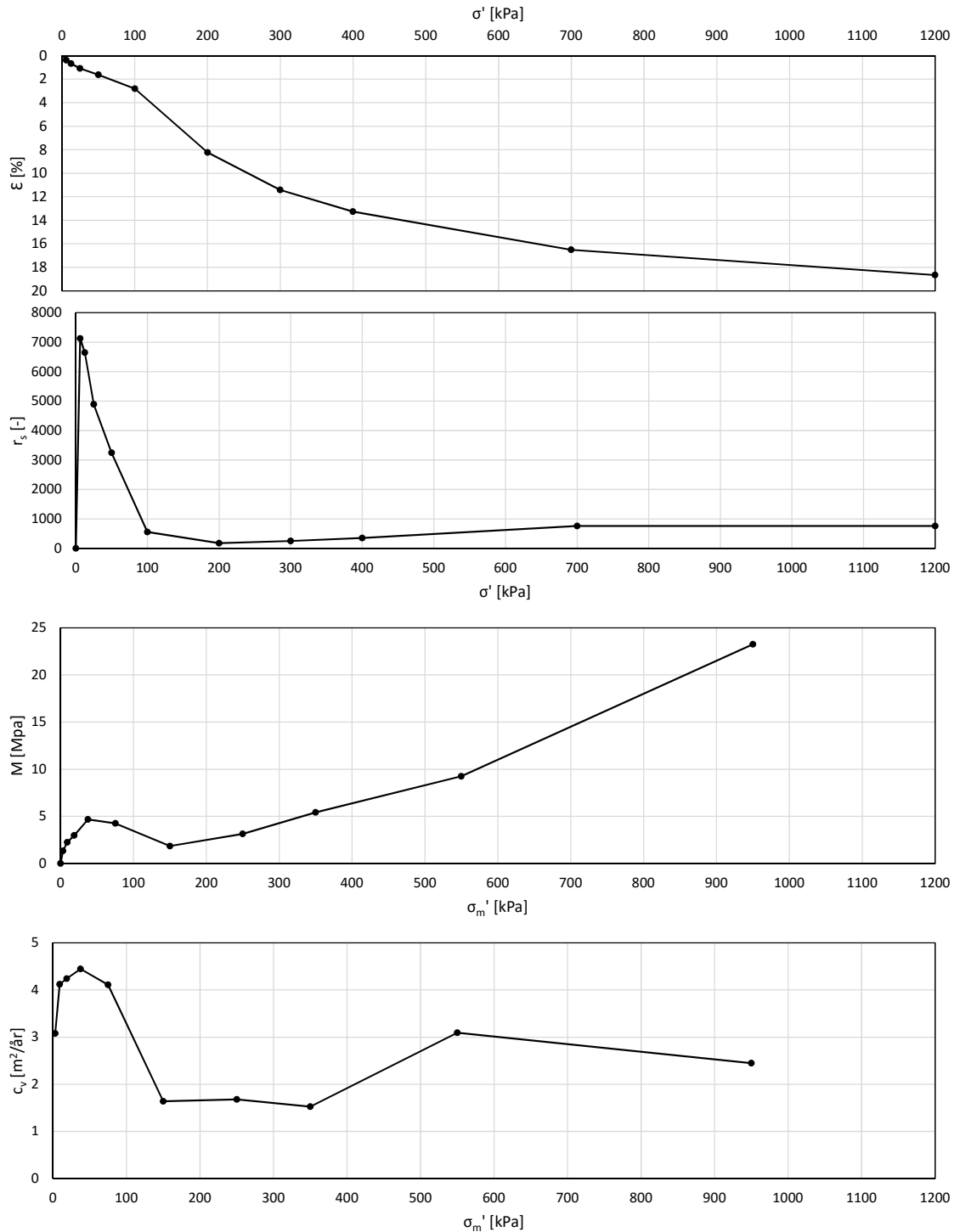
$\sigma'_{v0} = 66,0 \text{ kPa}$

$\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$

$M_{OC} = 4,7 \text{ MPa}$

$m = 21,6$

$m/r_s = 0,044$



Figur A.16: Resultat fra IL-001.2

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-002

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,55 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 20.09.16

Trinntid: 12 t

$w_0 = 33,0\%$

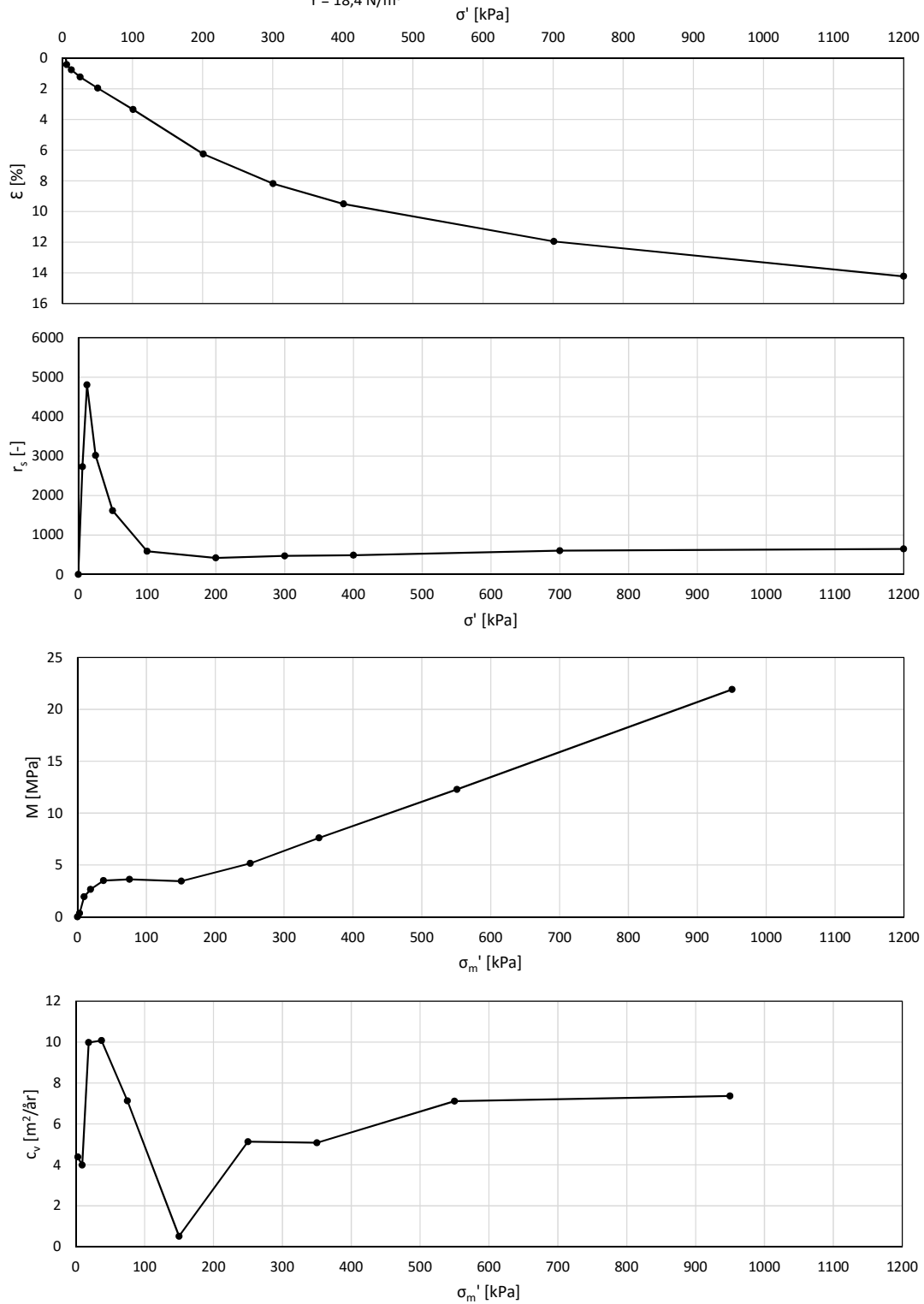
$\sigma'_{v0} = 57,0$  kPa

$\gamma = 18,4$  N/m<sup>3</sup>

$M_{oc} = 3,6$  MPa

$m = 22,0$

$m/r_s = 0,044$



Figur A.17: Resultat fra IL-002

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-003

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,60 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 04.10.16

Trinntid: 12 t

$w_0 = 35,9 \%$

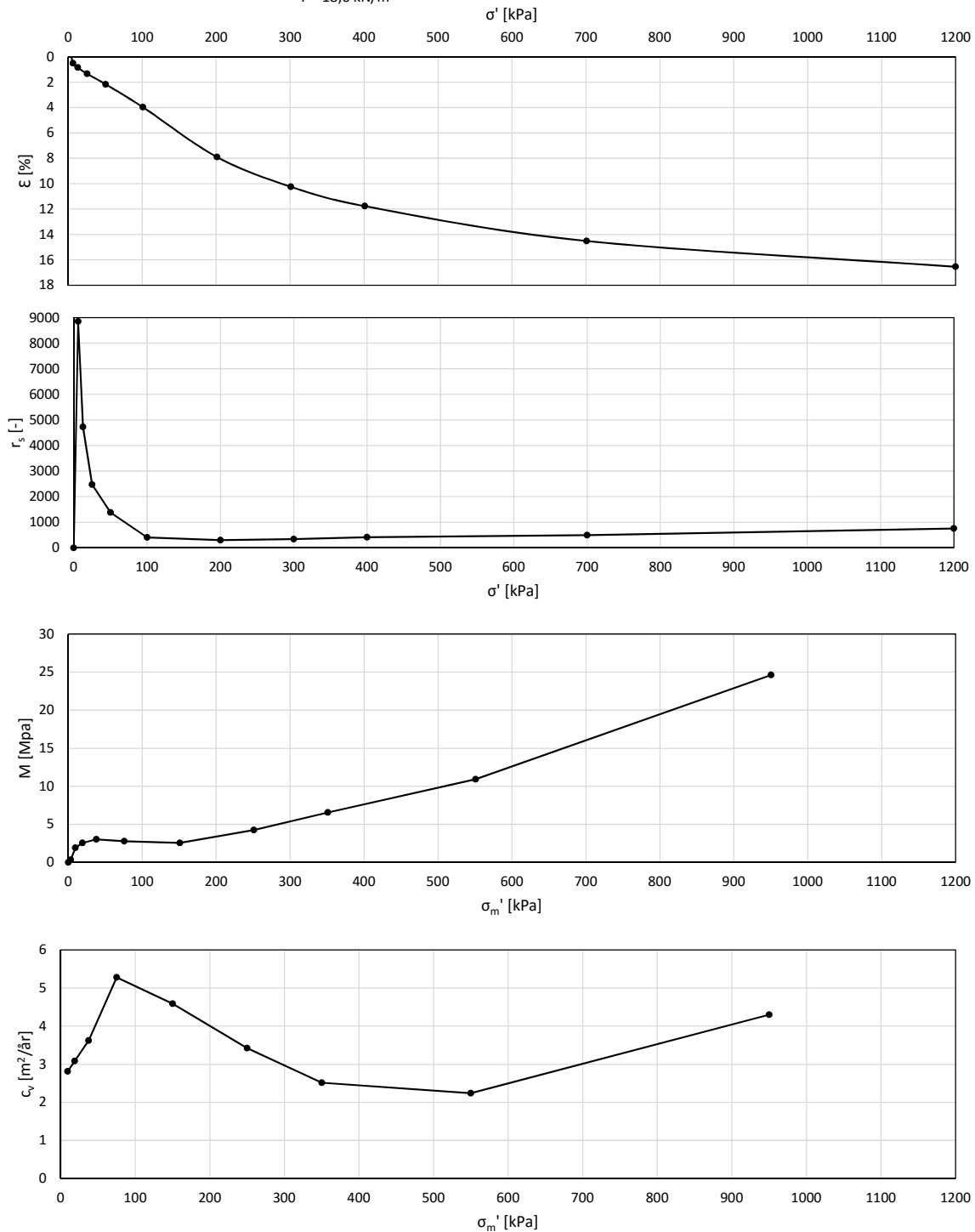
$\sigma'_{v0} = 57,4 \text{ kPa}$

$\gamma = 18,6 \text{ kN/m}^3$

$M_{OC} = 3,0 \text{ MPa}$

$m = 23$

$m/r_s = 0,044$



Figur A.18: Resultat fra IL-003

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-004

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,65 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 10.10.16

Trinntid: 24 t

$w_0 = 38,5 \%$

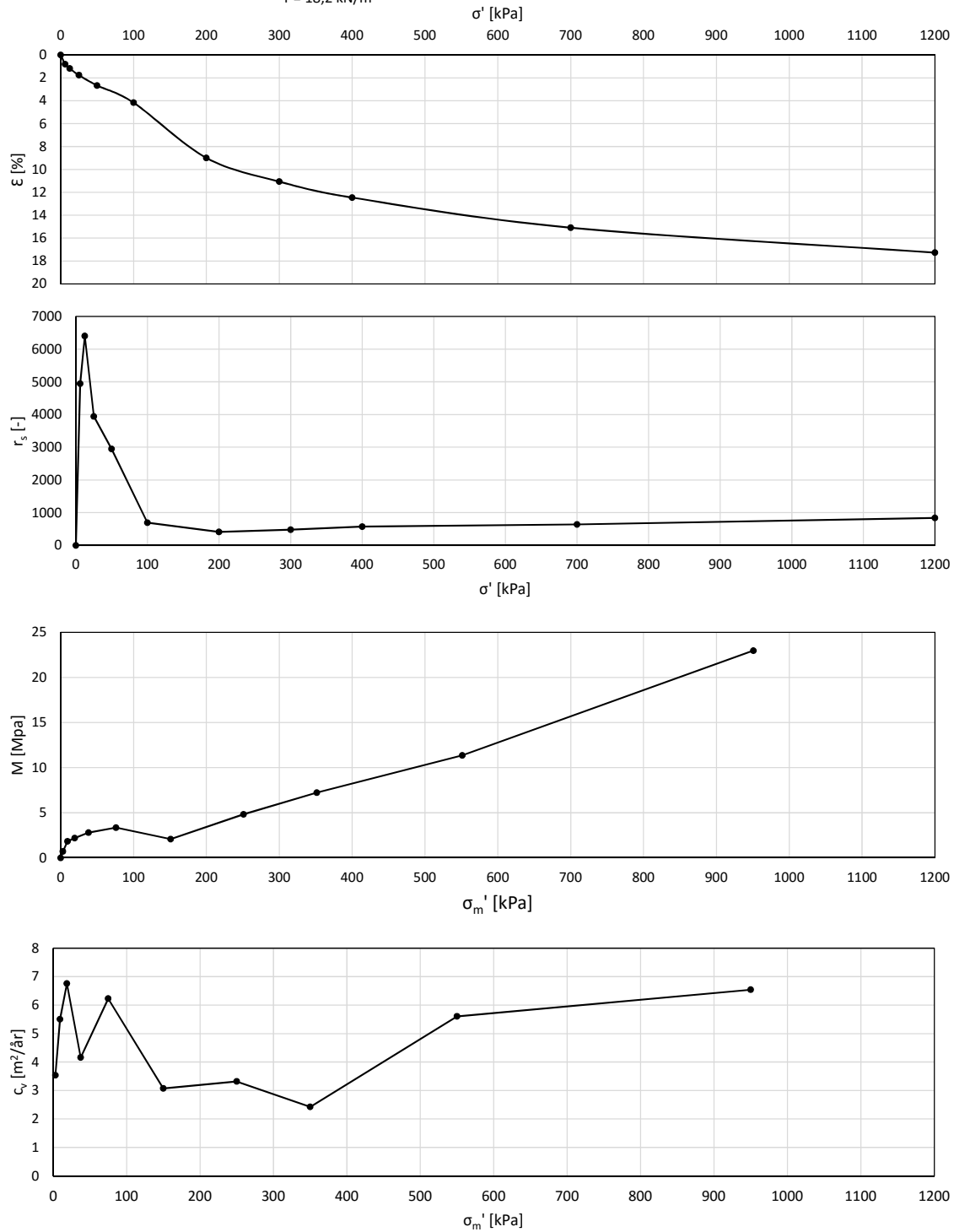
$\sigma'_{v0} = 57,9 \text{ kPa}$

$\gamma = 18,2 \text{ kN/m}^3$

$M_{oc} = 3,3 \text{ MPa}$

$m = 22,5$

$m/r_s = 0,033$



Figur A.19: Resultat fra IL-004

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-005

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,33 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 21.10.16

Trinntid: 24 t

$w_0 = 34,0\%$

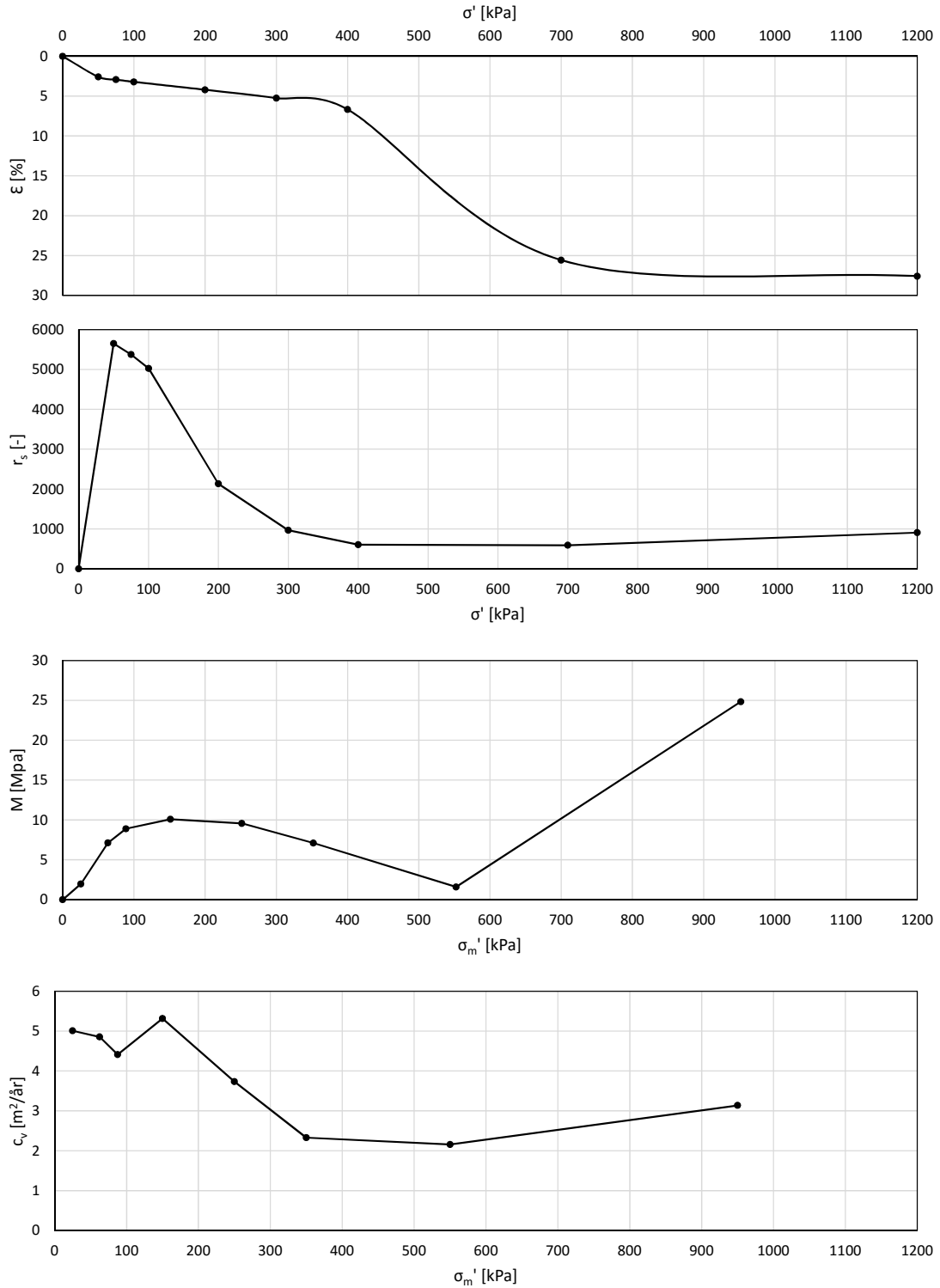
$\sigma'_{v0} = 127$  kPa

$\gamma = 19,2$  kN/m<sup>3</sup>

$M_{oc} = 10,1$  MPa

$m = 58,0$

$m/r_s = 0,021$



Figur A.20: Resultat fra IL-005

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-006

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,28 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 31.10.16

Trinntid: 24 t

$w_0 = 36,9\%$

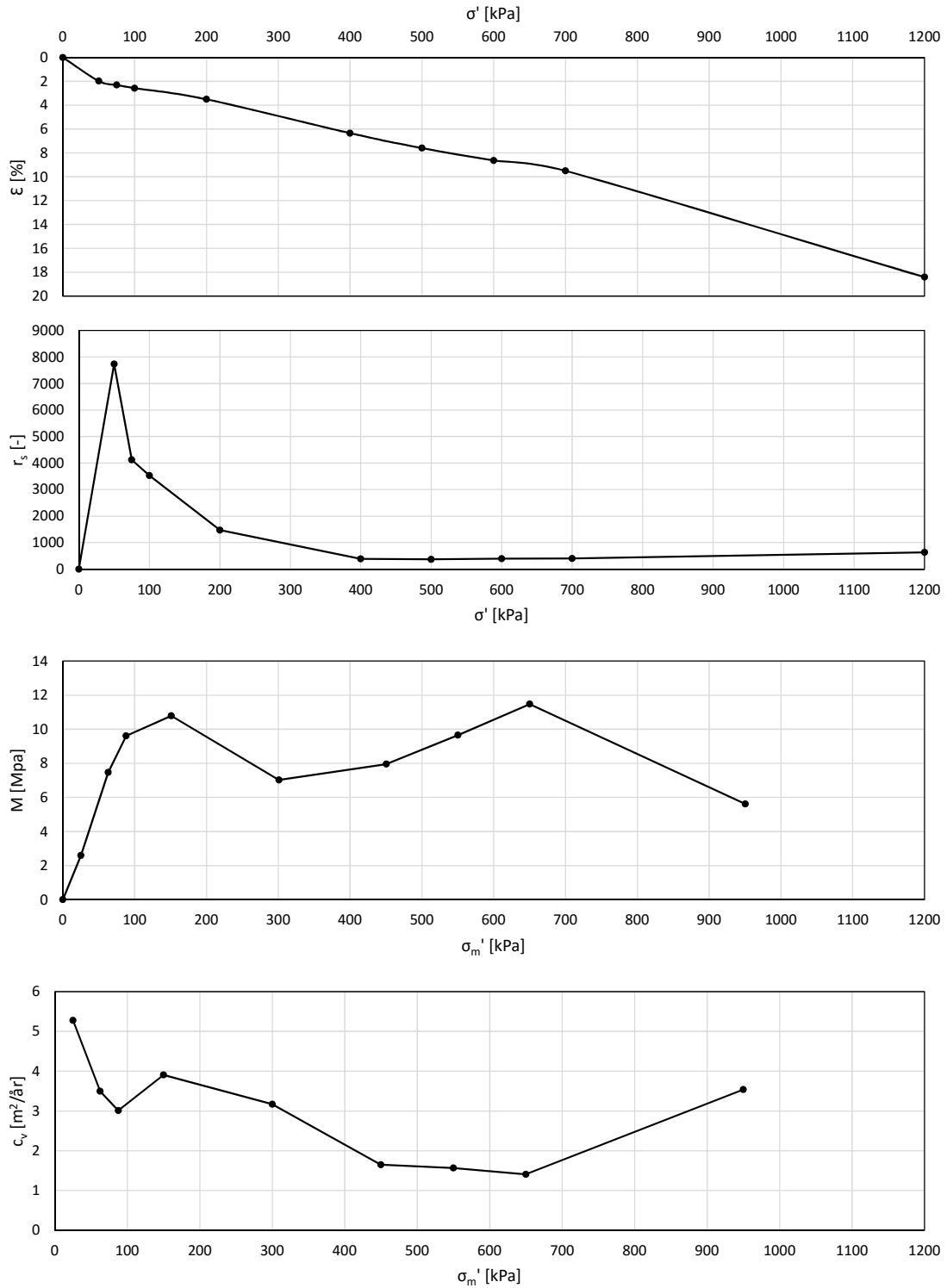
$\sigma'_{v0} = 126,5 \text{ kPa}$

$\gamma = 19,1 \text{ kN/m}^3$

$M_{OC} = 10,8 \text{ MPa}$

$m = 18,0$

$m/r_s = 0,035$



Figur A.21: Resultat fra IL-006



# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-007

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,38 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 09.11.16

Trinntid: 24 t

$w_0 = 34,0 \%$

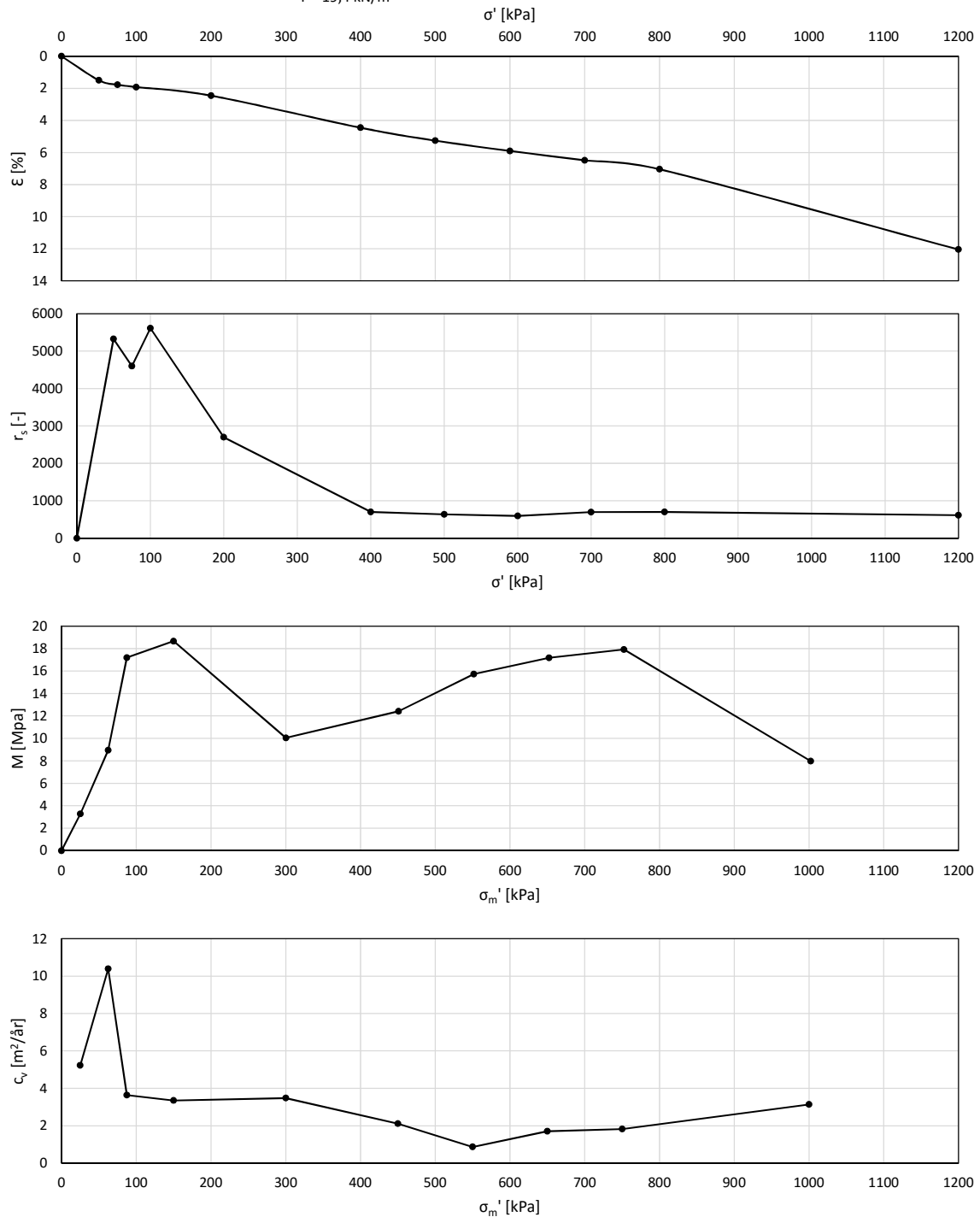
$\sigma'_{v0} = 127,4 \text{ kPa}$

$\gamma = 19,4 \text{ kN/m}^3$

$M_{oc} = 18,6 \text{ MPa}$

$m = 18,3$

$m/r_s = 0,035$



Figur A.22: Resultat fra IL-007

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-008

Blokk 4, Grongleire

Dybde: 10,23 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 19.11.16

Trinntid: 24 t

$w_0 = 32,1\%$

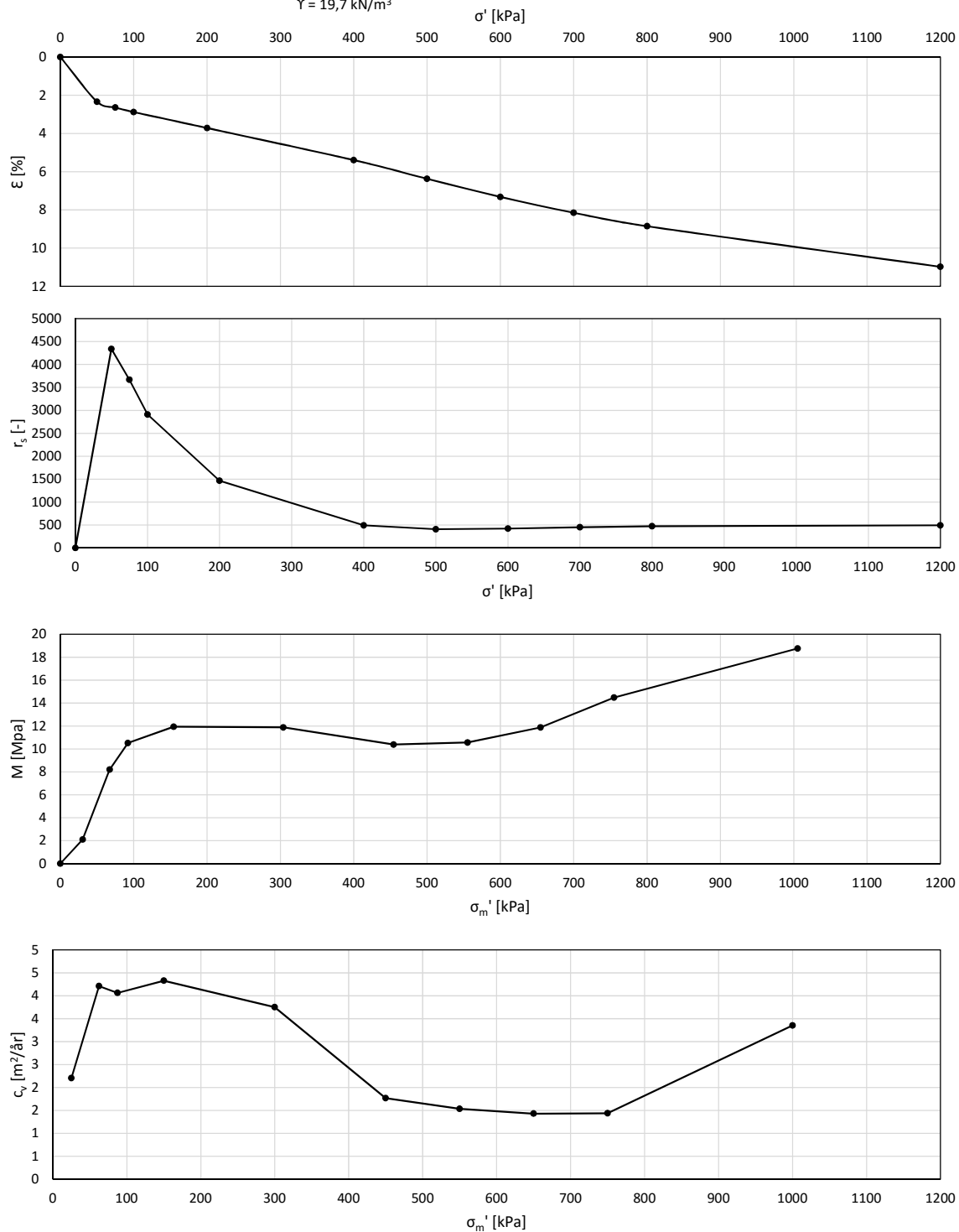
$\sigma'_{v0} = 135 \text{ kPa}$

$\gamma = 19,7 \text{ kN/m}^3$

$M_{oc} = 11,9 \text{ MPa}$

$m = 19,6$

$m/r_s = 0,040$



Figur A.23: Resultat fra IL-008

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-009

Blokk 5, Lillebyleire

Dybde: 8,41 m

Prøvetakingsdato: 23.11.16

Forsøksdato: 30.11.16

Trinntid: 24 t

$w_0 = 29,9\%$

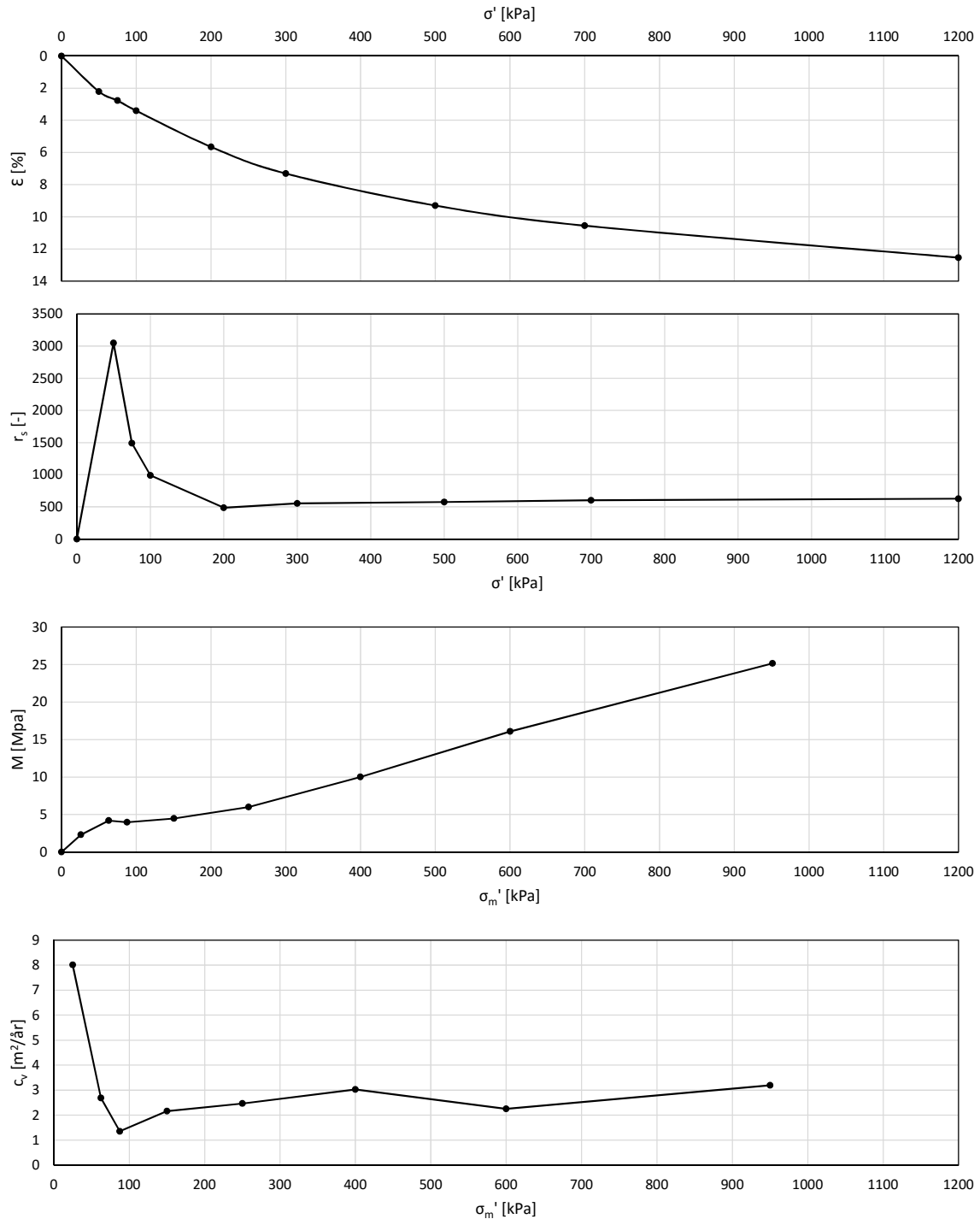
$\sigma'_{v0} = 140 \text{ kPa}$

$\gamma = 19,34 \text{ kN/m}^3$

$M_{OC} = 4,2 \text{ MPa}$

$m = 22,0$

$m/r_s = 0,039$



Figur A.24: Resultat fra IL-009

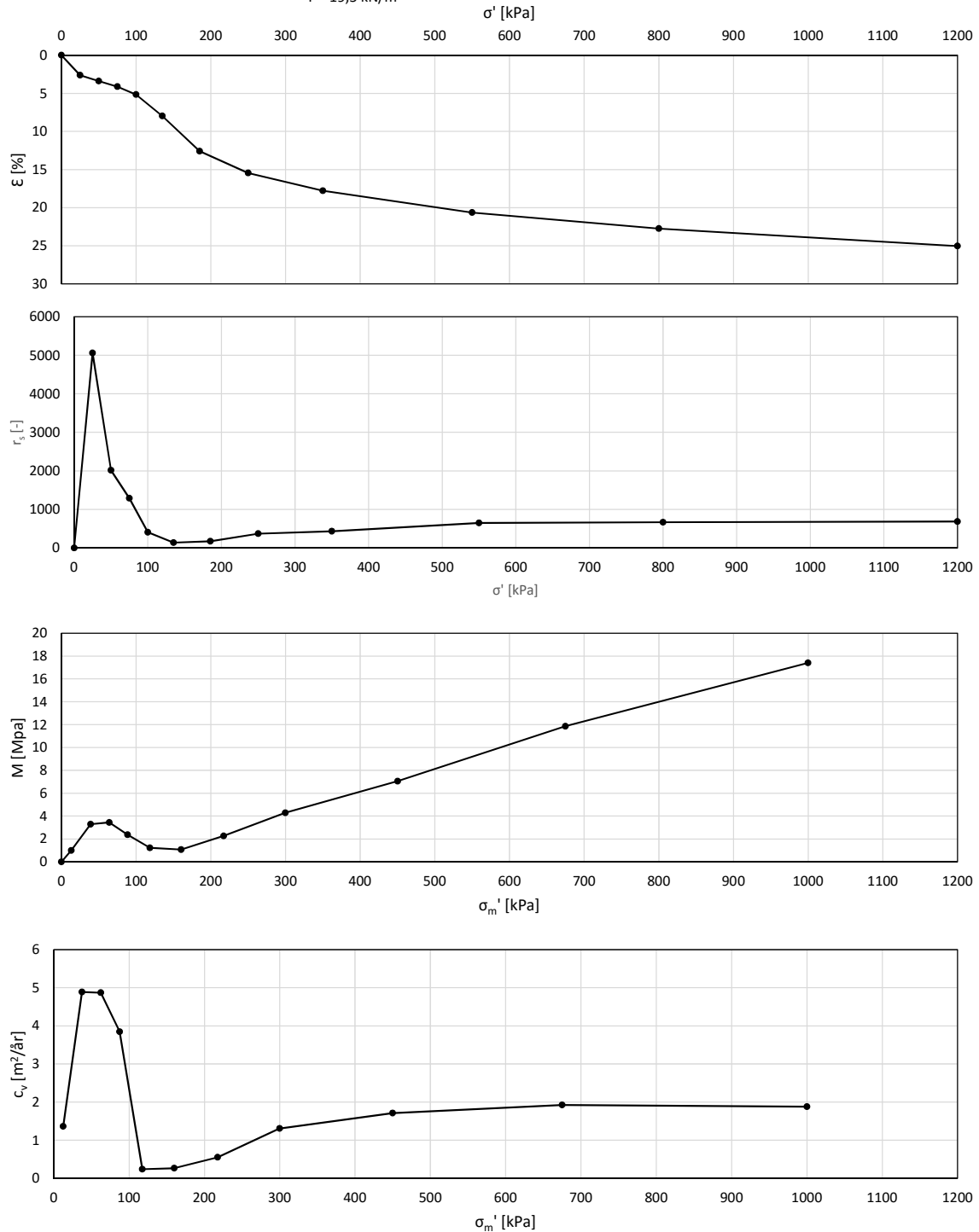
# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-010\*

Blokk ASG, Tillerleire  
 Dybde: 10,0 m  
 Prøvetakingsdato: 10.05.16  
 Forsøksdato: 25.06.16

Trinntid: 24 t  
 $w_0 = 38,5\%$   
 $\sigma'_{v0} = 98 \text{ kPa}$   
 $\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$

$M_{OC} = 3,4 \text{ MPa}$   
 $m = 20,8$   
 $m/r_s = 0,038$



Figur A.25: Resultat fra IL-010\*

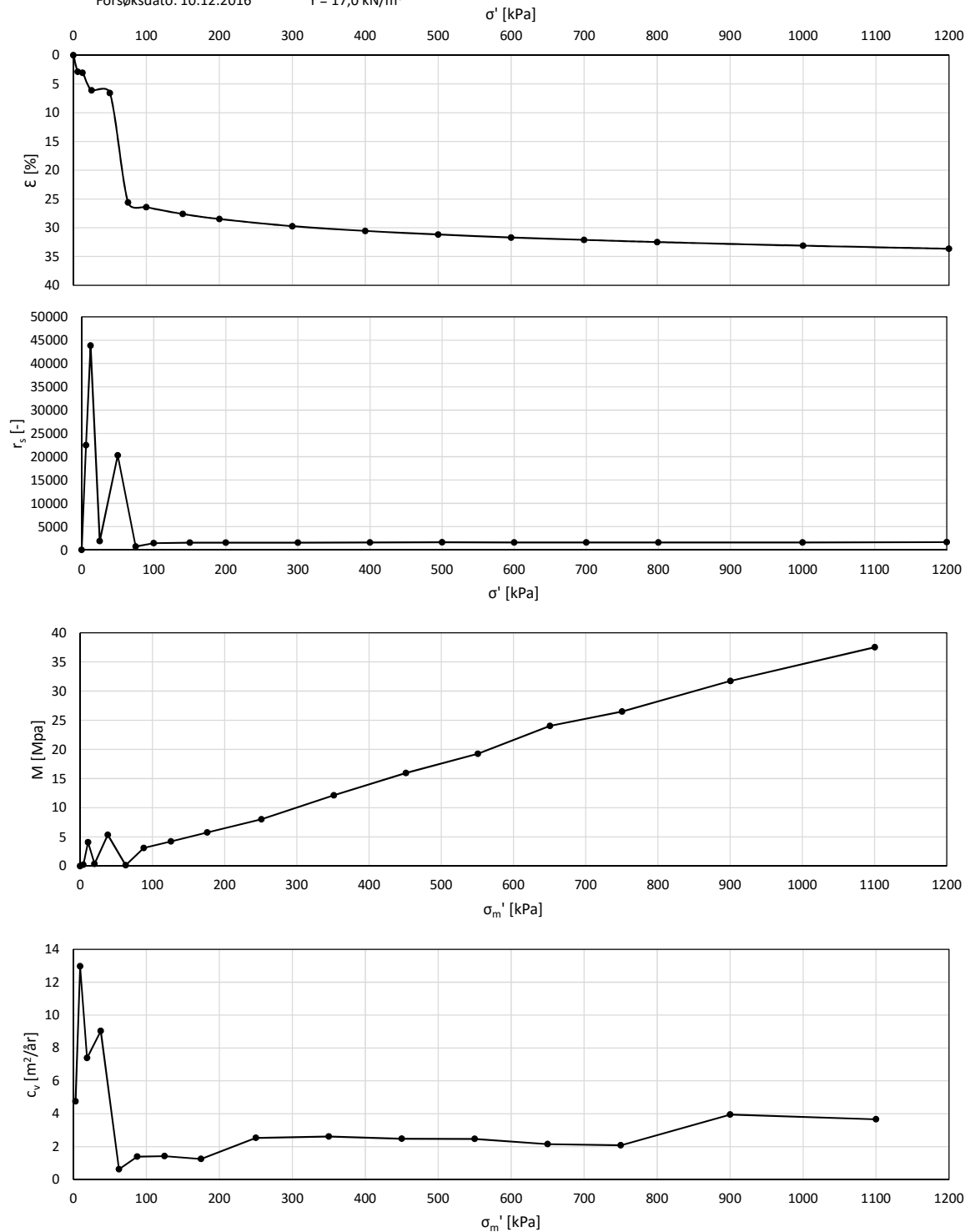
# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## IL-012

Omrørt og rekonsolidert  
leire fra Tiller  
Prøveåpning: 08.12.16  
Forsøksdato: 10.12.2016

Trinntid: 6 t  
 $w_0 = 51,1\%$   
 $\sigma'_{v0} = 12,0$  kPa  
 $\gamma = 17,0$  kN/m<sup>3</sup>

$M_{OC} = 5,4$  MPa  
 $m = 33,2$   
 $m/r_s = 0,017$



Figur A.26: Resultat fra IL-012

### **A.3 Krypforsøk**

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-101, Tillerleire

Blokk 1

Dybde: 6,55 m

Prøvetakingsdato: 16.08.16

Forsøksdato: 01.09.16

Kryptrinns ved 100 kPa

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 38,9\%$

$\sigma'_{v0} = 66,0 \text{ kPa}$

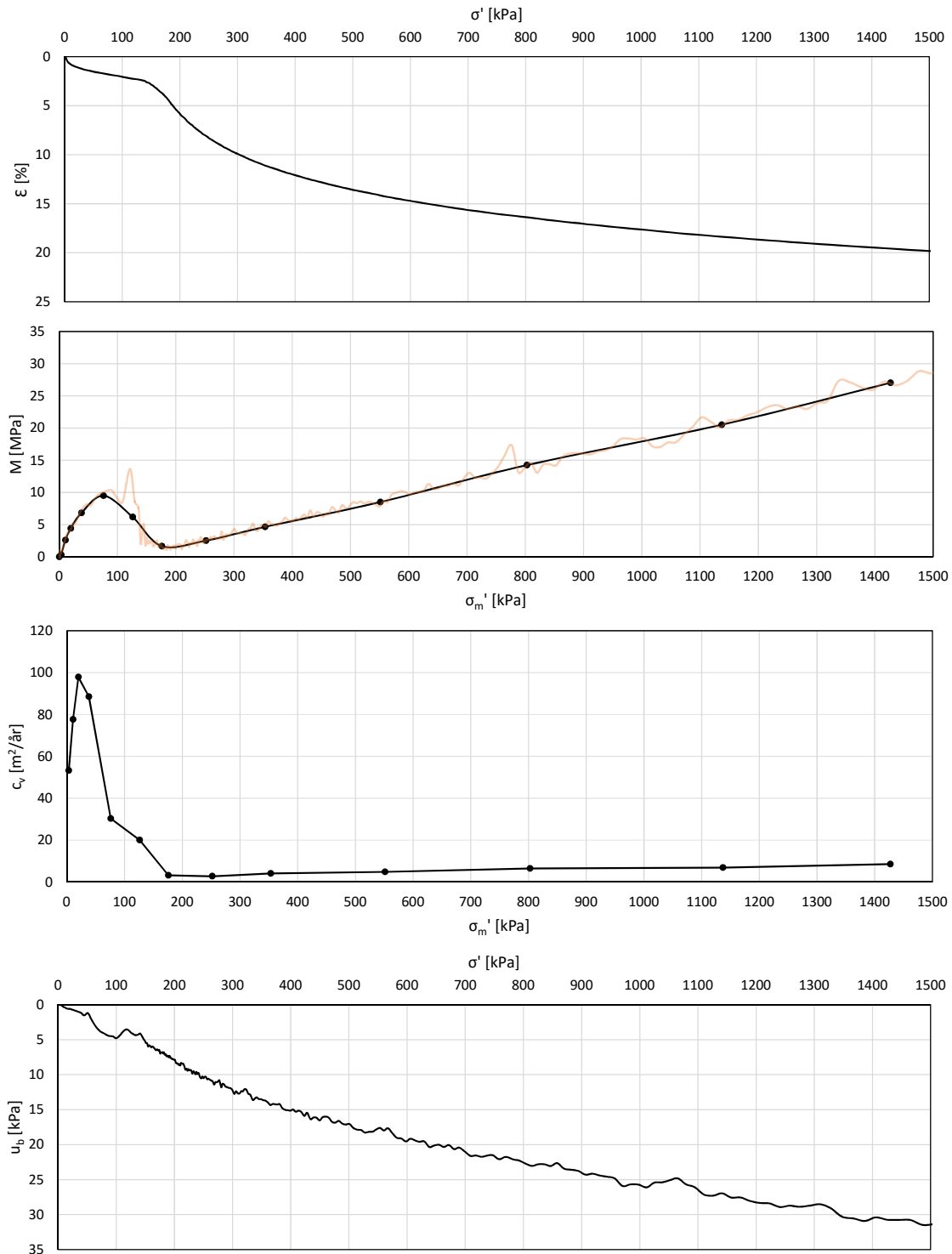
$\gamma = \text{kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 9,5 \text{ Mpa}$

$m = 20,4$

$r_s = 7000$

$m_{sel}/r_s = 0,036$  (valgt)



Figur A.27: Resultat fra CRS-101

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-102.2

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,55 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 30.09.16

Krypstrinn ved 200 kPa

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 34,9\%$

$\sigma'_{v0} = 57,0$  kPa

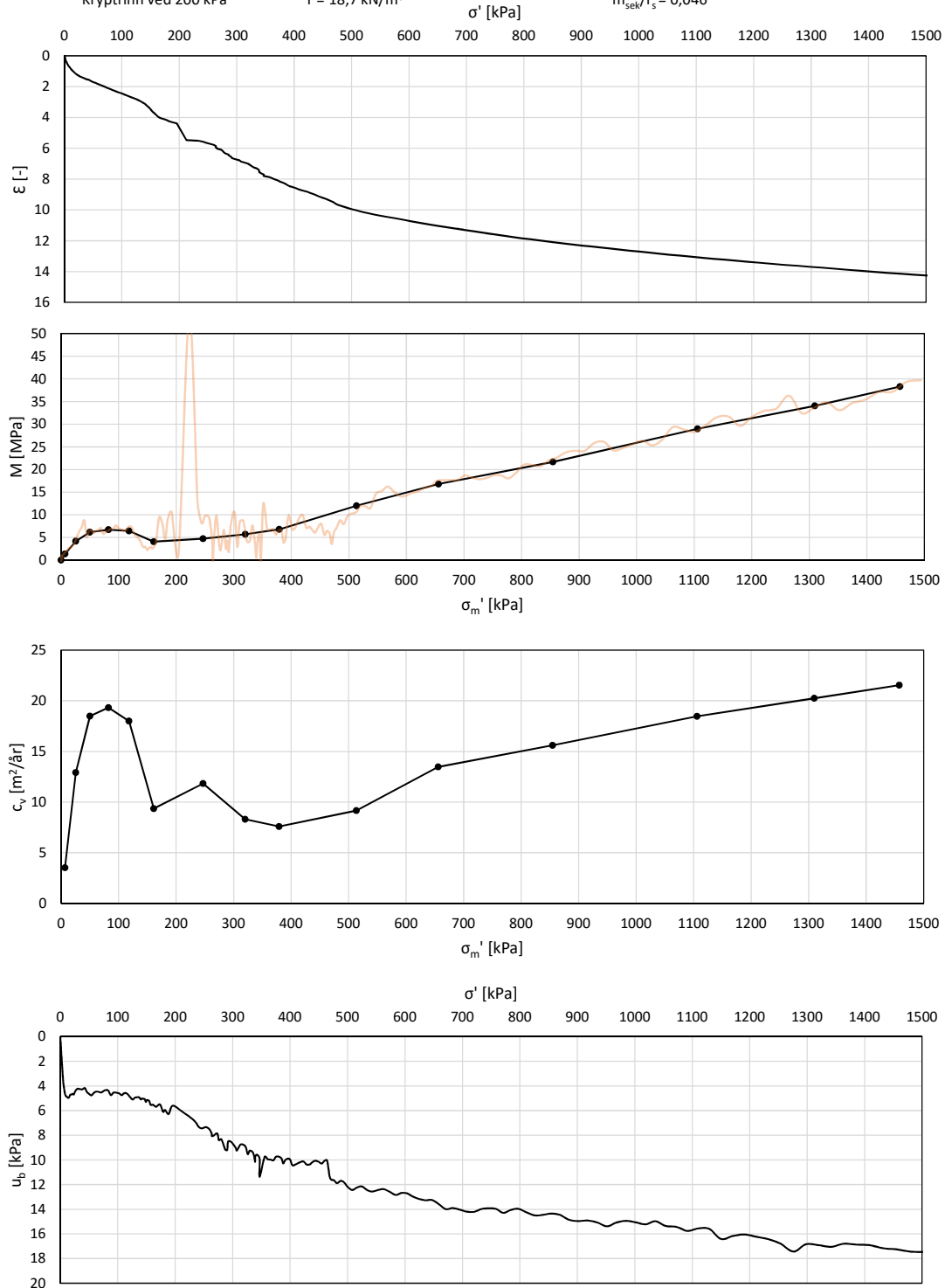
$\gamma = 18,7$  kN/m<sup>3</sup>

$M_{OC} = 6,9$  Mpa

$m = 25,0$

$r_s = 417$

$m_{sek}/r_s = 0,046$



Figur A.28: Resultat fra CRS-102.2



# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-103.2

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,60 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 07.10.16

Krypstrinn ved 200 kPa

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 36,0\%$

$\sigma'_{v0} = 57,4\text{ kPa}$

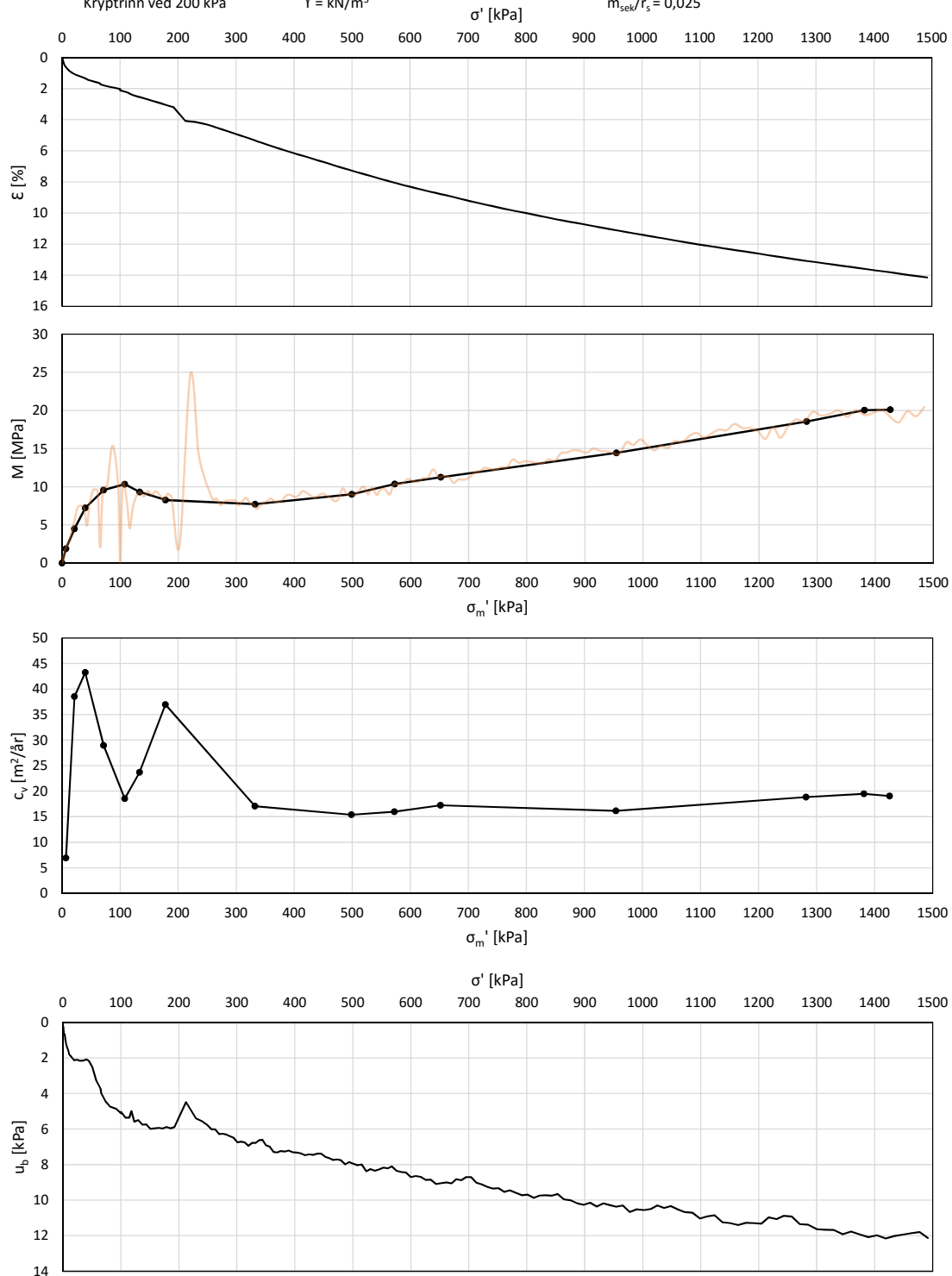
$\gamma = \text{kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 10,3\text{ MPa}$

$m = 11,9$

$r_s = 725$

$m_{sel}/r_s = 0,025$



Figur A.29: Resultat fra CRS-103.2

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-104.2

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,65 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 31.10.16

Kryptritt ved 200 kPa

Tøyningshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 35,6\%$

$\sigma'_{v0} = 57,9 \text{ kPa}$

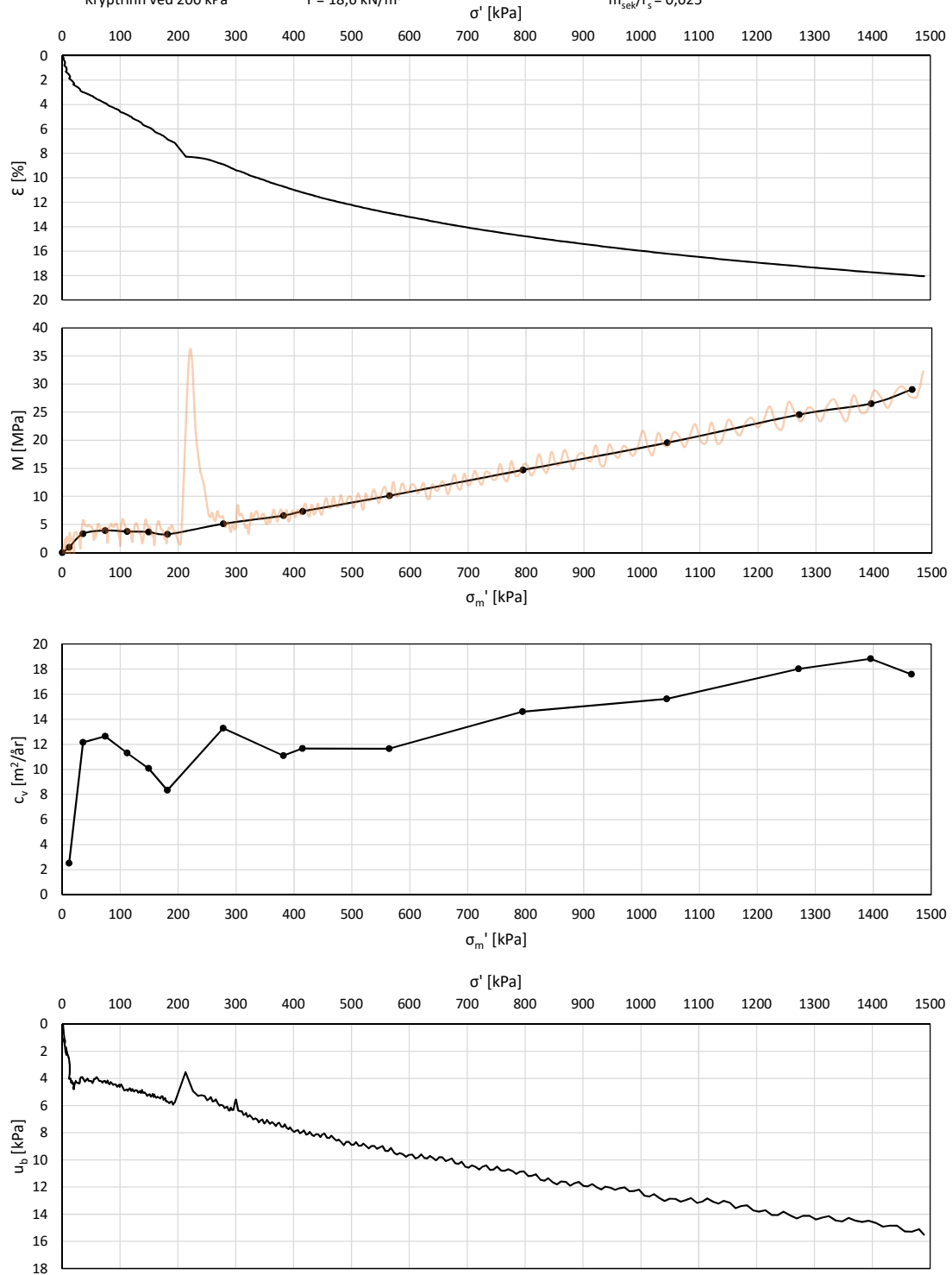
$\gamma = 18,6 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 4,0 \text{ MPa}$

$m = 20,8$

$r_s = 708$

$m_{sek}/r_s = 0,025$



Figur A.30: Resultat fra CRS-104.2

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-105.2

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,33 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 17.11

Krypstrinn ved 750 kPa

Tøyningshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 30,9\%$

$\sigma'_{v0} = 127 \text{ kPa}$

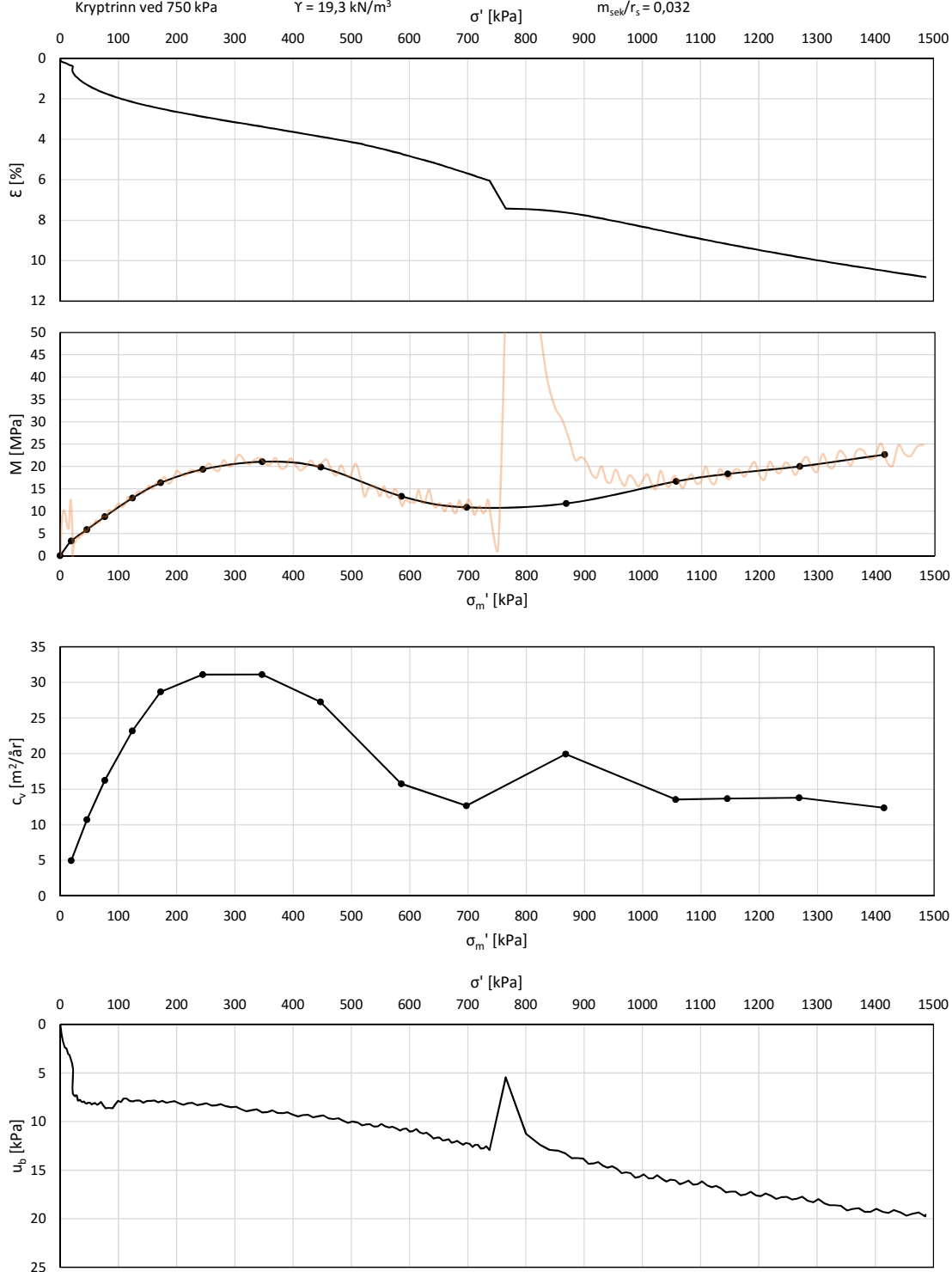
$\gamma = 19,3 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 21,9 \text{ MPa}$

$m = 20$

$r_s = 424$

$m_{sek}/r_s = 0,032$



Figur A.31: Resultat fra CRS-105.2

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-106

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,28 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 02.11.16

Krypstrinn ved 700 kPa

Tøyningshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 33,8 \%$

$\sigma'_{v0} = 126,5 \text{ kPa}$

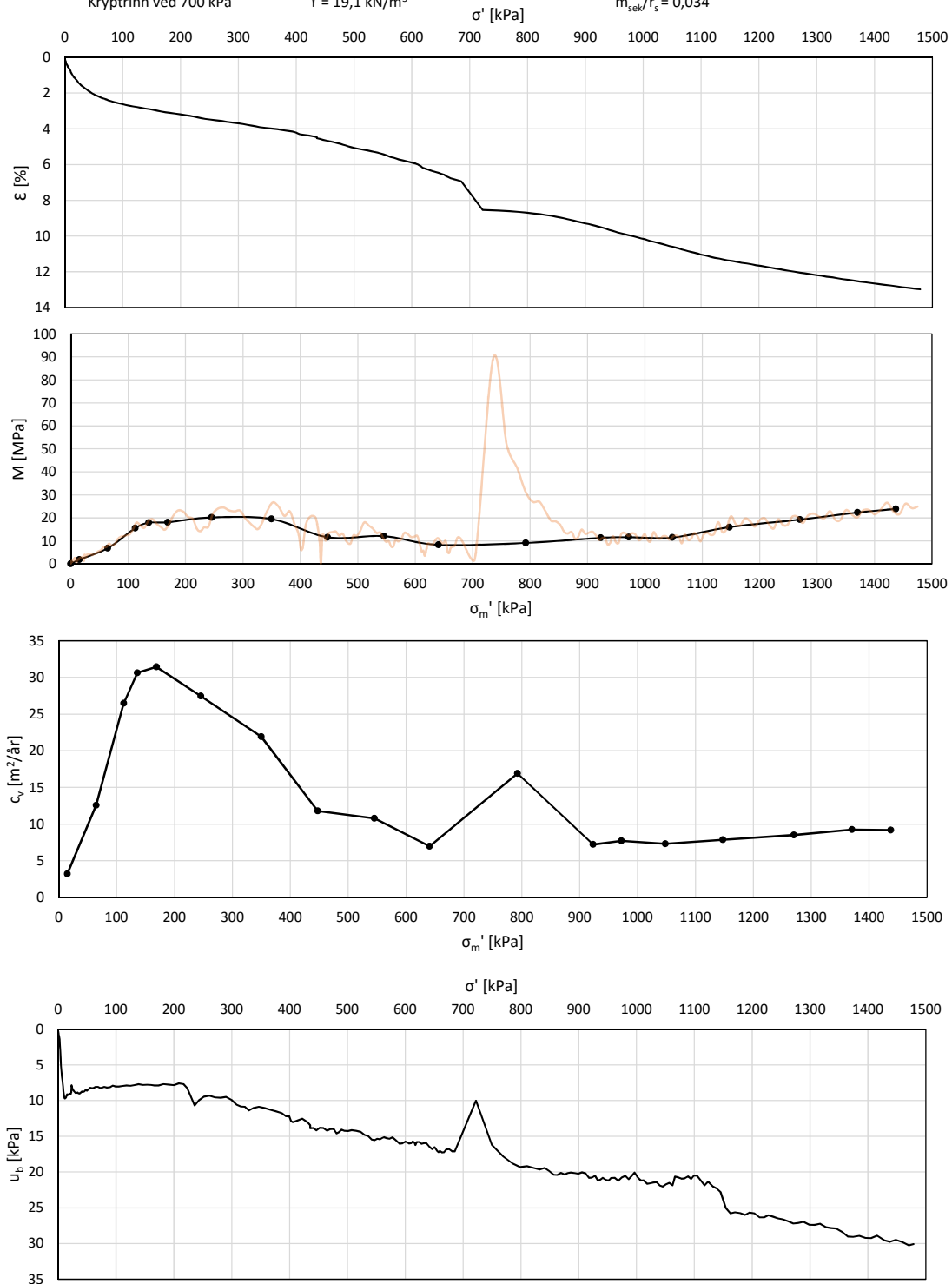
$\gamma = 19,1 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 21,0 \text{ MPa}$

$m = 20,3$

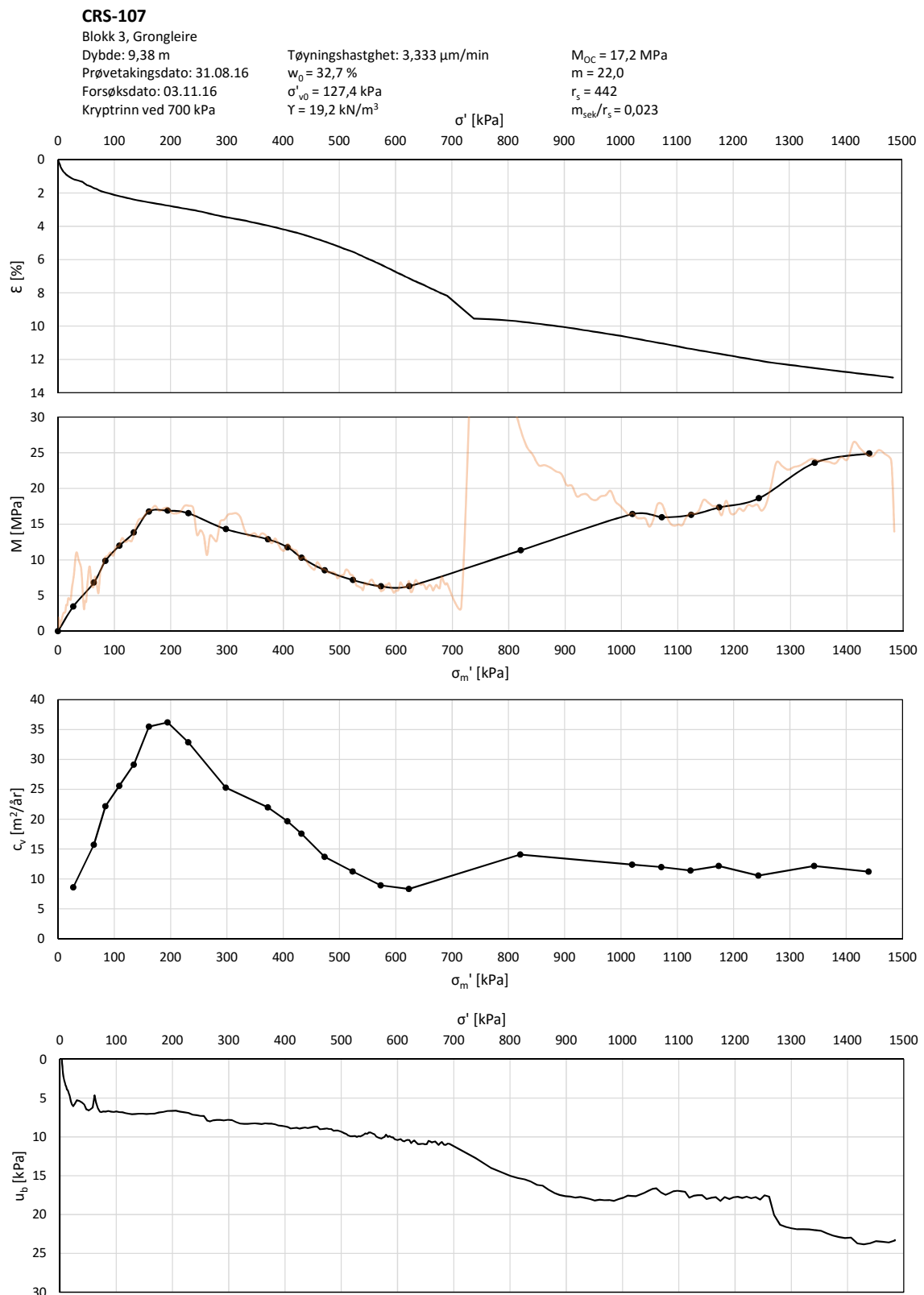
$r_s = 336$

$m_{sek}/r_s = 0,034$



Figur A.32: Resultat fra CRS-106

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.33: Resultat fra CRS-107

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-108

Blokk 4, Grongleire

Dybde: 10,23 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 19.11.16

Krypstrinn ved 700 kPa

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 30,0$

$\sigma'_{v0} = 135 \text{ kPa}$

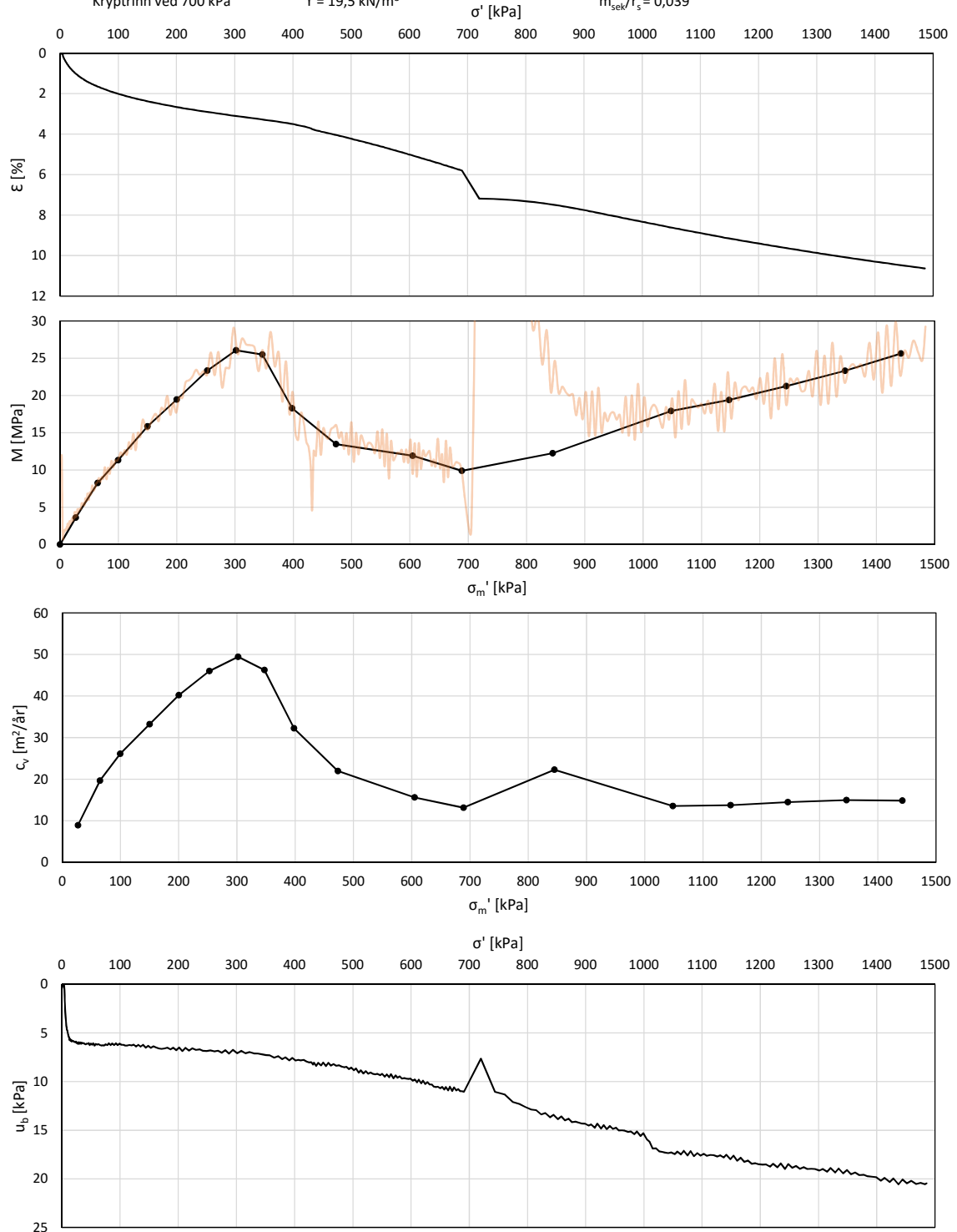
$\gamma = 19,5 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 25,5 \text{ MPa}$

$m = 19,4$

$r_s = 338$

$m_{sek}/r_s = 0,039$



Figur A.34: Resultat fra CRS-108

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-109

Blokk 5, Lillebyleire

Dybde: 8,41 m

Prøvetakingsdato: 23.11.16

Forsøksdato: 28.11.16

Krypstrinn ved 200 kPa

Tøyningshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 29,6\%$

$\sigma'_{v0} = 140 \text{ kPa}$

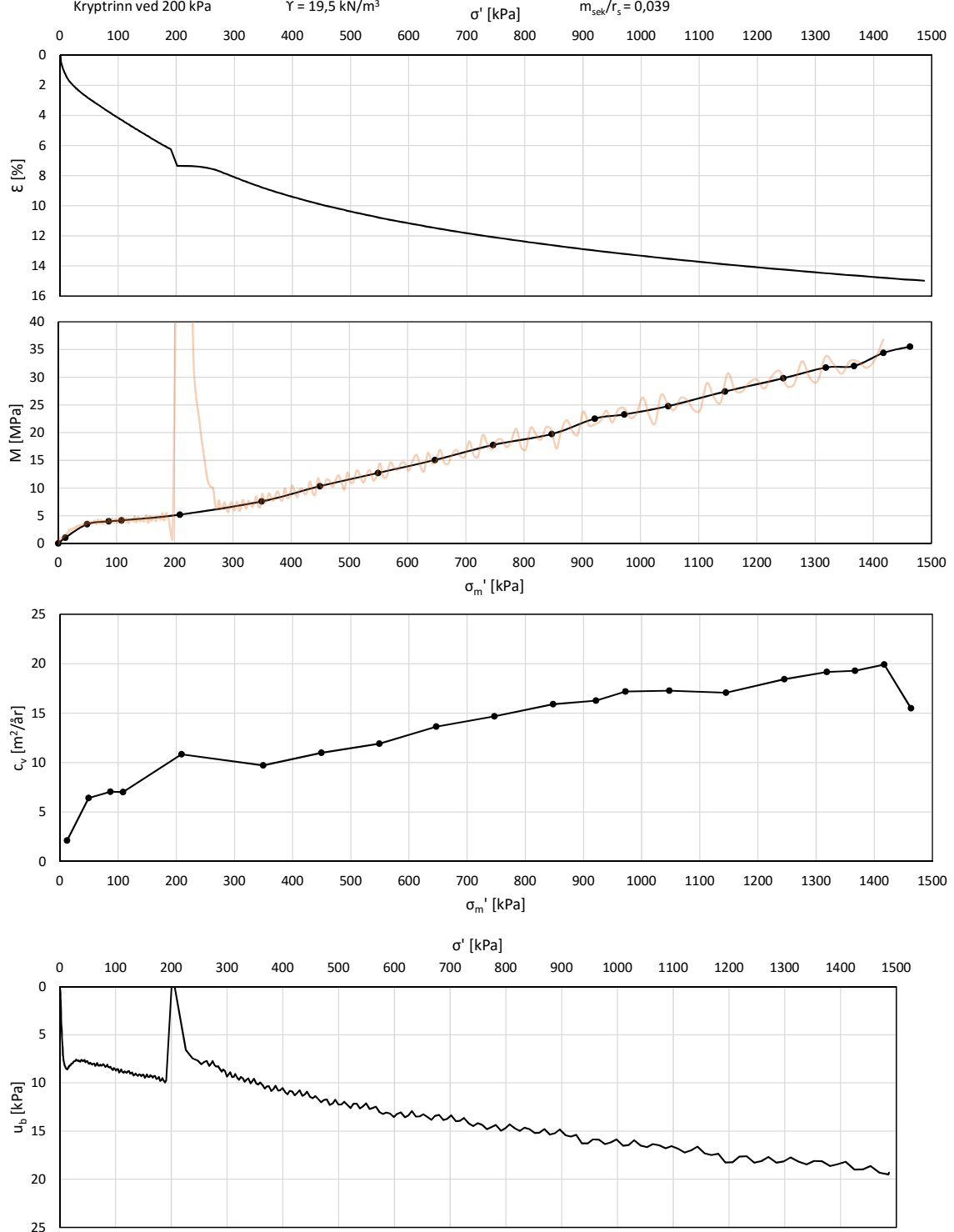
$\gamma = 19,5 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 4,0 \text{ MPa}$

$m = 25,0$

$r_s = 635$

$m_{sek}/r_s = 0,039$



Figur A.35: Resultat fra CRS-109

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-110\*

Blokk ASG, Tillerleire

Dybde: 9,7 m

Prøvetakingsdato: 10.05.16

Forsøksdato: 25.05.16

Kryptrinn ved 1200 kPa

Tøyningshastghet: 2,000  $\mu\text{m}/\text{min}$

$w_0 = 38,5\%$

$\sigma'_{v0} = 95,2 \text{ kPa}$

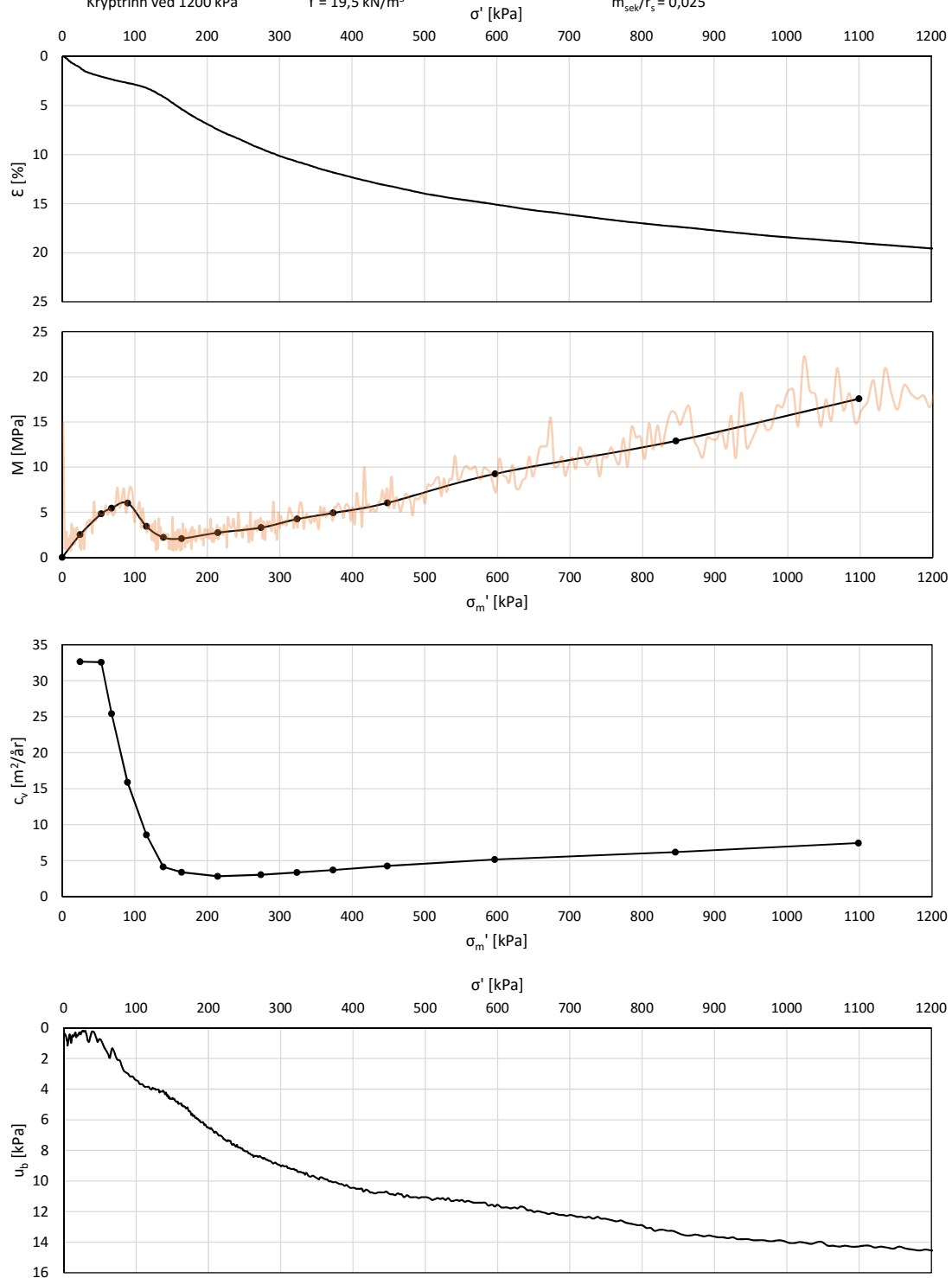
$\gamma = 19,5 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 6,5 \text{ MPa}$

$m = 17,4$

$r_s = 640$

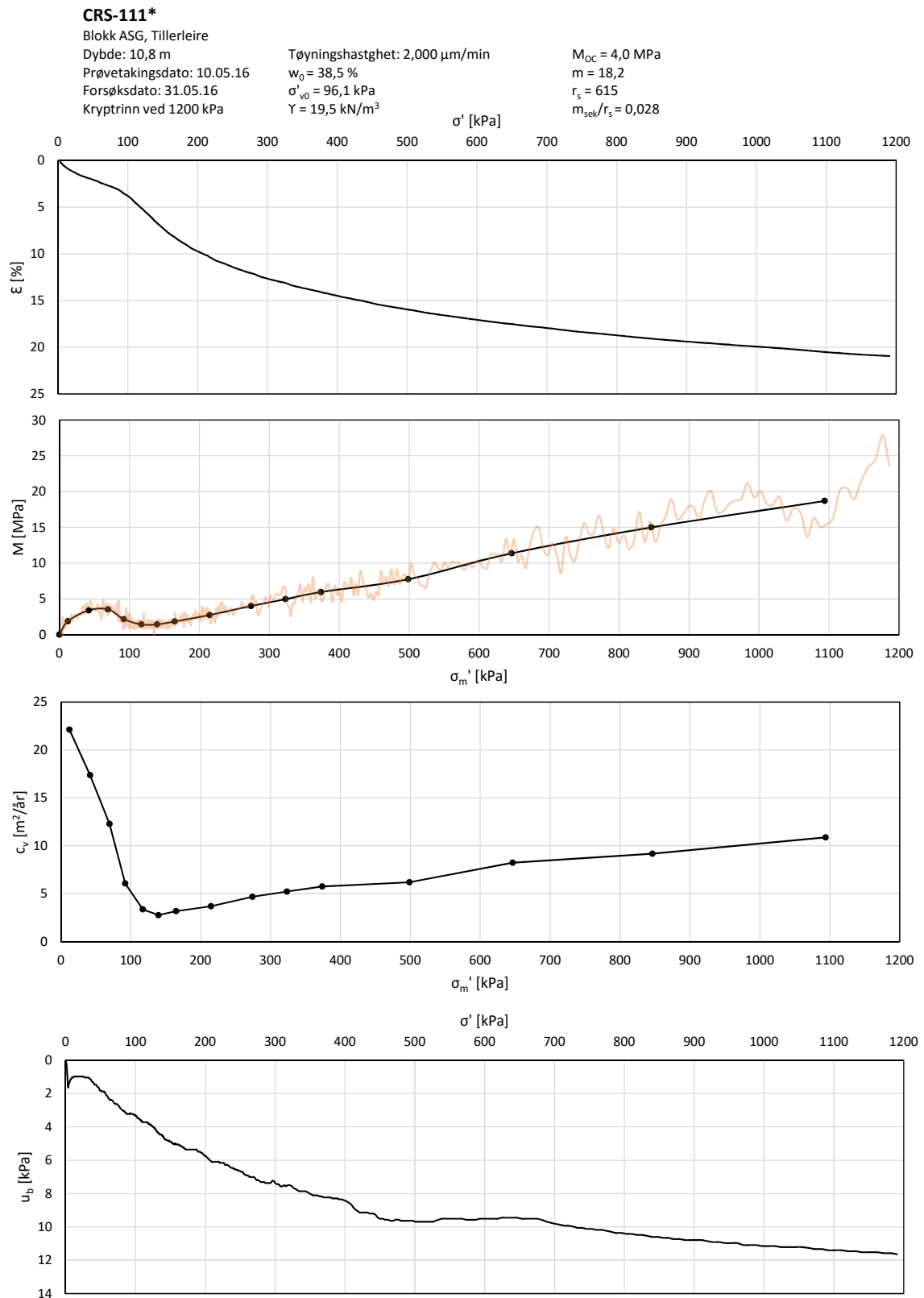
$m_{sek}/r_s = 0,025$



Figur A.36: Resultat fra CRS-110\*



# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.37: Resultat fra CRS-111\*

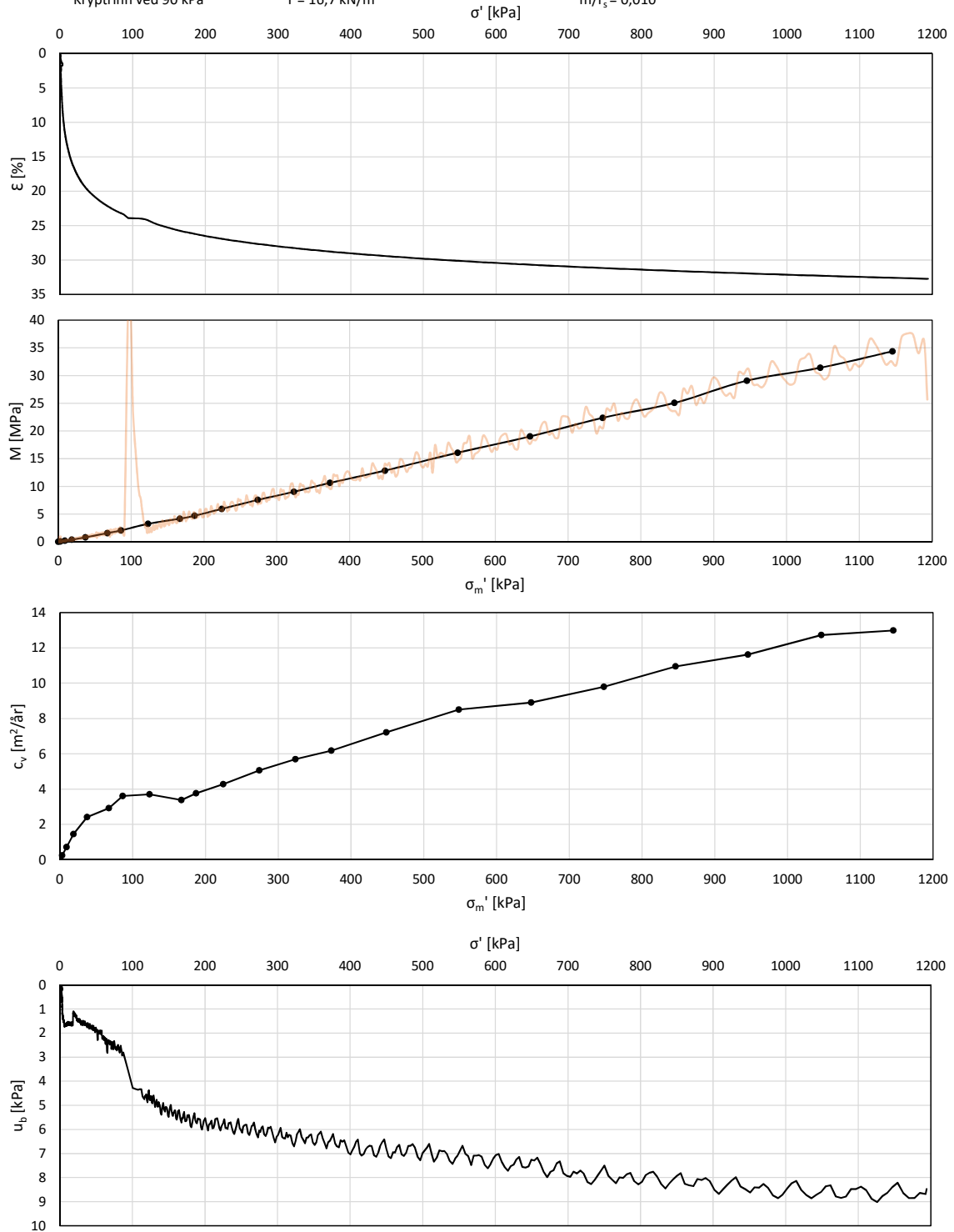
# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-112

Omrørt og rekonsolidert  
leire fra Tiller  
Prøveåpning: 08.12.16  
Forsøksdato: 08.12.16  
Krypstrinn ved 90 kPa

Tøyingshastighet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$   
 $w_0 = 48,5$   
 $\sigma'_{v0} = 12,0 \text{ kPa}$   
 $\gamma = 16,7 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{OC} = 0 \text{ MPa}$   
 $m = 30,0$   
 $r_s = 2680$   
 $m/r_s = 0,010$



Figur A.38: Resultat fra CRS-112

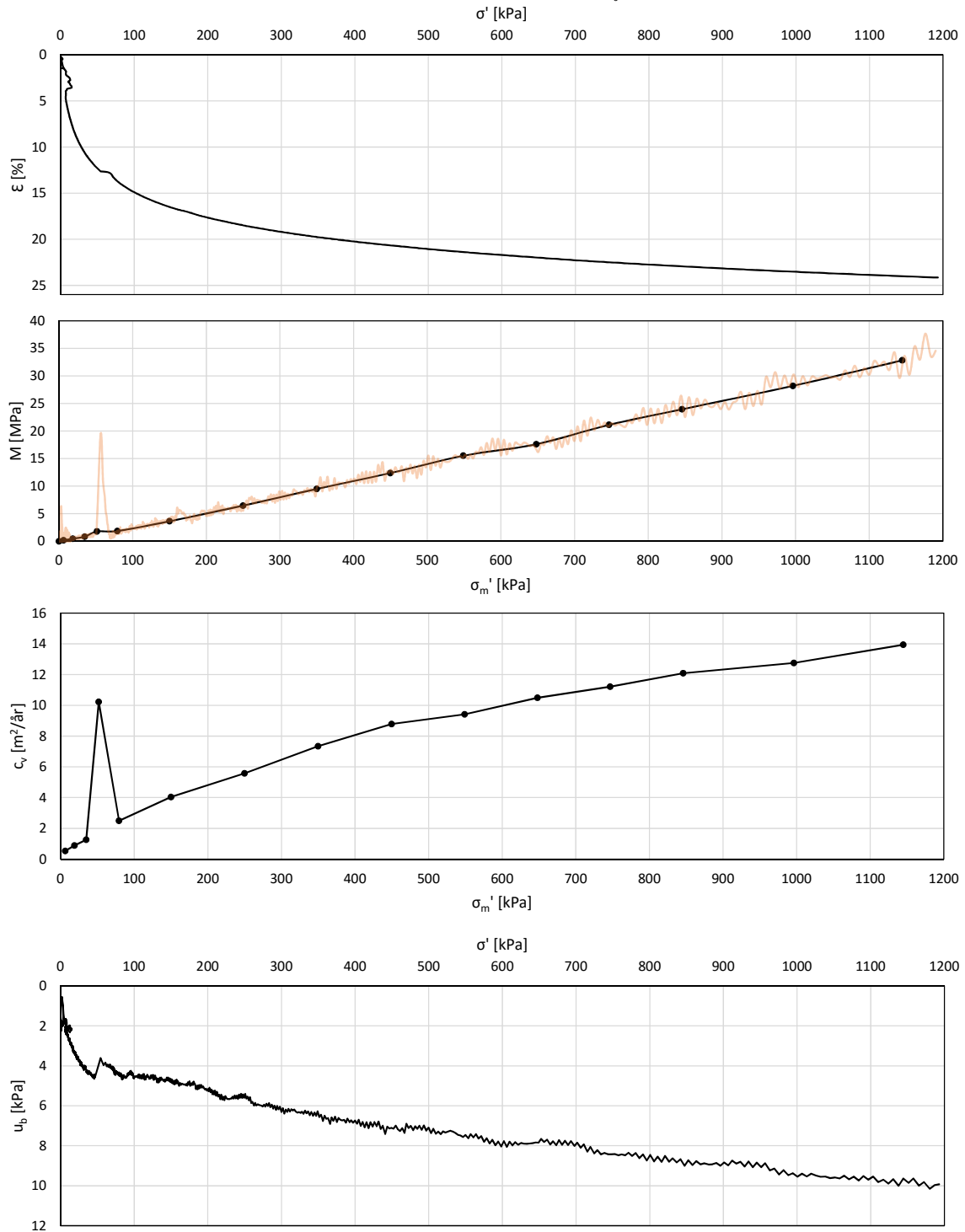
# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-112.2

Omrørt og rekonsolidert  
leire fra Tiller  
Prøveåpning: 08.12.16  
Forsøksdato: 10.12.16  
Kryptrinn ved 50 kPa

Tøyningshastghet: 1,667  $\mu\text{m}/\text{min}$   
 $w_0 = 40,0\%$   
 $\sigma'_{v0} = 12,0 \text{ kPa}$   
 $\gamma = 18,1 \text{ kN}/\text{m}^3$

$M_{oc} = 0 \text{ MPa}$   
 $m = 29,0$   
 $r_s = 2364$   
 $m/r_s = 0,015$



Figur A.39: Resultat fra CRS-112.2

## **A.4 CRS-forsøk med variert tøyningshastighet**

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-1001

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,7 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 04.11.16

Tøyningshastighet 1: 4  $\mu\text{m}/\text{min}$

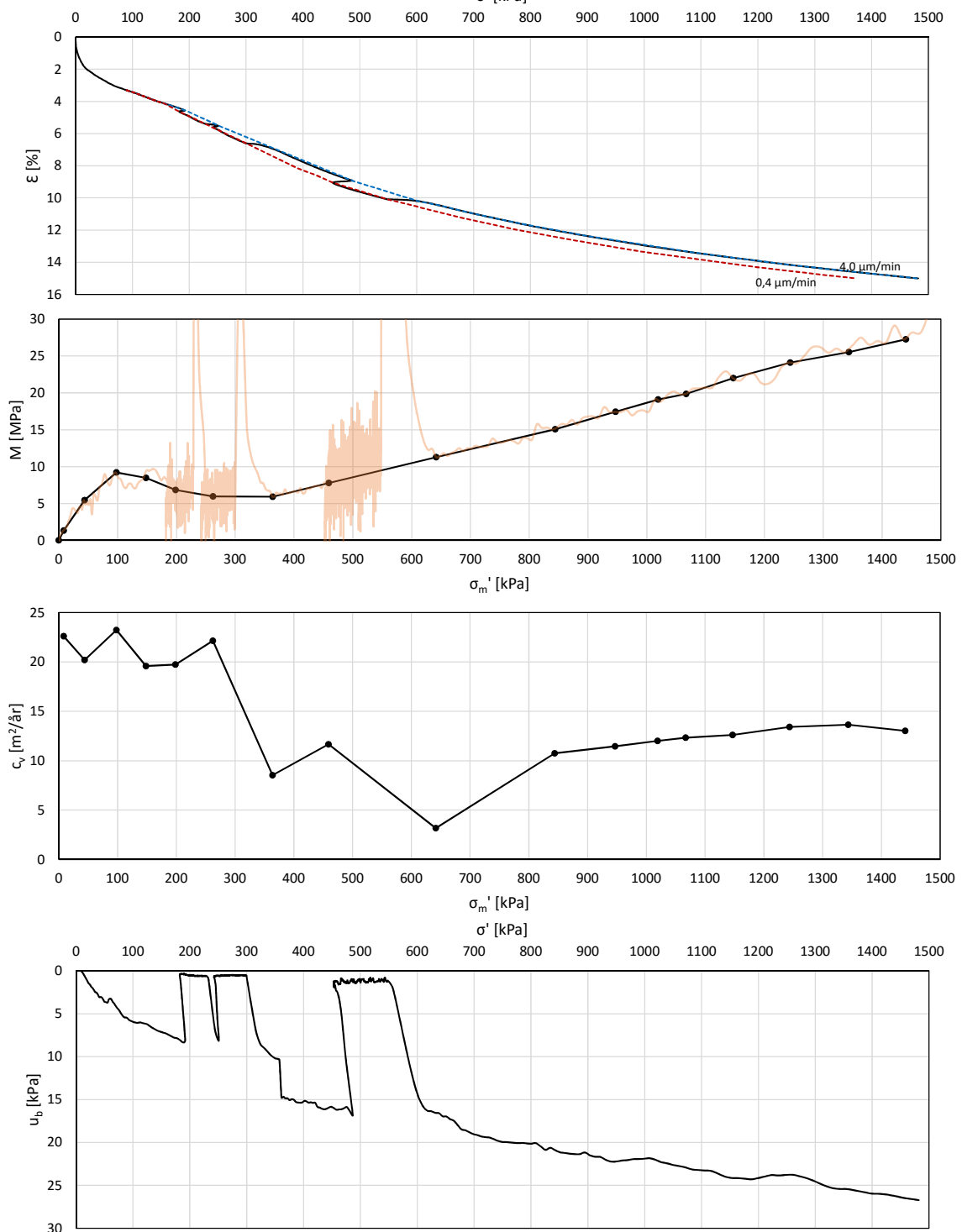
Tøyningshastighet 2: 0,4  $\mu\text{m}/\text{min}$

$\sigma'_{v0} = 58,3 \text{ kPa}$

$M_{oc} = 9,2 \text{ MPa}$

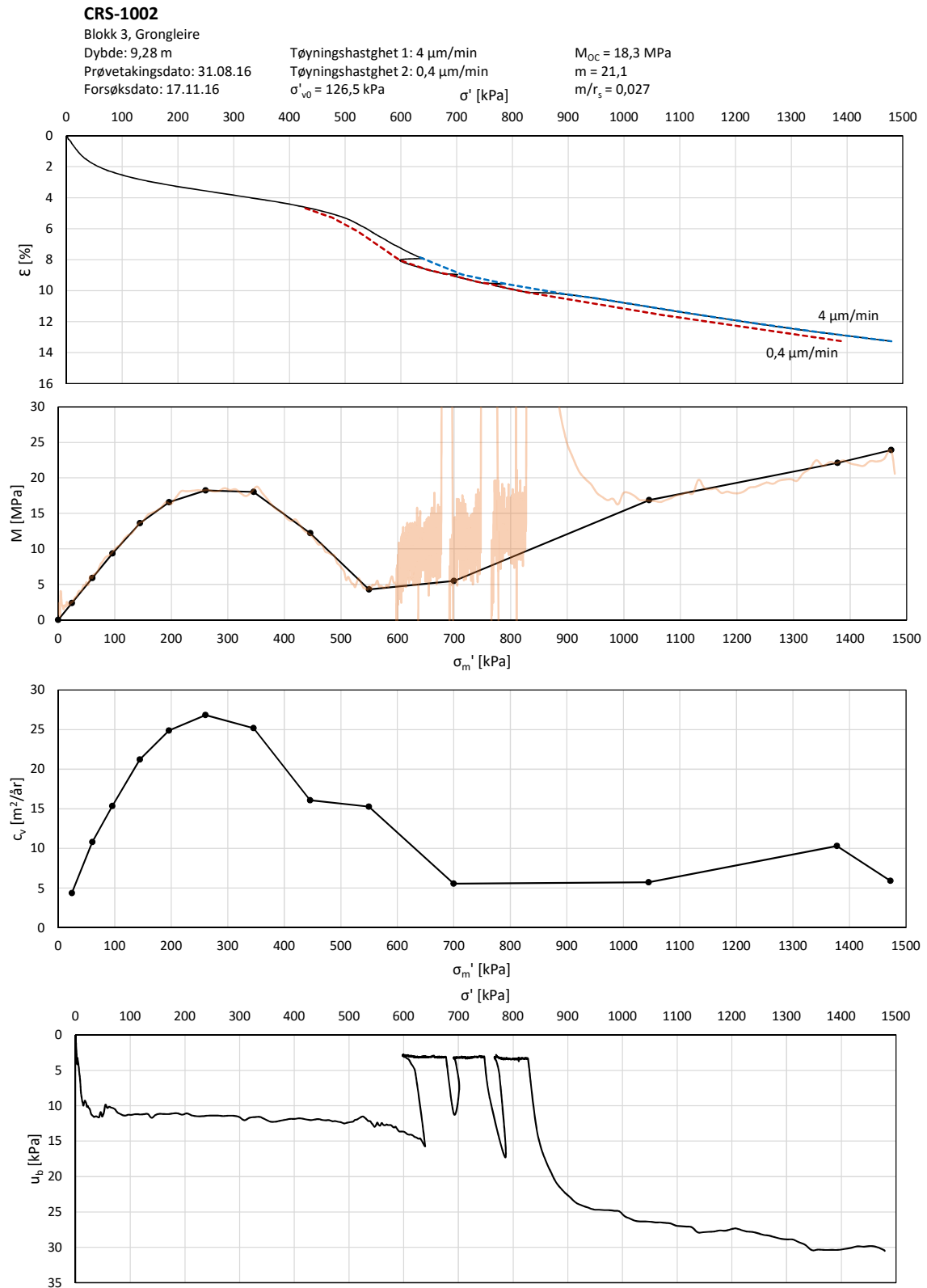
$m = 22,0$

$m/r_s = 0,027$



Figur A.40: Resultat fra CRS-1001

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.41: Resultat fra CRS-1002

## **A.5 CRS-forsøk**

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-001

Blokk 1, Tillerleire

Dybde: 6,55 m

Prøvetakingsdato: 16.08.16

Forsøksdato: 01.09.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

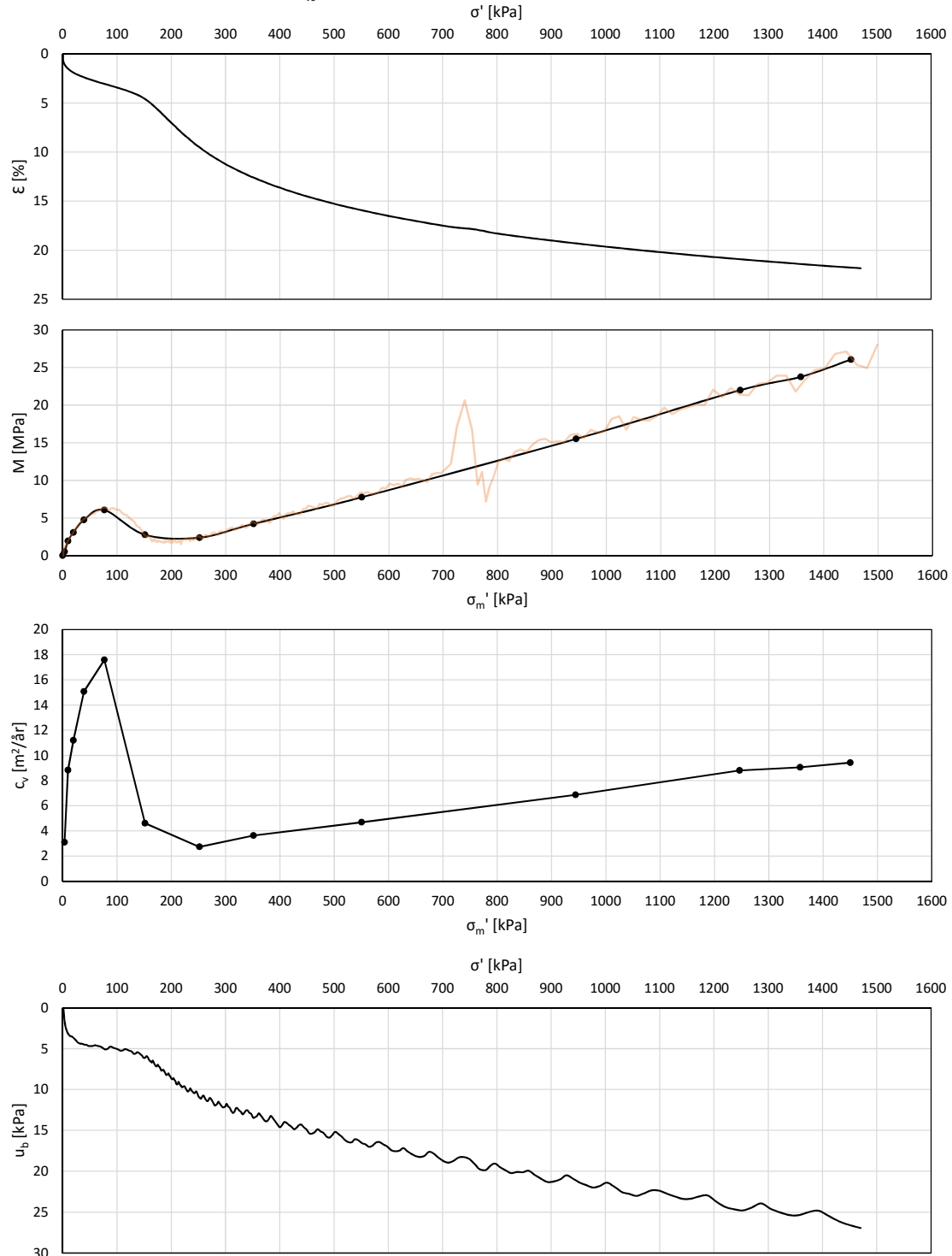
$w_0 = 41,9\%$

$\sigma'_{v0} = 66,0 \text{ kPa}$

$M_{OC} = 4,7 \text{ Mpa}$

$m = 19,7$

$\gamma = 18,0 \text{ kN}/\text{m}^3$



Figur A.42: Resultat fra CRS-001



VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

**CRS-002**

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,55 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 15.09.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

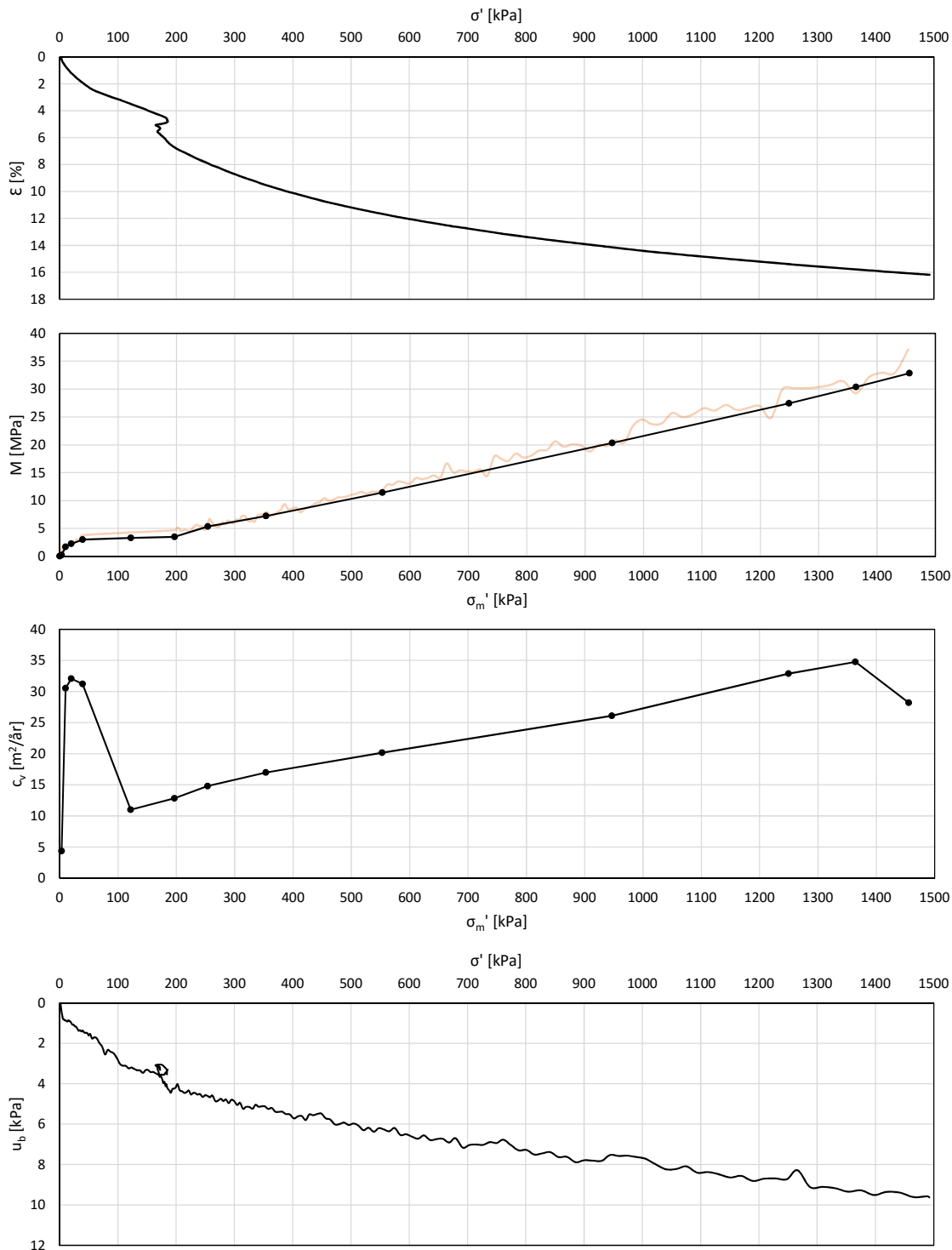
$w_0 = 32,3\%$

$\sigma'_{v0} = 57,0 \text{ kPa}$

$M_{OC} = 3,3 \text{ MPa}$

$m = 22,3$

$\gamma = 19,0 \text{ kN}/\text{m}^3$



Figur A.43: Resultat fra CRS-002

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-004

Blokk 2, Tillerleire

Dybde: 5,65 m

Prøvetakingsdato: 09.05.16

Forsøksdato: 31.10.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

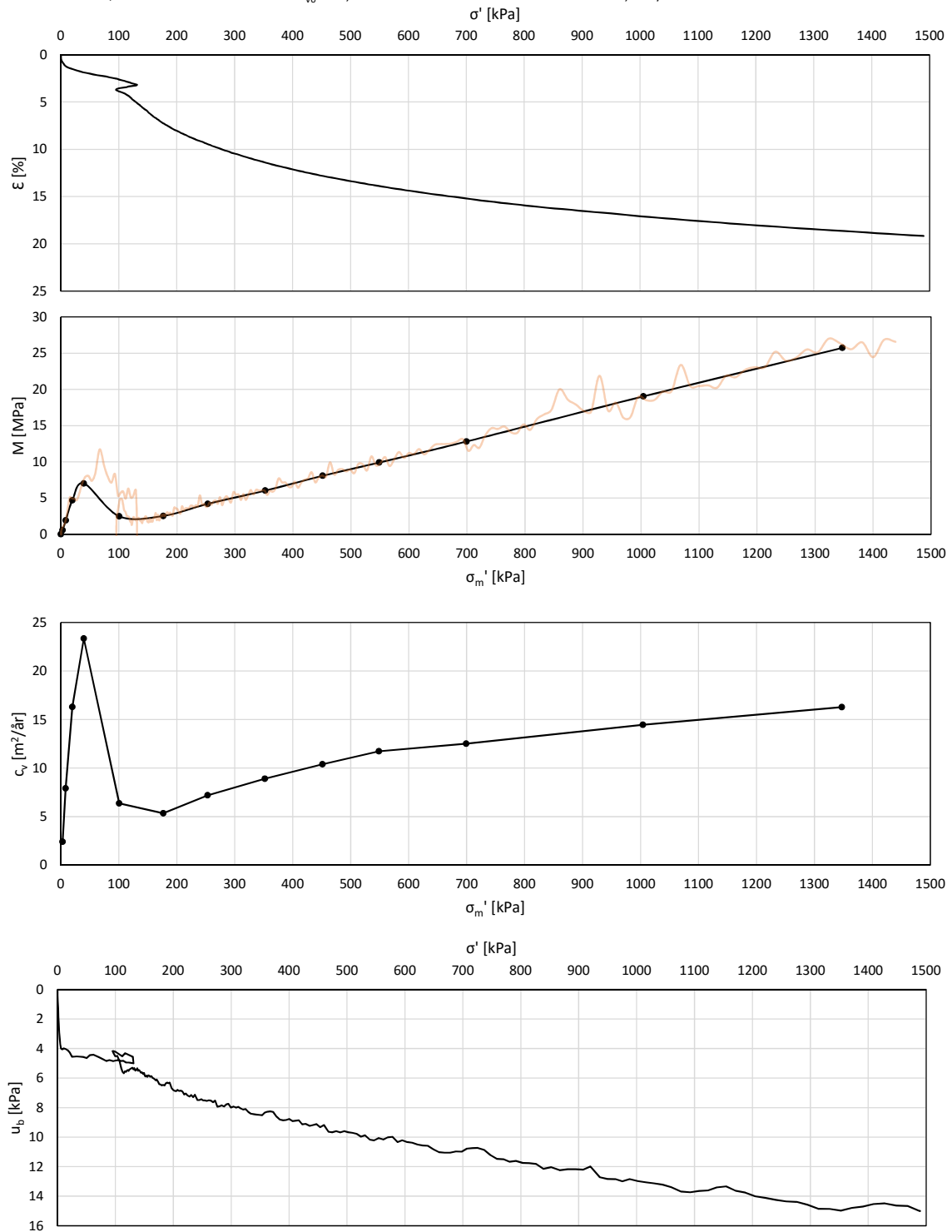
$w_0 = 38,2\%$

$\sigma'_{v0} = 57,9 \text{ kPa}$

$M_{OC} = 7,0 \text{ MPa}$

$m = 20,0$

$\gamma = 18,3 \text{ kN}/\text{m}^3$



Figur A.44: Resultat fra CRS-004

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-005

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,33 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 21.10.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

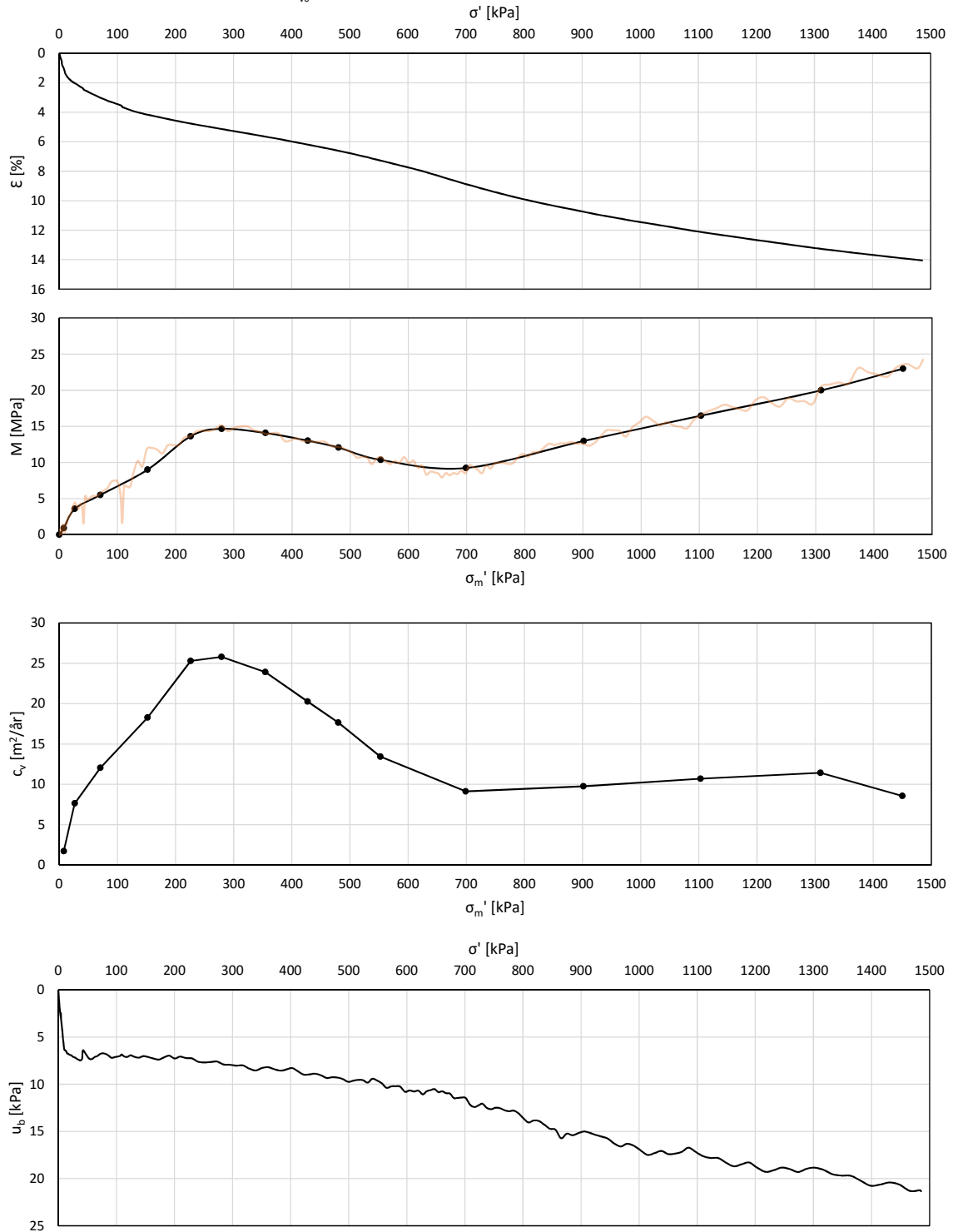
$w_0 = 32,3 \%$

$\sigma'_{v0} = 127 \text{ kPa}$

$M_{oc} = 15,1 \text{ MPa}$

$m = 18,0$

$\gamma = 19,2 \text{ kN}/\text{m}^3$



Figur A.45: Resultat fra CRS-005

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-006

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,28 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 01.11.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

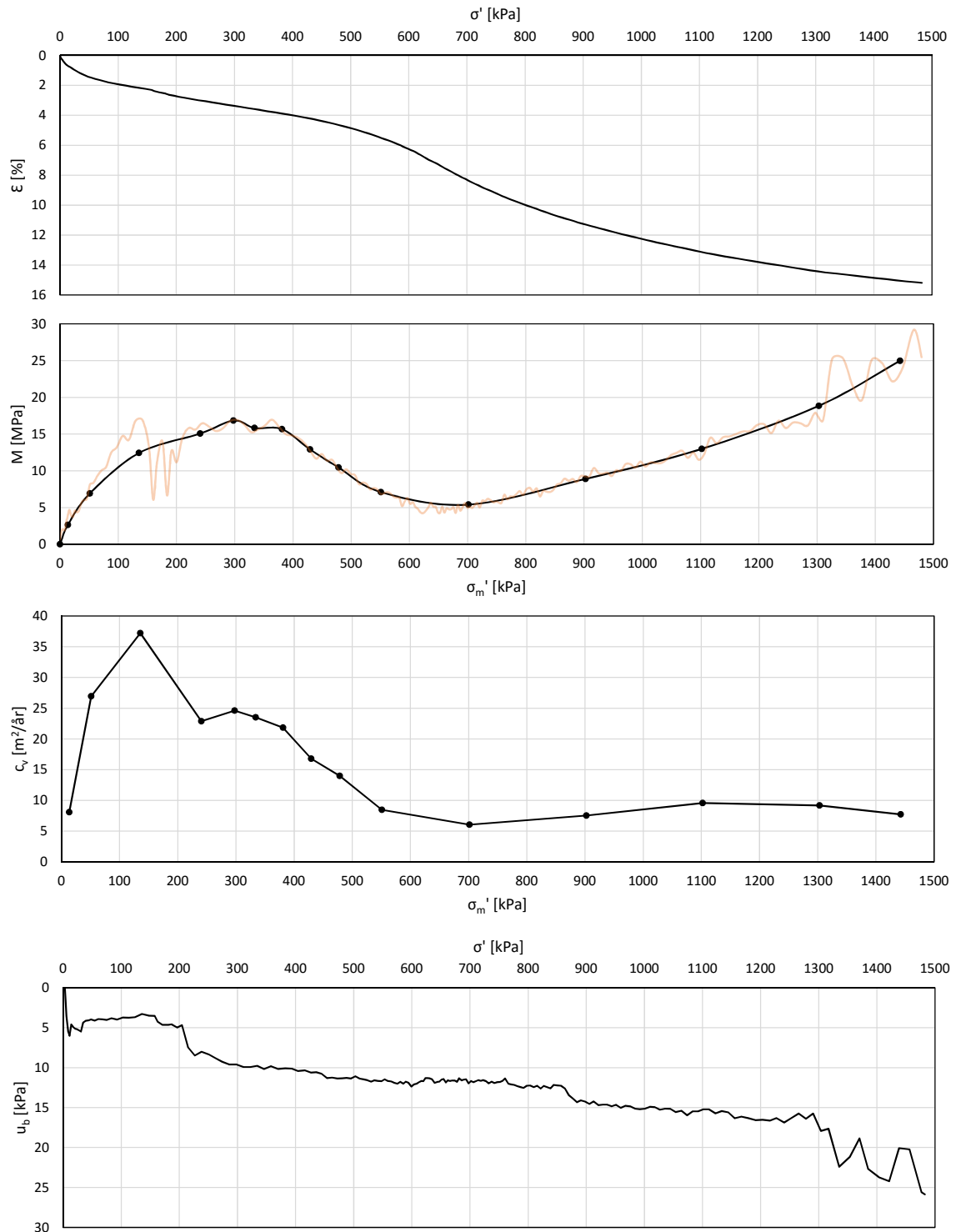
$w_0 = 34,6\%$

$\sigma'_{v0} = 126,5 \text{ kPa}$

$M_{OC} = 16,9 \text{ MPa}$

$m = 24,0$

$\gamma = 19,0 \text{ kN}/\text{m}^3$



Figur A.46: Resultat fra CRS-006

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-007

Blokk 3, Grongleire

Dybde: 9,38 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 02.11.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

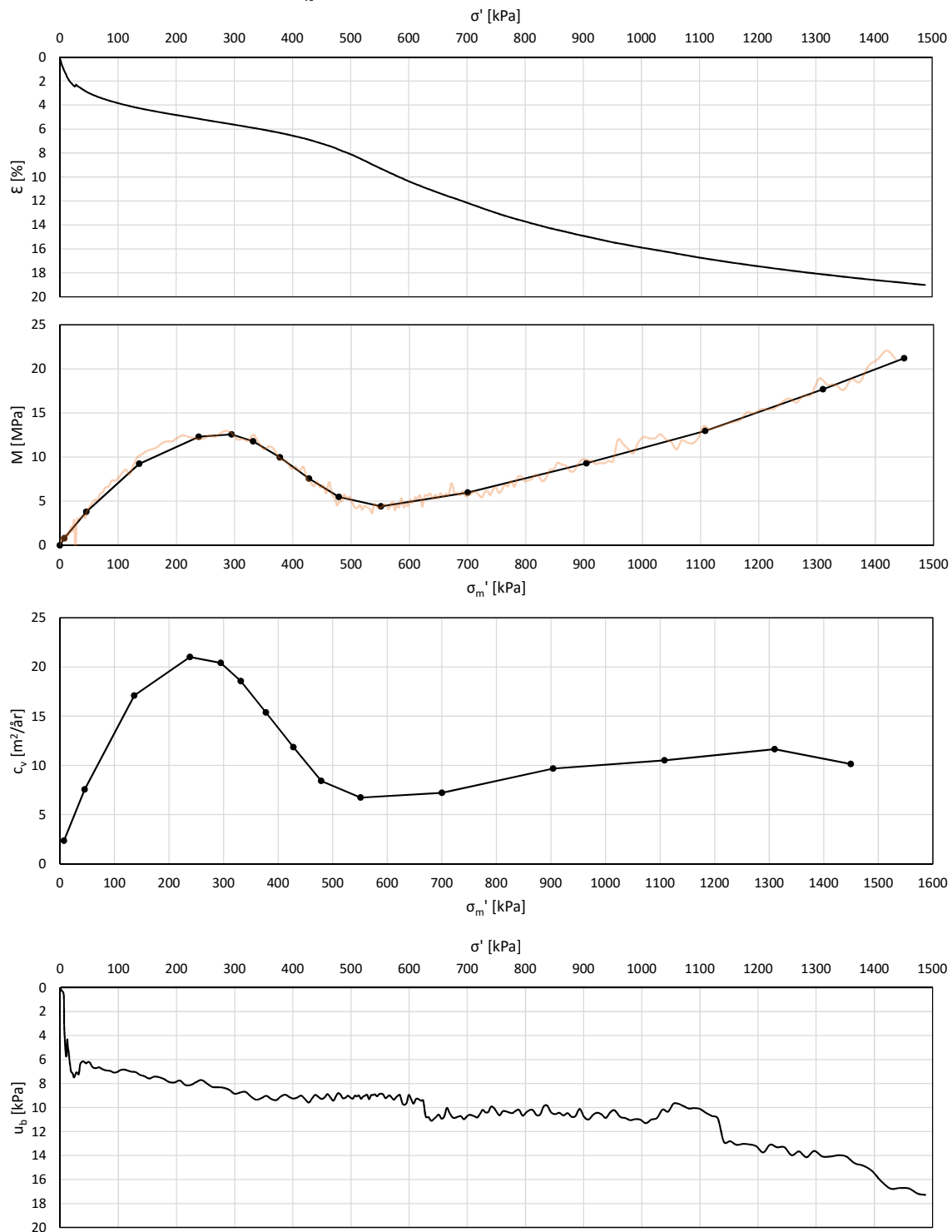
$w_0 = 33,2\%$

$\sigma'_{v0} = 127,4 \text{ kPa}$

$M_{OC} = 12,7 \text{ MPa}$

$m = 20,3$

$\gamma = 19,3 \text{ kN}/\text{m}^3$



Figur A.47: Resultat fra CRS-007

# VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK

## CRS-008

Blokk 4, Grongleire

Dybde: 10,23 m

Prøvetakingsdato: 31.08.16

Forsøksdato: 19.11.16

Tøyningshastghet: 3,333  $\mu\text{m}/\text{min}$

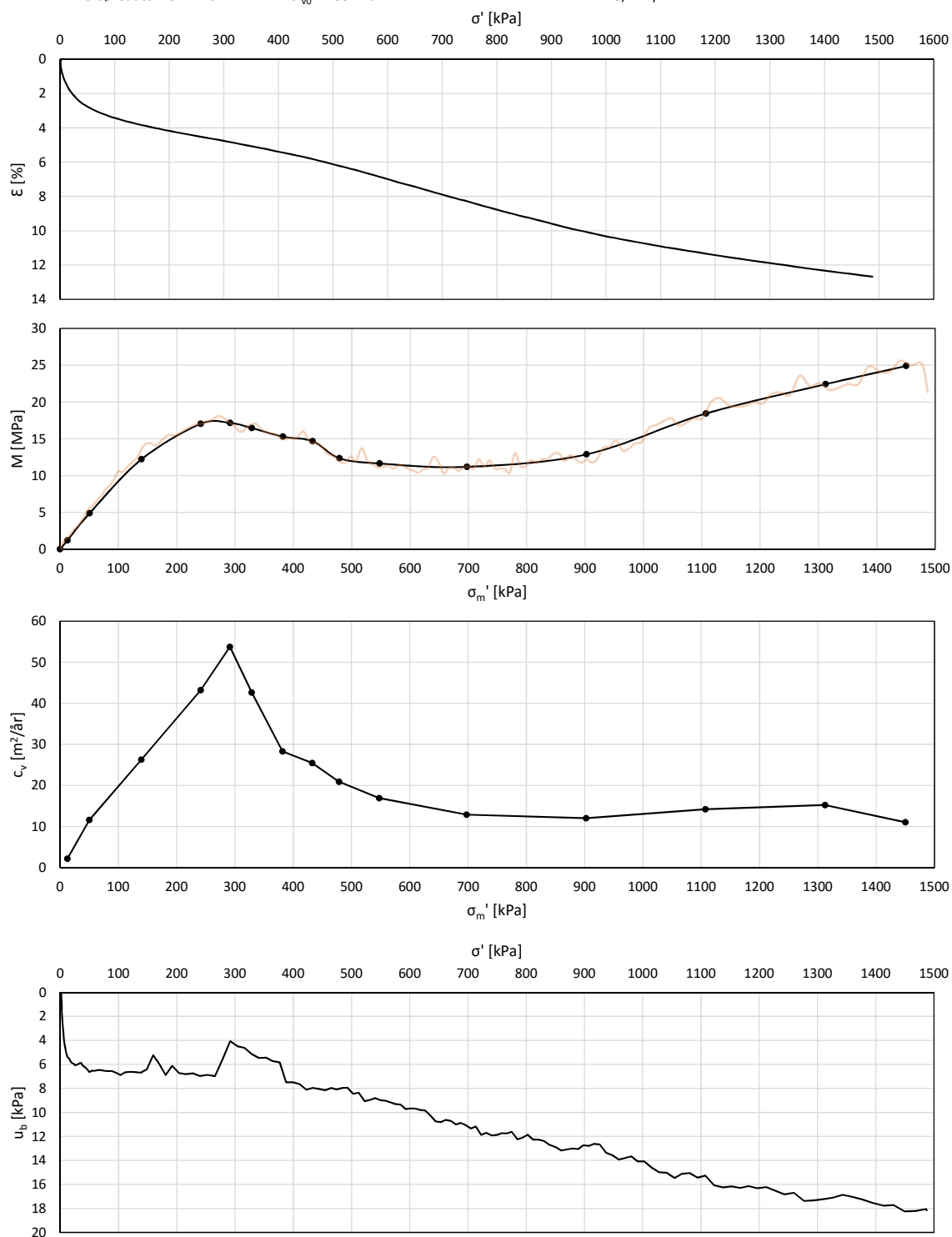
$w_0 = 30,5 \%$

$\sigma'_{v0} = 135 \text{ kPa}$

$M_{oc} = 16,7 \text{ MPa}$

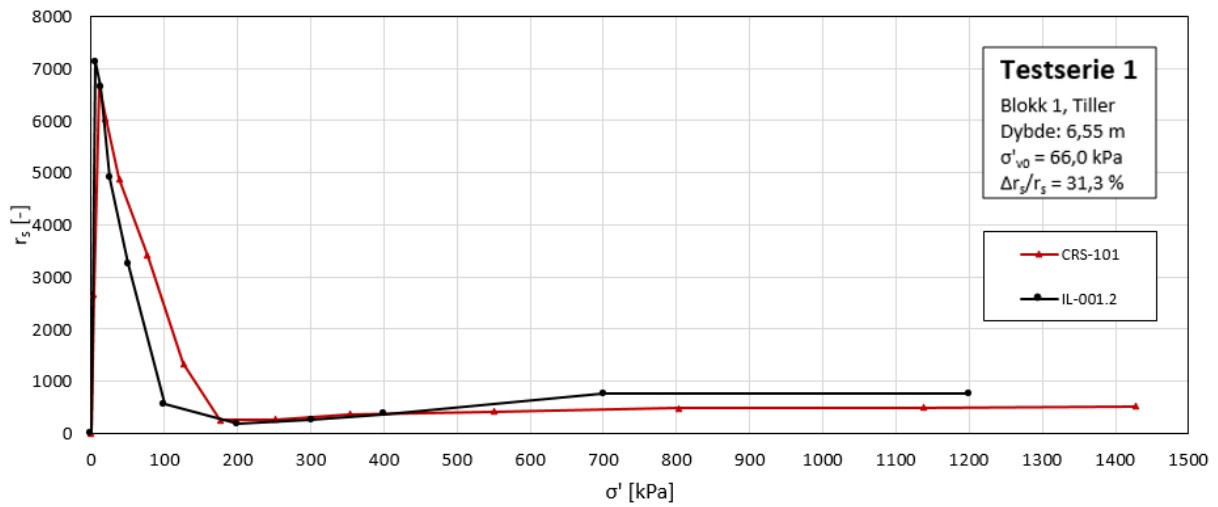
$m = 19,5$

$\gamma = 18,2 \text{ kN}/\text{m}^3$

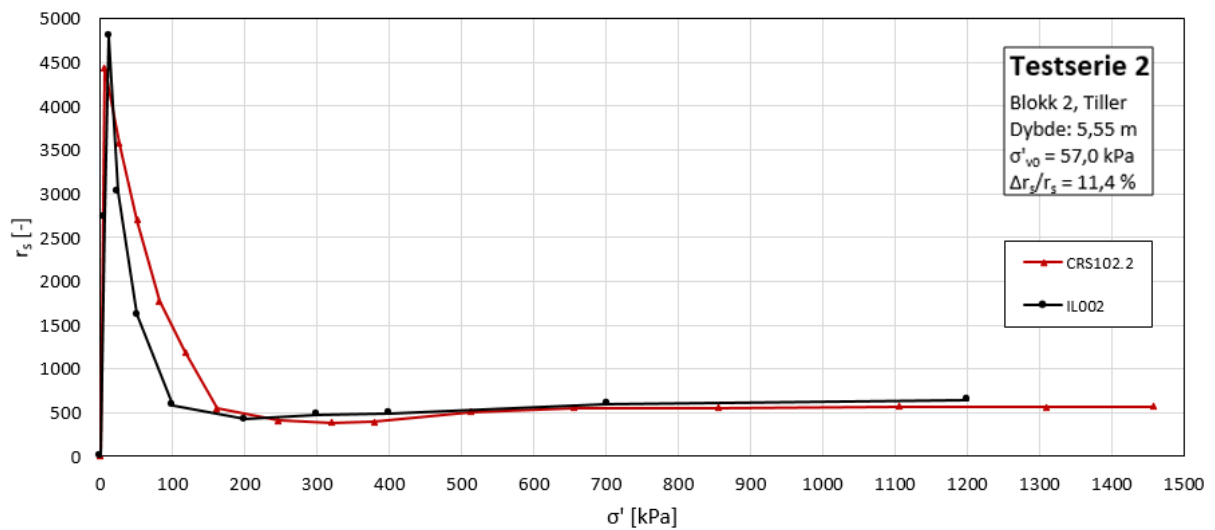


Figur A.48: Resultat fra CRS-008

## A.6 $\sigma' - r_s$ -kurver fra IL- og krypforsøk i full skala

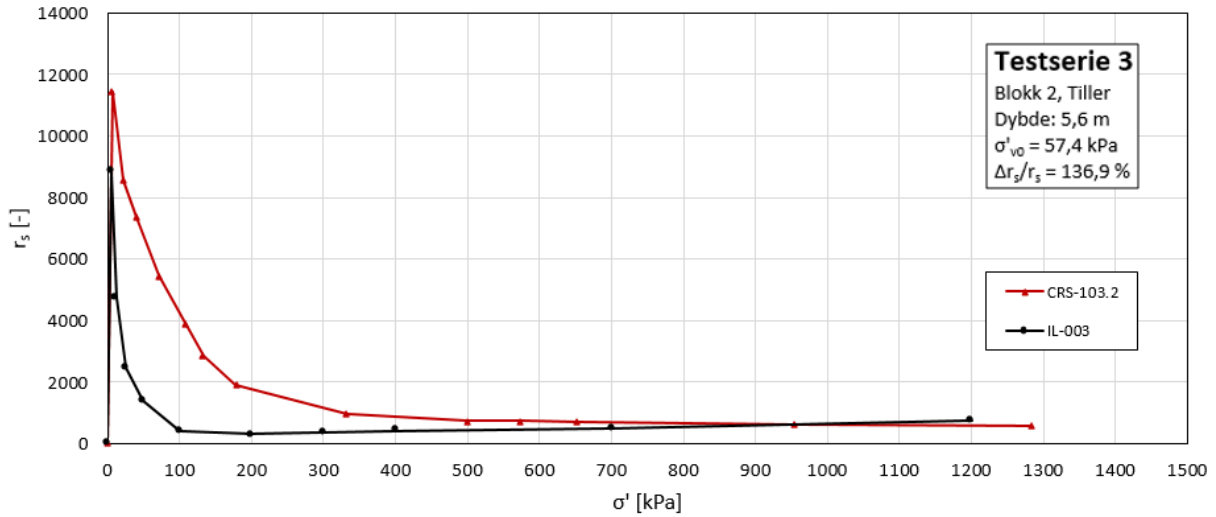


Figur A.49:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 1

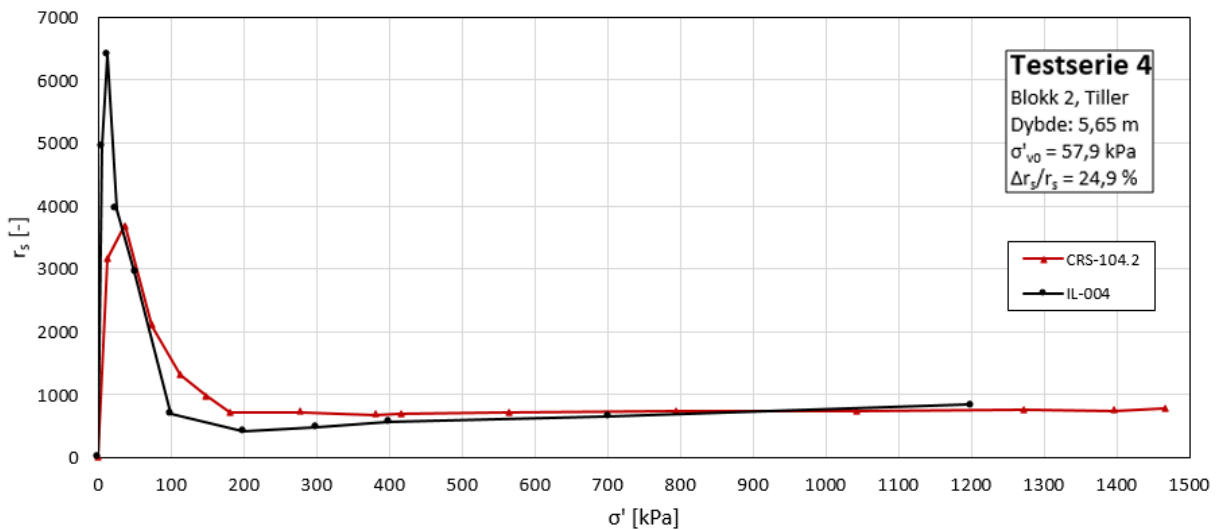


Figur A.50:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 2

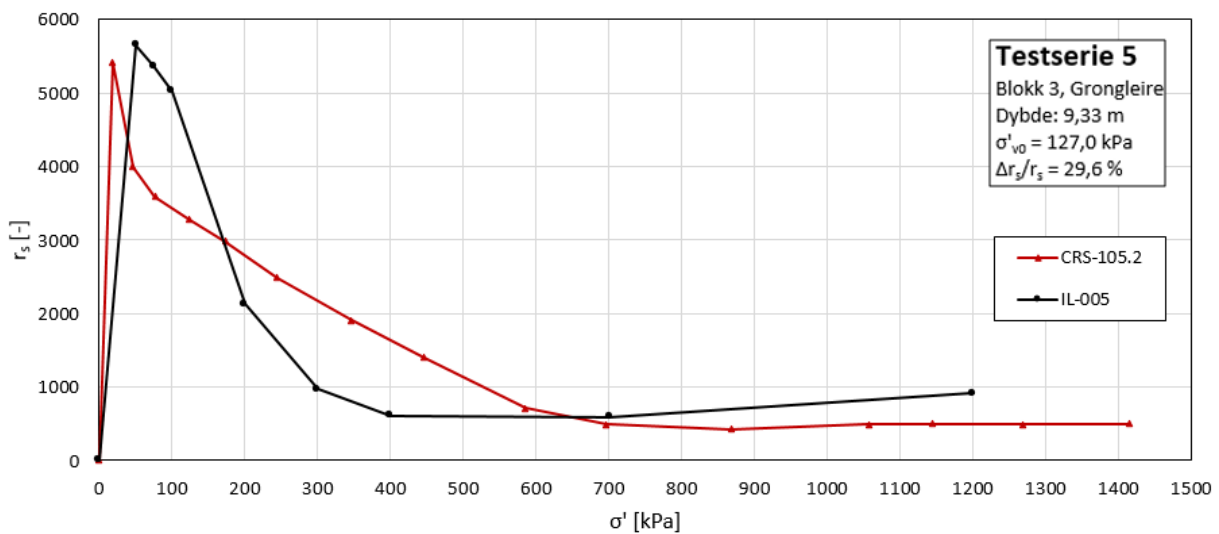
VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.51:  $r_s$  fra IL- og krepforsøk i testserie 3



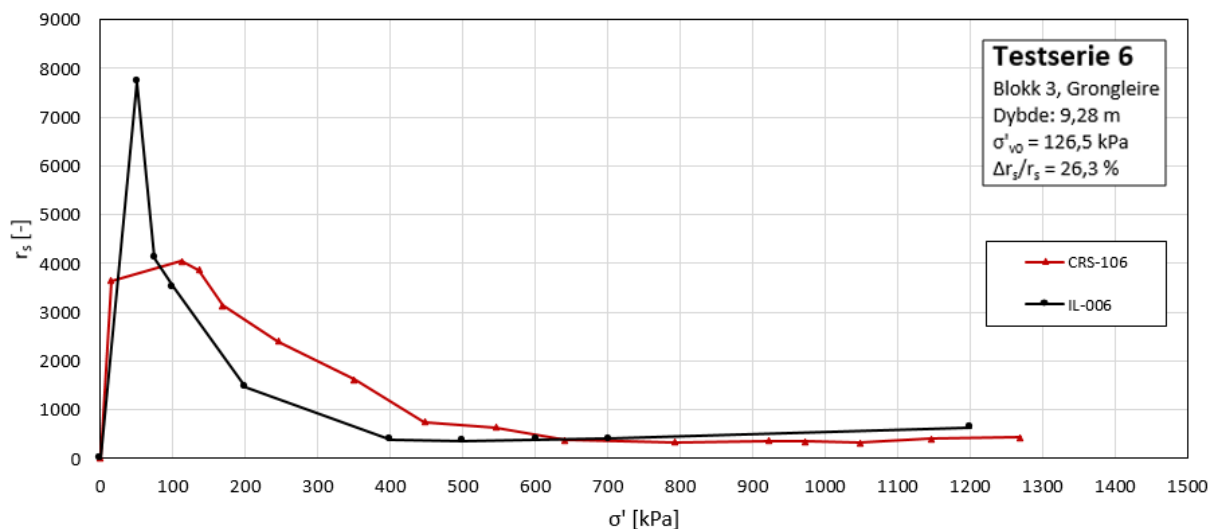
Figur A.52:  $r_s$  fra IL- og krepforsøk i testserie 4



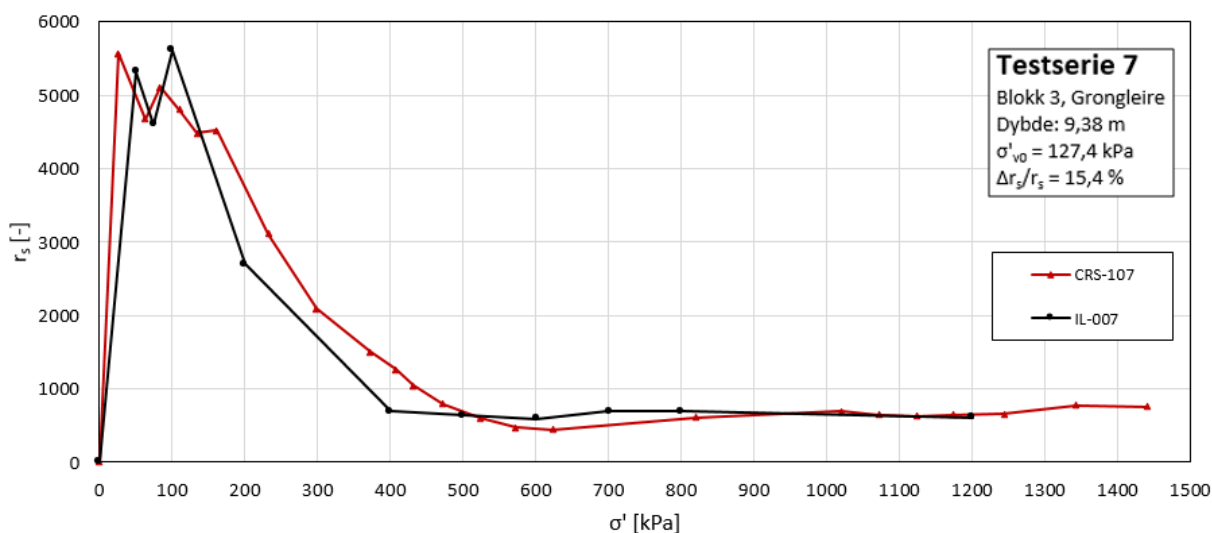
Figur A.53:  $r_s$  fra IL- og krepforsøk i testserie 5



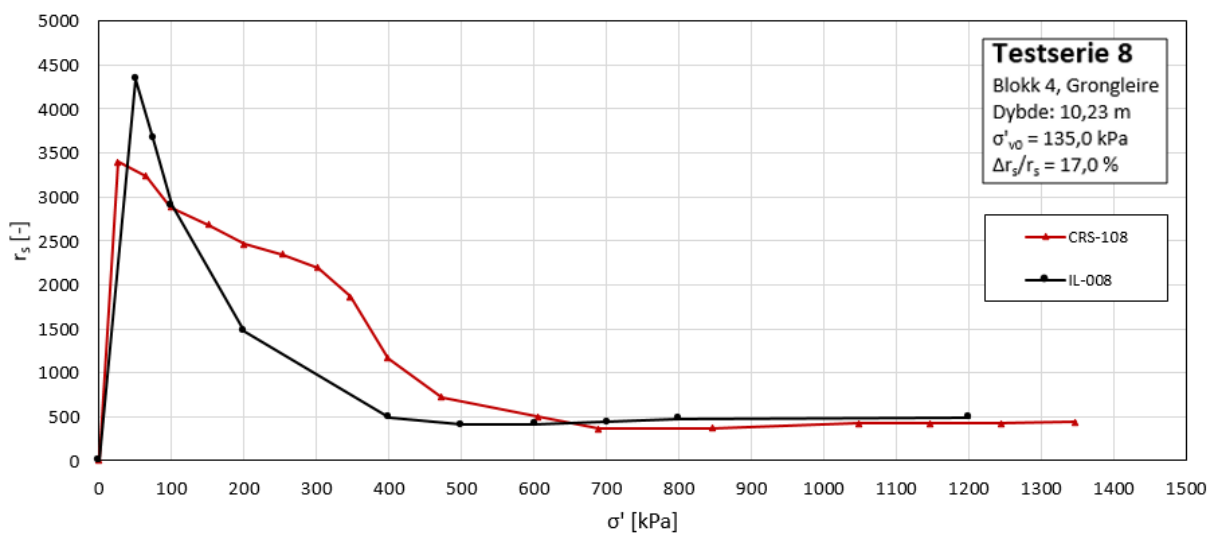
VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



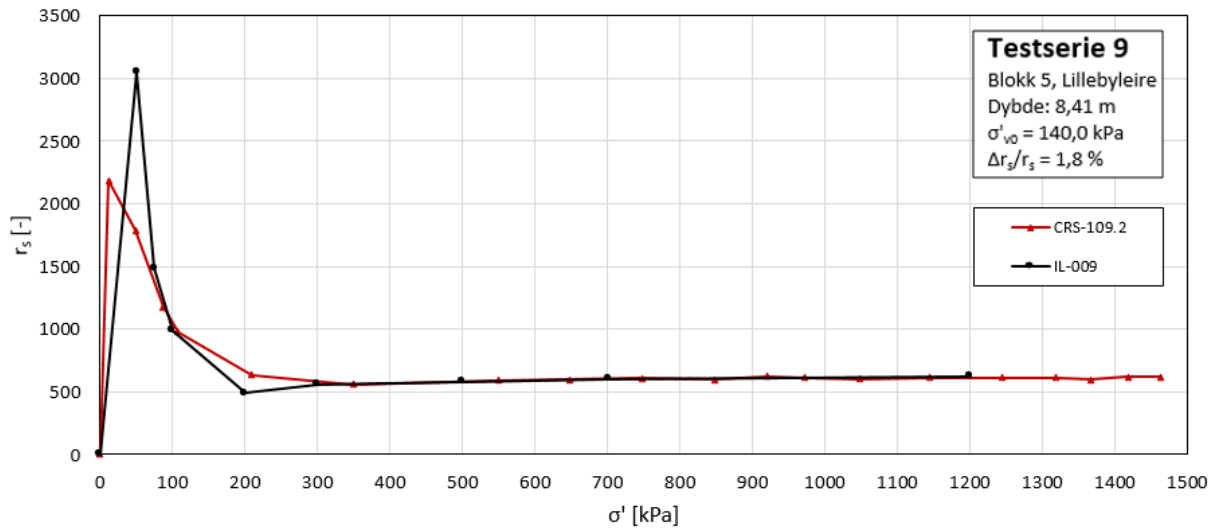
Figur A.54:  $r_s$  fra IL- og krepforsøk i testserie 6



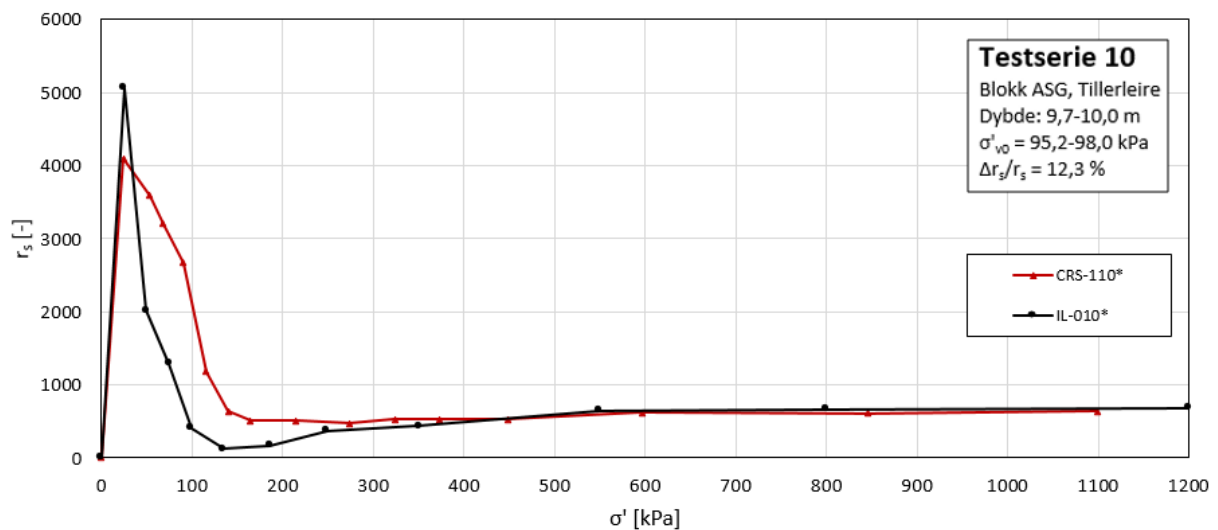
Figur A.55:  $r_s$  fra IL- og krepforsøk i testserie 7



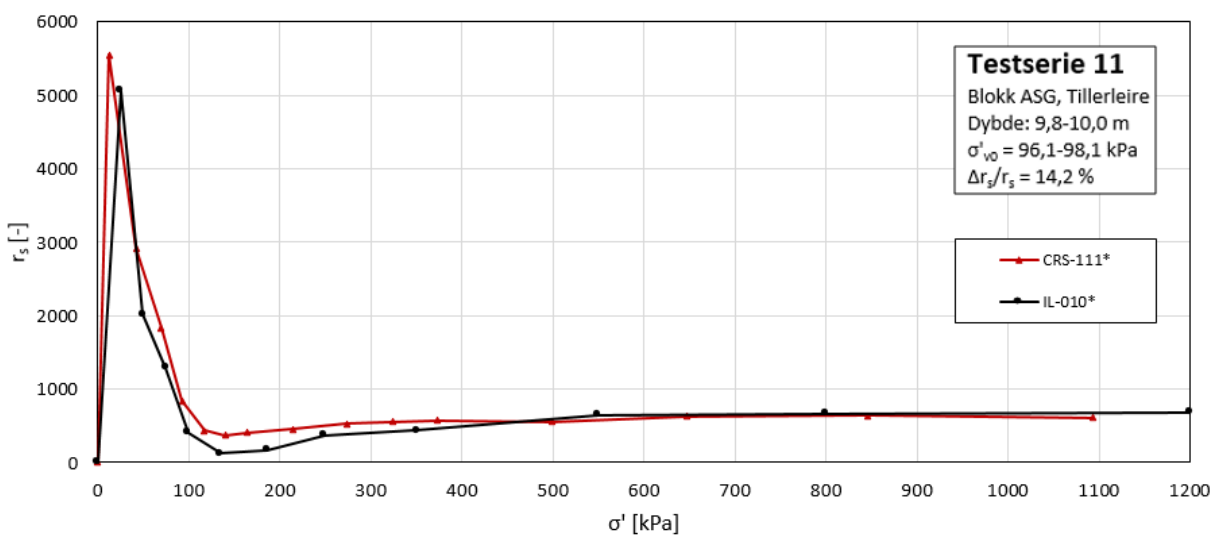
Figur A.56:  $r_s$  fra IL- og krepforsøk i testserie 8



Figur A.57:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 9

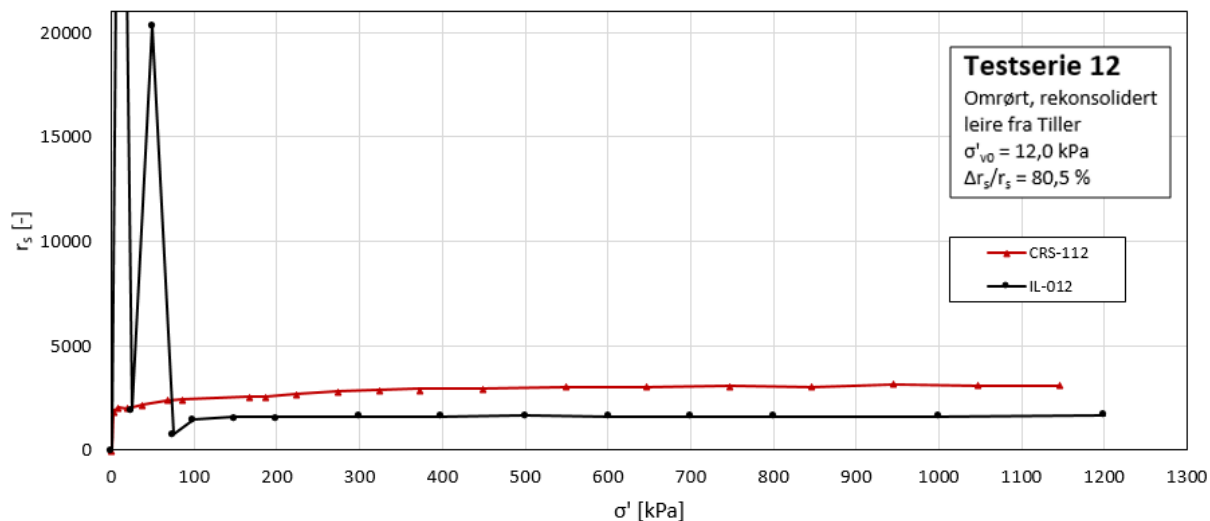


Figur A.58:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 10

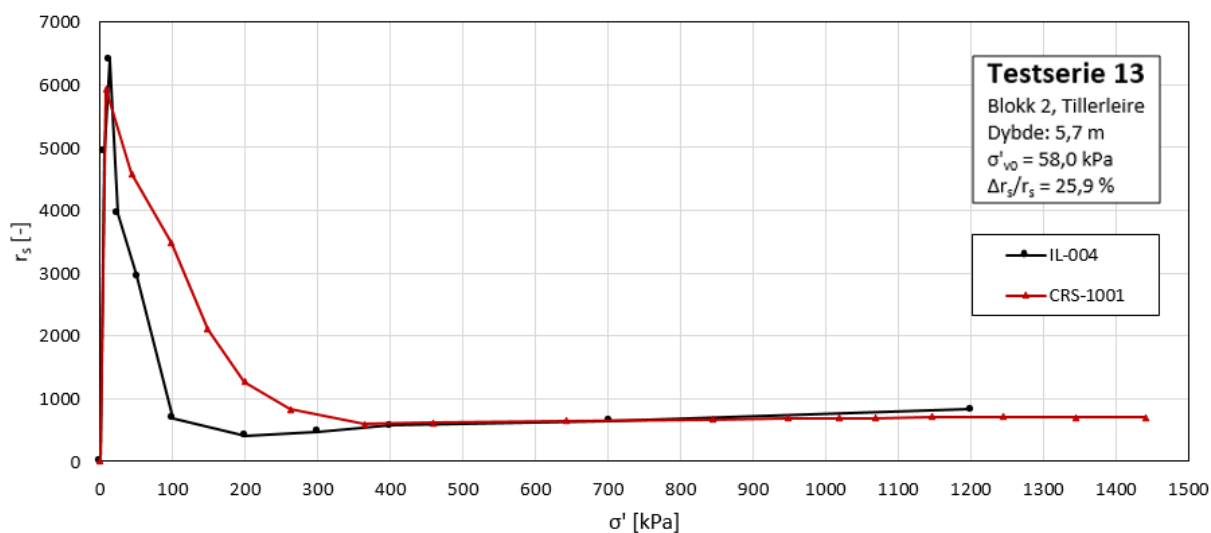


Figur A.59:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 11

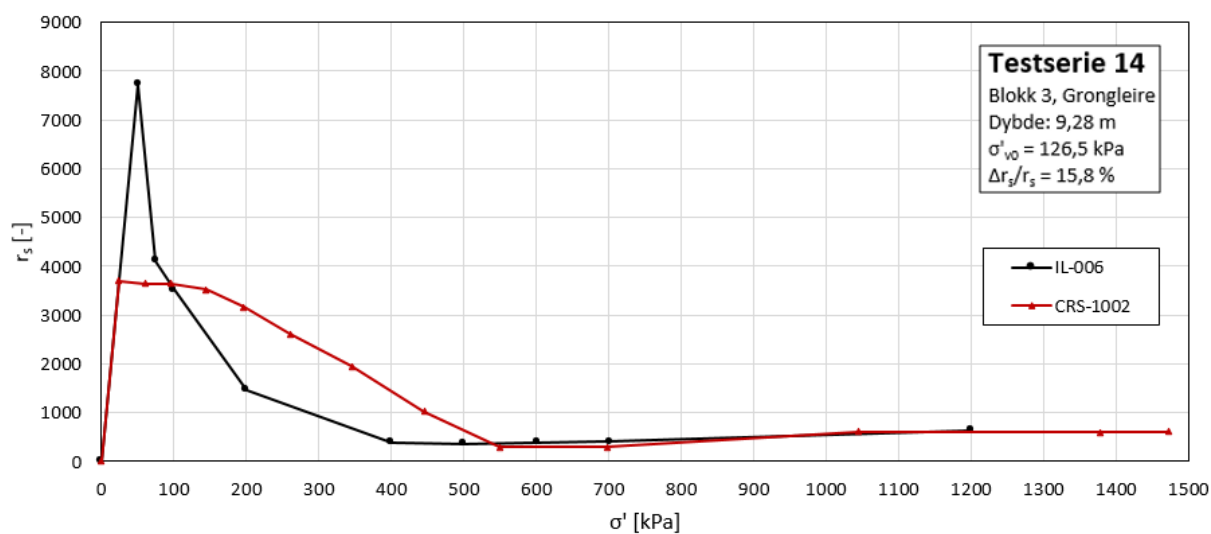
VEDLEGG A. FULLSTENDIG RESULTAT FRA ØDOMETERFORSØK



Figur A.60:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 12



Figur A.61:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 13



Figur A.62:  $r_s$  fra IL- og krypforsøk i testserie 14

## **Vedlegg B**

### **Vurdering av prøvekvalitet**

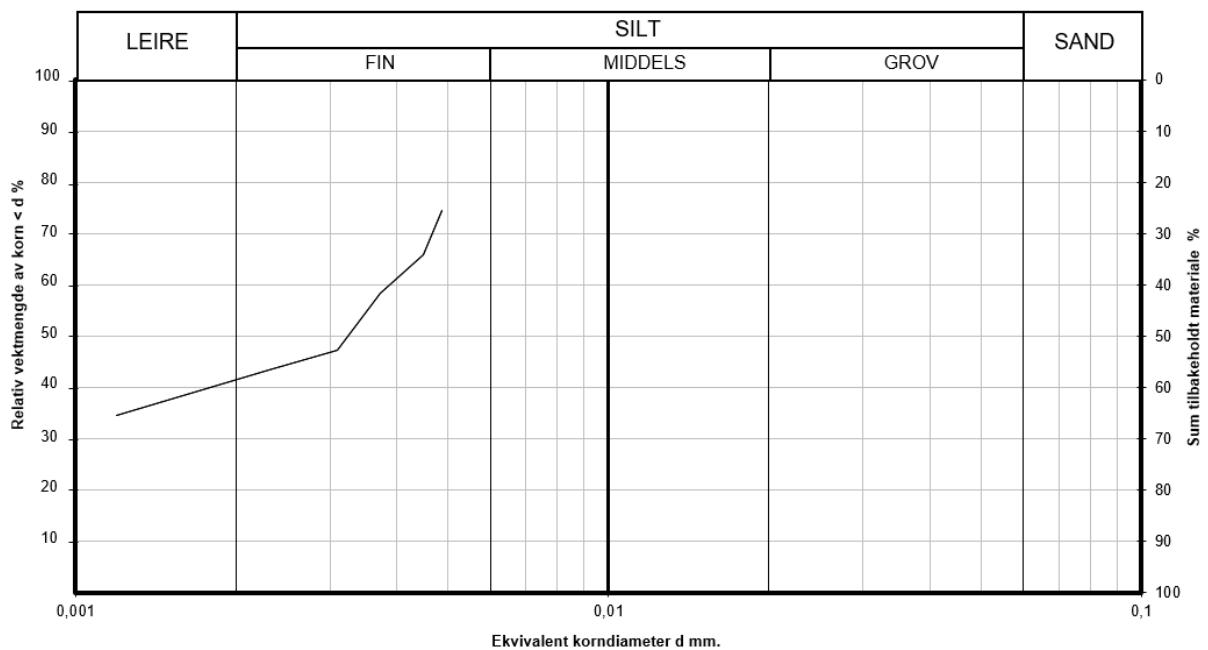
Tabell B.1: Vurdering av prøve kvalitet

Forsøksnavn	OCR [-]	$\Delta e/e_0$ [-]	$M_{OC}/(m * p'_c)$ [-]	Klassifisering [-]
CRS-001	1,97	0,06	2,46	Brukbar
CRS-002	2,63	0,06	0,99	Dårlig
CRS-003	-	-	-	Mislykket
CRS-004	2,25	0,04	2,69	God
CRS-005	4,33	0,09	1,53	Svært dårlig
CRS-006	4,35	0,05	1,28	Dårlig
CRS-007	4,32	0,09	1,14	Dårlig
CRS-008	3,70	0,08	1,71	Dårlig
CRS-009	-	-	-	Mislykket
CRS-101	1,97	0,03	3,58	Veldig god
CRS-102	2,63	-	-	Mislykket
CRS-102.2	2,63	0,04	1,84	God
CRS-103	2,61	0,02		Mislykket
CRS-103.2	2,61	0,03	5,77	Veldig god
CRS-104	2,25	0,14	-	Mislykket
CRS-104.2	2,25	0,07	1,48	Brukbar
CRS-105	4,33	0,07	0,94	Dårlig
CRS-105.2	4,33	0,05	1,99	Brukbar
CRS-106	4,35	0,06	1,88	Brukbar
CRS-107	4,32	0,05	1,42	Brukbar
CRS-108	3,70	0,05	2,63	God
CRS-109	0,71	0,07	5,09	God
CRS-109.2	0,71	0,11	1,60	Brukbar
CRS-110*	1,26	0,07	3,11	God
CRS-111*	1,25	0,09	1,83	God
CRS-112	1,00	0,19	2,78	God
CRS-112.2	1,00	0,13	2,87	God
IL-001	-		-	Mislykket
IL-001.2	1,97		1,67	God
IL-002	2,63		1,09	Brukbar
IL-003	2,61		0,87	Dårlig
IL-004	2,25		1,13	God
IL-005	4,33		0,32	Svært dårlig
IL-006	4,35		1,09	Brukbar
IL-007	4,32		1,85	God
IL-008	3,70		1,21	God
IL-009	0,71		1,62	God
IL-010*	1,22		1,36	God
IL-012	1,00		10,3	Veldig god
CRS-1001	2,23	0,06	3,22	Brukbar
CRS-1002	4,35	0,06	1,58	Brukbar

# Vedlegg C

## Resultat fra rutineundersøkelser

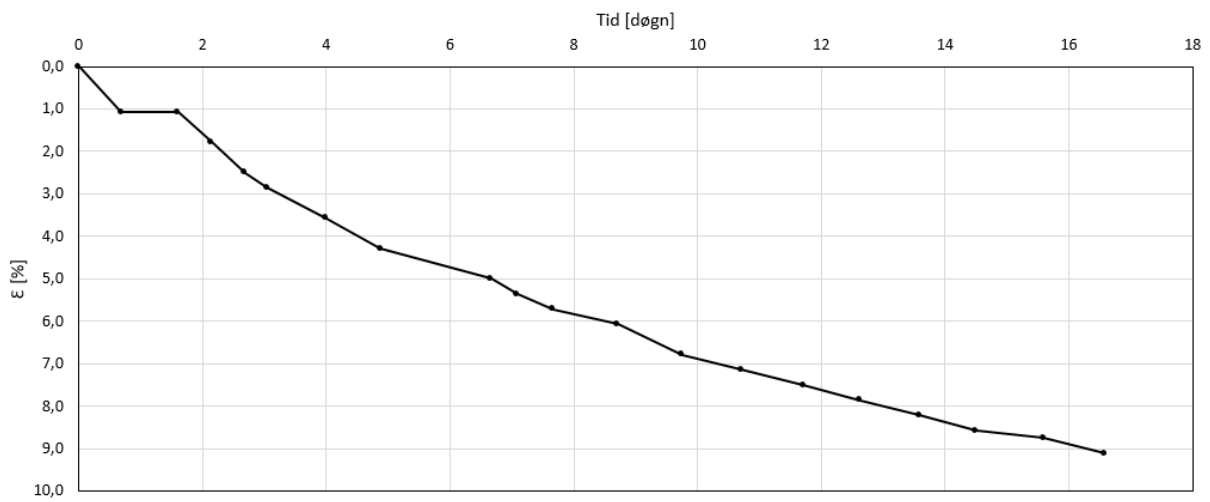
### C.1 Kornfordelingsanalyse



Figur C.1: Resultat fra kornfordelingsanalyse på materiale fra blokk 3 fra Grong

## Vedlegg D

### Konsolidering av omrørt leire



Figur D.1: Tøyningsforløp ved konsolidering av omrørt leire