

Utvikling og evaluering av prosedyrer for gjennomføring av udrenerte skjærkrypforsøk i kvikkleire

Guro Rosshaug Torpe

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, BAT

Medveileder: Anders Samstad Gylland, BAT

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



Oppgavens tittel: Utvikling og evaluering av prosedyrer for gjennomføring av udrenerte skjærkrypsforsøk i kvikkleire <i>Development and evaluation of procedures for undrained shear creep tests on quick clay</i>	Dato: 10.06.14
	Antall sider (inkl. bilag): 103
	Masteroppgave <input checked="" type="checkbox"/> Prosjektoppgave <input type="checkbox"/>
Navn: Guro Rosshaug Torpe	
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal	
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Anders Samstad Gylland	

<p>Ekstrakt:</p> <p>Denne masteroppgaven er knyttet til delprosjekt 6, «Kvikkleire» i forskningsprosjektet Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS). Dette delprosjektet har som hovedmål å danne et bedre grunnlag for lik praktisering av tolkninger av grunnundersøkelser, beregninger og utredninger i områder med kvikkleire. Det har vist seg at prøver tatt med henholdsvis 54 mm stempelprøvetaker og blokkprøvetaker ikke gir samme målte styrkeparametere ved testing, selv om materialet er det samme. Et av formålet med denne masteroppgaven har vært å se på betydningen av denne forskjellen når en naturlig skråning blir belastet eller endret på. Laboratoriemålt styrkeparametere brukes i stabilitetsberegning og det er derfor viktig å evaluere styrkeparametere, målt på blokkprøve, med tanke på risiko for sprøbrudd eller svekkelse av materialet på grunn av tidseffekter. Når en naturlig skråning blir belastet eller fysisk endret på vil det være mulig å se på effekten av udrenert skjærkryp. Et annet formål med masteroppgaven har vært å finne gode prosedyrer for alle leddene i prosessen fra prøvetaking fram til og med utført skjærkrypsforsøk. Det ble også sett på muligheten for å kunne si noe om mobiliseringsgraden av udrenert skjærstyrke i de tilfellene der en blokkprøve går til krypbrudd.</p> <p>For at et materiale hentet fra et plant område som skal kunne brukes til skjærkrypsforsøk, er det nødvendig å finne materialets flyteflate, slik at materialet kan konsolideres til riktig spenningstilstand. Det er derfor utført K_0'-forsøk for å finne beliggenheten og formen til flyteflaten for materialet, med $K_0' = 0,4$ og $0,6$ og trinntid 1 og 24 timer. Disse parameterne er valgt for å kunne si noe om formen på flyteflaten for materialet i det aktuelle spenningsområdet. Ulike prosedyrer for utførelse av K_0'-forsøk har blitt testet ut. Flyteflatene er deretter skissert ut fra punktene funnet K_0'-forsøk, og sammenlignet med teoretiske beregnede flyteflater.</p> <p>Det har vært utfordrende å gjennomføre høyt mobiliserte K_0'-forsøk på kvikkleiremateriale med lang trinntid, ettersom forsøkene har enten gått til brudd eller begynt å pådra seg kryp som følge av prosedyrene. Det har med de testede prosedyrene ikke vært mulig å gjennomføre slike forsøk. Materialet og utstyret brukt i denne masteroppgaven viser seg egnet til å gi riktig grunnlag for besvarelse av problemstillingen. For å kunne si noe om udrenert skjærkryp på kvikkleire er det avgjørende at utgangspunktet for forsøkene er riktig i forhold til problemstillingen. Det er viktig å konsolidere prøvene til riktig spenningstilstand, ettersom materialet som brukes til forsøkene er hentet fra et plant område, men skal simulere en naturlig skråning. Ved å kjøre nok forsøk med likt utgangspunkt er det mulig å si noe om et stabilt område for udrenert skjærkryp.</p> <p>Usikkerhetene knyttet til K_0'-forsøkene er mange, og det er behov for å gjennomføre flere K_0'-forsøk med måling av poretrykk inne i prøvene, for å minske usikkerheten rundt effektivspenningsforholdene og trinntiden. På grunn av problemene med gjennomføring av høyt mobiliserte K_0'-forsøk og tidsaspektet på denne masteroppgaven, fikk forfatter ikke utført udrenerte skjærkrypsforsøk. En anbefalt prosedyre for gjennomføring av udrenerte skjærkrypsforsøk er likevel beskrevet i masteroppgaven, til hjelp for utførelse av relevante skjærkrypsforsøk ved en eventuell videreføring av arbeidet i denne masteroppgaven.</p>

Stikkord:

1. Udrenert skjærkryp
2. K_0' -forsøk
3. Kvikkleire
4. Esp

TBA4900 Geoteknikk masteroppgave, Vår 2014

Stud. techn.
Guro Rosshaug Torpe

Utvikling og evaluering av prosedyrer for gjennomføring av udrenerte skjærkrypforsøk i kvikkleire

Development and evaluation of procedures for undrained shear creep tests on quick clay

Bakgrunn

Udrenert skjærkryp i sensitive leirer er en problemstilling som knyttes til forståelse av naturlige og konstruerte skråninger. Etatsprogrammet NIFS (Naturfare- Infrastruktur, Flom og Skred), som er et samarbeid mellom Statens vegvesen, Jernbaneverket og NVE, har i Delprosjekt 6 rettet fokus mot undersøkelse av skjærkrypegenskapene til kvikkleire. Fokus er på valg av udrenert skjærstyrke, skjærmobilisering, naturlige skråninger og sensitive leires evne til å motstå høy mobilisering over tid. NIFS støtter arbeidet utført i denne masteroppgaven.

Denne masteroppgaven bygger på tidligere studentarbeid utført ved NTNU og viderefører arbeidet med evaluering og tilpasning av utstyr, forsøksprosedyrer samt utførelse av nye forsøk.

Innhold

Opgavens innhold er å undersøke og etablere prosedyrer for utførelse av udrenerte skjærkrypforsøk som er relevante for en naturlig skrånning. Dette innebærer å identifisere en spenningstilstand som er relevant for et jordelement i en naturlig skrånning, og å konsolidere en prøve til denne tilstanden mest mulig skånsomt. Innholdet i oppgaven er:

- Gi et sammendrag av prosessene involvert i kryp
- Teste og etablere prosedyrer for utførelse av trinnvise K_0' -forsøk på kvikkleire i treaksialapparatet
- Fra K_0' -forsøkene skal det etableres flyteflater for det testede materialet. Disse skal brukes for å estimere 10 000 års flyteflate og relevant konsolideringsnivå for utførelse av udrenerte skjærkrypforsøk
- De eksperimentelle flyteflatene skal sammenlignes med teoretiske flyteflater
- Det skal etableres en prosedyre for å konsolidere en prøve skånsomt til en høy skjærmobilisering relevant for en naturlig skrånning
- Det skal undersøkes hvorvidt prøvematerialet påvirkes når det konsolideres fra in situ tilstand til den relevante spenningstilstanden

Laboratorieundersøkelsene skal utføres på blokkprøver tatt opp fra NTNUs forsøksfelt på Tiller og Esp med NTNUs modifiserte Sherbrooke prøvetaker. Treaksialutstyr som er utviklet spesielt for utførelse av skjærkrypforsøk skal benyttes.

Omfang og levering

Oppgaven har et omfang på 30 studiepoeng – dvs. tilsvarende 100 % av et semester. Arbeidet skal leveres i form av en teknisk rapport som leveres ikke senere enn 10. juni 2014. To innbundne versjoner skal leveres. Digitalt skal det leveres en versjon av oppgaven samt alle laboratoriedata som er fremkommet, både rådatafiler og behandlede data og eventuelle film/videooptak.

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, NTNU.

Biveileder: Anders Samstad Gylland, NTNU

Arnfinn Emdal

Amanuensis

Institutt for Bygg, Anlegg og Transport

Faggruppe for Geoteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i 10. og avsluttende semester ved sivilingeniørstudiet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU, våren 2014. NIFS (Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred) støtter arbeid utført i denne prosjektoppgaven.

Masteroppgaven bygger videre på arbeid utført i prosjektoppgaven, høsten 2013. Arbeidet i laboratoriet var både utfordrende og spennende, da ikke alle forsøkene som var planlagt lot seg gjennomføre. Det ga meg derimot muligheten til å lære av de feilene som ble gjort, og har gitt meg en bedre forståelse av materialoppførsel ved testing.

Jeg vil rette en stor takk til mine veiledere Arnfinn Emdal og Anders S. Gylland for god hjelp gjennom hele prosessen. I tillegg vil jeg takke Helene Kornbrekke, Jan Jønland og Per Østensen for assistanse og hjelp i laboratoriet.

Dette halvåret hadde ikke vært det samme uten den flotte gjengen på kontoret, som har skapt god stemning og har vært tilgjengelig for diskusjoner om utfordrende temaer. Til slutt vil jeg takke Solveig Vassenden for utrolig god støtte og hjelp med korrekturlesing underveis.

Trondheim, juni 2014

Guro R. Torpe

Sammendrag

Denne masteroppgaven er knyttet til delprosjekt 6, «Kvikkleire» i forskningsprosjektet Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS). Dette delprosjektet har som hovedmål å danne et bedre grunnlag for lik praktisering av tolkninger av grunnundersøkelser, beregninger og utredninger i områder med kvikkleire. Det har vist seg at prøver tatt med henholdsvis 54 mm stempelprøvetaker og blokkprøvetaker ikke gir samme målte styrkeparametere ved testing, selv om materialet er det samme. Et av formålet med denne masteroppgaven har vært å se på betydningen av denne forskjellen når en naturlig skråning blir belastet eller endret på. Laboratoriemålt styrkeparametere brukes i stabilitetsberegning og det er derfor viktig å evaluere styrkeparametere, målt på blokkprøve, med tanke på risiko for sprøbrudd eller svekkelse av materialet på grunn av tidseffekter.

Når en naturlig skråning blir belastet eller fysisk endret på vil det være mulig å se på effekten av udrenert skjærkryp. Et annet formål med masteroppgaven har vært å finne gode prosedyrer for alle leddene i prosessen fra prøvetaking fram til og med utført skjærkrypforsøk. Det ble også sett på muligheten for å kunne si noe om mobiliseringsgraden av udrenert skjærstyrke i de tilfellene der en blokkprøve går til krypbrudd.

For at et materiale hentet fra et plant område som skal kunne brukes til skjærkrypforsøk, er det nødvendig å finne materialets flyteflate, slik at materialet kan konsolideres til riktig spenningsstilstand. Det er derfor utført K'_0 -forsøk, for å finne beliggenheten og formen til flyteflaten for materialet. Forsøkene er gjennomført med $K'_0=0,4$ og $0,6$ og trinntid 1 og 24 timer. Disse parameterne er valgt for å kunne si noe om formen på flyteflaten for materialet i det aktuelle spenningsområdet. Ulike prosedyrer for utførelse av K'_0 -forsøk har blitt testet ut. Flyteflatene er deretter skissert ut fra punktene funnet ved K'_0 -forsøk, og sammenlignet med teoretiske beregnede flyteflater.

Det har vært utfordrende å gjennomføre høyt mobiliserte K'_0 -forsøk på kvikkleiremateriale med lang trinntid, ettersom forsøkene har enten har gått til brudd

eller begynt å pådra seg kryp som følge av prosedyren. Det har med de testede prosedyrene ikke vært mulig å gjennomføre slike forsøk. Materialet og utstyret brukt i denne masteroppgaven viser seg egnet til å gi riktig grunnlag for besvarelse av problemstillingen. For å kunne si noe om udrenert skjærkryp på kvikkleire er det avgjørende at utgangspunktet for forsøkene er riktig i forhold til problemstillingen. Det er viktig å konsolidere prøvene til riktig spenningstilstand, ettersom materialet som brukes til forsøkene er hentet fra et plant område, men skal simulere en naturlig skråning. Ved å kjøre flere forsøk med likt utgangspunkt er det mulig å si noe om et stabilt område for udrenert skjærkryp.

Usikkerhetene knyttet til K'_0 -forsøkene er mange, og det er behov for å gjennomføre flere K'_0 -forsøk med måling av poretrykk inne i prøvene, for å minske usikkerheten rundt effektivspenningsforholdene og trinntiden. På grunn av problemene med gjennomføring av høyt mobiliserte K'_0 -forsøk og tidsaspektet på denne masteroppgaven, fikk forfatter ikke utført udrenerte skjærkrypforsøk. En anbefalt prosedyre for gjennomføring av udrenerte skjærkrypforsøk er likevel beskrevet i masteroppgaven, til hjelp for utførelse av relevante skjærkrypforsøk ved en eventuell videreføring av arbeidet i denne masteroppgaven.

Summary

This master thesis is a part of Natural hazard - Infrastructure for Floods and Slides (NIFS) sub-project 6 «Quick Clay». The goal of Sub-project 6 is to give an improved foundation for interpretation of calculations, study and field investigation in areas with quick clay. It has been shown that samples taken with 54 mm piston sampler and block sampler provide different measured strength parameters in the laboratory, although the material is the same. The purpose of this thesis has been to look at the significance of this difference when adding load to or physically altering a natural slope. Strength parameters measured in laboratory are used in stability calculations and it is therefore important to evaluate the strength parameters measured from block samples with respect to the risk of brittle fracture or the weakening of the material due to time effects.

When a natural slope is loaded or physically altered it is possible to evaluate the effect of undrained shear creep. Another purpose of this thesis was to find suitable procedures for every step of the process, from sampling to undrained shear creep tests. It was also considered the possibility to evaluate the degree of undrained shear strength mobilization, in cases where a block sample creep to failure.

If a material taken from a horizontal area is used for shear creep tests, it is necessary to find the yield surface, so that the material can be consolidated to the proper stress state. It is therefore performed K'_0 tests in order to find the location and shape of the material yield surface. The tests were executed using shear mobilization of 0.4 and 0.6 and with step duration of 1 and 24 hours. These parameters were chosen to be able to say something about the shape of the yield surface in the relevant stress range. Different procedures for K'_0 test have been tested. Yield surfaces have then been drawn based on the the K'_0 test results, and compared with theoretical calculated yield surfaces.

Completing highly mobilized K'_0 tests on quick clay material with long step duration have been challenging as the K'_0 tests have either failed or started creeping as a result of the procedure. It has not been possible to complete these tests with

the procedures presented. However, both the material and the equipment are fit for purpose. In order to be able to say something about the undrained shear creep on quick clay, it is essential that the starting points for the tests are relevant for the problem. It is important to consolidate the sample to the right stress state, as the material used for the tests have been sampled from a horizontal area, but is suppose to simulate a natural slope. By performing a number of tests with the same starting point, it is possible to predict a stable area for undrained shear creep.

This thesis have highlighted several uncertainties associated with K'_0 tests. It is necessary to conduct additional K'_0 tests with pore pressure measurement inside the sample, in order to reduce the uncertainty of effective stress state and step duration. Because of the problems with completing highly mobilized K'_0 tests and the time frame of this thesis, the author have not had time to perform undrained shear creep tests. A recommended procedure for conducting undrained shear creep tests is none the less described in the thesis to provide a starting point for continuation of the work done in this thesis.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn for masteroppgaven	1
1.2	Problemstilling	3
1.3	Oppgavens disposisjon	4
2	Teori	5
2.1	Prekonsolideringsspenning	5
2.1.1	Flyteflate	6
2.1.2	Teoretiske flyteflater	7
2.2	Krypteori	9
2.2.1	Deformasjon	9
2.2.2	Påvirkning av kryp	11
2.3	Krypprosessen	12
2.3.1	Effekten av kryp på et materiale	12
2.3.2	Effekten av destrukturering på et materiale	13
2.3.3	Tiksotropi	15
2.3.4	Stabilt eller ustabilt krypforsøk	16
2.4	Beregning av krypdeformasjon og tøyningshastighet	18
2.4.1	Janbus metode	18
2.4.2	Singh og Mitchells metode	18
2.5	Blokkprøvet teori	20
2.5.1	Prøvetaking	20
2.5.2	Prøveforstyrrelse	21
3	Beskrivelse av forsøksprosessen og utførte forsøk	23
3.1	Prøvetaking	23
3.2	Materialbeskrivelse	24
3.2.1	Tiller	25
3.2.2	Esp	26

3.3	Klargjøring av prøvemateriale for treaksialapparat	27
3.4	Forsøkslokasjon	29
3.5	Forsøk	30
3.5.1	K'_0 -forsøk	30
3.5.2	Skjærkrypforsøk	33
3.6	Materialegenskaper etter konsolidering	37
3.7	Konstante forsøksparametere	38
4	Resultat	39
4.1	Standard forsøk	39
4.1.1	Standard skjærforsøk	39
4.1.2	Ødometerforsøk	41
4.2	K'_0 -forsøk	43
4.2.1	Alternativ prosedyre for utførelse av K'_0 -forsøk på kvikkleire	49
4.3	Flyteflater	50
4.4	Materialegenskaper ved konsolidering	52
5	Diskusjon	53
5.1	Vurdering av materialene og utstyr	53
5.1.1	Materialet	53
5.1.2	Utstyret	54
5.2	K'_0 -forsøkene	55
5.2.1	Endret prosedyre for K'_0 -forsøk på kvikkleire	55
5.3	Flyteflater	56
5.3.1	Teoretiske flyteflater	56
5.3.2	Sammenligning av flyteflater	59
5.3.3	Tiltak	60
5.4	Skjærkrypforsøk	60
5.5	Vurdering av relevant utgangspunkt for forsøkene	61
5.5.1	Stabilt område	62
5.6	Materialegenskaper ved konsolidering	64
5.7	Anbefalt prosedyre for gjennomføring av relevante skjærkrypforsøk	66
6	Konklusjon	69
7	Videre arbeid	71
	Litteraturliste	II
	Vedlegg	V
A	Forsøksinformasjon	VI

B	Rutineresultater, Esp	IX
C	Testing av ekstra membran	XI

Figurer

1.1	Spenningstilstand for materiale fra horisontalt og skråning	3
2.1	Flyteflate skissert ved K'_0 -forsøk	6
2.2	Flyteflater skissert ved ulike forsøksfaktorer	7
2.3	Diagram med m_{OC} , m_{NC} og m_{sec}	8
2.4	Prinsippskisse av setning og tidsforløp.	9
2.5	Instant og delayed forklaring	10
2.6	Kryppoppførsel ved ulik konsolidering	11
2.7	Instant og delayed deformasjon med isotaker	12
2.8	Kryp øker p'_c	13
2.9	Konsolideringsforsøk på uforstyrret og destrutturert materiale . . .	14
2.10	CIU forsøk på uforstyrret og destrutturert materiale	15
2.11	Ødometerforsøk på uforstyrret og omrørt jord	16
2.12	Krypfaser.	17
2.13	Skisse av stabil/ustabil udrenert krypkurve.	17
2.14	Effekten kryp har på flyteflaten	17
2.15	Effekten destrukturering har på flyteflaten	17
2.16	Tidsmotstandskurve	19
2.17	$\dot{\epsilon}$ -log t kurve	20
2.18	$\dot{\epsilon}$ - D kurve	20
2.19	Stempel ned.	21
2.20	Stempel opp.	21
2.21	Blokk ned.	21
2.22	Skjærstyrkeforskjell på blokkprøve og 54 mm prøve	22
3.1	Blokkprøvetaking på Esp med NTNUs MiniBlokk.	24
3.2	MiniBlokk i bruk med en borerigg.	24
3.3	Lokasjon Tiller-materiale.	25
3.4	Lokasjon Esp-materiale.	26
3.5	Oppdelingsstativ	27

3.6	Oppdelingstegning av MiniBlokk-materiale.	27
3.7	Trimmeutstyr	27
3.8	Trimmeprosessen vist ved tre stadier.	28
3.9	Klargjøring av treaks - stadie 1	28
3.10	Klargjøring av treaks - stadie 2	28
3.11	Klargjøring av treaks - stadie 3	28
3.12	Oppsettet av treaksialapparatene i henholdsvis a) lab A og b) lab B.	29
3.13	Enkel forklaring av hvordan flyteflater plottes fra K'_0 -forsøk.	33
3.14	Forklaring på Δq	37
4.1	STD 7,9-8,2 fra Esp	40
4.2	STD 7,9-8,2 fra Esp	40
4.3	Resultat fra CRS test på blokkprøve fra Esp	41
4.4	Sammenligning av to CRS forsøk på blokkprøve	42
4.5	K'_0 -forsøkene plottet for Tiller-materiale.	45
4.6	K'_0 -forsøkene plottet for Esp-materiale.	46
4.7	K'_0 -forsøkene plottet i et $q - p'$ diagram for Tiller-materiale	47
4.8	K'_0 -forsøkene plottet i et $q - p'$ diagram for Esp-materiale	48
4.9	$\Delta V - tid$ og $\delta - tid$ diagram for opprinnelig K'_0 -forsøk	49
4.10	$\Delta V - tid$ og $\delta - tid$ diagram for alternativ K'_0 -forsøk	50
4.11	Flyteflater skissert for de gjennomførte K'_0 -forsøkene for Tiller.	51
4.12	Flyteflater skissert for de gjennomførte K'_0 -forsøkene for Esp.	51
5.1	Prinsippskisse av effektivspenningsstien ved prosedyre brukt ved K'_0 -forsøkene.	55
5.2	Prinsippskisse av effektivspenningsstien ved den nye prosedyren for K'_0 -forsøk kjørt på kvikkleire.	55
5.3	Forklaring av parameterne for en rotert ellipse.	58
5.4	De teoretiske flyteflatene for Tiller-materiale.	58
5.5	De teoretiske flyteflatene for Esp-materiale.	59
5.6	Konsolideringsmetode for udrenert skjærkrypforsøk.	61
5.7	Prinsippskisse av stabilt område for skjærkryp	62
5.8	Skisse av stabilt område for skjærkryp med forsøk	63
5.9	Materialet etter utbygging etter konsolidering	64
5.10	Avlastning ved forsøk	65
B.1	Hydrometeranalyse av materiale fra Esp, dybde 6,2-7,0.	X
C.1	Purflex G smørt på to gummihuder	XII

Tabeller

3.1	Gjennomsnitt indeksverdier for Tiller-materiale (Gylland mfl., 2013).	25
3.2	Indeksverdier for Esp-materiale.	26
3.3	Oversikt over laboratoriene brukt til forsøk.	29
3.4	Oversikt over henvisninger til Norsk Standard (NS).	31
3.5	Planlagte K'_0 -forsøk for materiale fra Tiller.	31
3.6	Planlagte K'_0 -forsøk for materiale fra Esp.	32
3.7	Planlagte trinn for $K'_0=0,4$ for materiale fra Tiller.	32
3.8	Planlagte trinn for $K'_0=0,6$ for materiale fra Tiller.	32
3.9	Planlagte trinn for $K'_0=0,4$ for materiale fra Esp.	32
3.10	Planlagte trinn for $K'_0=0,6$ for materiale fra Esp.	32
3.11	Planlagte skjærkrypforsøk på materiale fra Esp.	34
3.12	Plan for påføring av baktrykk.	36
4.1	Gjennomførte K'_0 -forsøk for materiale fra Tiller.	43
4.2	Gjennomførte K'_0 -forsøk for materiale fra Esp.	43
4.3	m_{OC} og m_{NC} verdier for kurvene brukt i tolkning av K'_0 -forsøkene.	44
4.4	Resultater fra rutineundersøkelse på materiale fra før og etter konsolidering.	52
5.1	Parametervalg for Tiller- og Espmateriale for teoretiske flyteflater.	57
5.2	OCR-forhold mellom 10 000 års flyteflates og 1- og 24 timers flyteflate.	57
B.1	Resultater fra rutineundersøkelser på Esp-materiale	IX

Symbolliste

LATIN

a	Attraksjon
B	Skemptions poretrykkparameter
D	Deviatorspenning
E	Youngs modul
e	Poretall
F	Sikkerhetsfaktor
f	Mobiliseringsgrad ($f = 1/F$)
I_p	Plastisitetsindeks
K	Volummodulus
K'_0	Forholdet mellom minste- og største effektivspenning
M	Ødometermodulus
M	Stigningstallet for bruddlinjen i et $q - p'$ -plott
m	Modultall
p'	Effektiv middelspenning
p'_c	Prekonsolideringsspenning
$p'_{c, oedo}$	Prekonsolideringsspenning fra ødometerforsøk
p'_0	Effektivspenningstilstand
q	Deviatorspenning
R	Tidsmotstandstallet
r_s	Kryptall
s	Saltinnhold
s_u	Udrenert skjærstyrke
s_r	Omrørt skjærstyrke
S_r	Metningsgrad
S_t	Sensitivitet
t	Tid
t_p	Primær konsolideringstid
u	Poretrykk
V	Volum

V_w	Vannvolum
V_p	Porevolum
w	Vanninnhold
w_P	Plastisitetsgrense
w_L	Flytegrense

GRESK

α	Anisotrope fastningsparameter
γ	Tyngdetetthet
δ	Deformasjon
δ_i	Initialsetninger
δ_p	Primærsetninger
δ_s	Sekundærsetninger
ε	Tøyning
$\dot{\varepsilon}$	Tøyningshastighet
ε_s	Sekundærtøyninger
ε_{vol}	Volumtøyninger
ε_{vol}^c	Volumtøyninger på grunn av kryp
ε_{vol}^e	Elastiske volumtøyninger
μ^*	Modifisert kryppparameter
λ^*	Modifisert indeksverdi for NC deformasjon
κ^*	Modifisert indeksverdi for OC deformasjon
ρ	Friksjonsvinkel for brukslinjen
σ'_1	Største effektivspenning
σ'_3	Minste effektivspenning
σ'_m	Middelspenning
τ	Halve deviatorspenning
φ	Friksjonsvinkel for bruddlinjen

Forkortelser

CAU	Anisotropisk konsolidert, udrenert treaksialtest
CAUC	Aktivt skjærforsøk
CAUC _{creep}	Anisotropisk konsolidert, udrenert, kompresjon, kryptest
CPT	Trykksondering
CPTU	Trykksondering med poretrykksmåling
CRS	Konstant tøyningshastighet i ødomertest
ICL	Intrinsic Compression Line
IL	Trinnvis last i ødomertest
NC	Normalkonsolidert
NGI	Norges Geotekniske Institutt
NGU	Norges Geologiske undersøkelse
NIFS	Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred
NS	Norsk Standard
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
OC	Overkonsolidert
OCR	Overkonsolideringsgrad
SCL	Sedimentation Compression Line
SSC	Soft Soil Creep model
STD	Standard skjærforsøk

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn for masteroppgaven

NIFS, Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred, er et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen, Jernbaneverket og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). Prosjektet består av 7 delprosjekter:

1. Naturskadestrategi
2. Beredskap og krisehåndtering
3. Kartlegging, datasamordning og ROS-analyser
4. Overvåkning og varsling
5. Håndtering av flom og vann på avveie
6. Kvikkleire
7. Skred og flomsikring

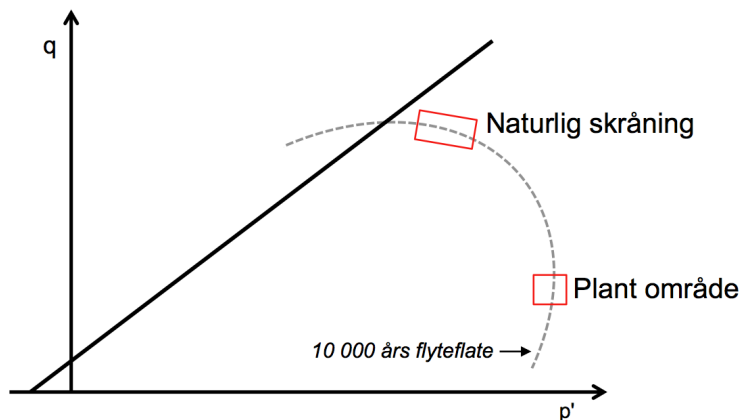
Denne masteroppgaven er knyttet til delprosjekt 6, «Kvikkleire». Dette delprosjektet har som hovedmål å danne et bedre grunnlag for lik praktisering i områder med kvikkleire. Lik praktisering vil blant annet si at tolkningen av grunnundersøkelser, beregninger og utredninger skal basere seg på en mest mulig lik sikkerhetsfilosofi (NIFS, 2013). Det er mange utfordringer knyttet til kvikkleire på grunn av dens spesielle struktur og egenskaper, og det er viktig å behandle materialet riktig for å unngå skred.

Standard for prøvetaking har vært 54 mm stempelprøvetaker. I de senere år har det derimot blitt vanligere å innhente materiale til testing ved hjelp av en blokkprøvetaker (Karlsrud, Otter og Gjelsvik, 2013). Blokkprøver foretrekkes ofte på grunn av den høye prøvekvaliteten og nøyaktigheten på laboratorieresultatene. Resultater fra blokkprøvemateriale viser en høyere målt udrenert skjærstyrke enn ved testing av materiale hentet opp med en 54 mm stempelprøvetaker. Det anbefales i dag en 15 % reduksjon av den målte s_u fra blokkprøver av kvikkleire (NVE, 2011). Bakgrunnen for anbefalt reduksjon ligger i risikoen for sprøbrudd eller svekkelse av materialet på grunn av tidseffekter. Sprøbrudd defineres som et brudd med betydelig reduksjon i styrke ved tøyninger ut over tøyninger ved maksimal styrke, og er karakteristisk for kvikkleire (NVE, 2011). Den målte udrenerte skjærstyrken, s_u , brukes videre i blant annet korrelasjon med CPT (CPTU)-målinger. Det er derfor viktig at verdien av s_u blir evaluert med tanke på bruk til stabilitetsanalyse og sikkerhet for brudd. Tidsavhengige responser i jorden er en av de faktorene som må ses nærmere på ved anvendelse av s_u målt på blokkprøver.

Det er vanskeligere og mer tidkrevende å ta prøver i naturlige skråninger enn på plane områder. Med naturlige skråninger menes i denne sammenhengen en skråning som ikke har blitt utsatt for menneskelig påvirkning. I arbeidet med denne masteroppgaven skal prøver tatt på plane områder brukes til å simulere prøver tatt i naturlige skråninger. Ved å simulere naturlige skråninger som blir belastet eller fysisk endret på, vil det være mulig å evaluere effekten av udrenert skjærkryp i kvikkleire. Etersom spenningstilstanden i to prøver fra henholdsvis et plant og et skrått område vil være forskjellig, vil det være stor forskjell i mobiliseringsgrad for de to prøvene, se figur 1.1. Prøver fra en naturlig skråning er høyt skjærmobilisert, i motsetning til prøver fra et plant område. Mobiliseringsgraden for en naturlig skråning ligger rundt $f=0,83-0,90$. Derfor må spenningstilstanden kartlegges før prøver fra et plant område kan brukes til å simulere prøver fra en skråning.

Det er tidligere forsket på effekten av både drenert og udrenert skjærkryp i sensitive leirer på prøver tatt med 54 mm stempelprøvetaker (Christensen, 1986). I tillegg er det gjort forsøk på evaluering av udrenert skjærkryp på blokkprøver (King, 2013; Torpe, 2013). Eksisterende naturlige skråninger i kvikkleireområder antas å ha stabilisert seg, og i et samfunnsperspektiv er det interessant å se på hvordan disse skråningene skal behandles, og i hvilken grad de kan endres uten at det forårsaker skader.

Ved Esp på Byneset i Trondheim kommune gikk det på morgenen 01.01.2012 et kvikkleireskred med et anslått volum på 300 000 - 350 000 m^3 . Det antas at erosjon var årsaken til skredet (NVE, 2012). Materialet i dette skredområdet er ønsket undersøkt nærmere gjennom NIFS, og skal dermed benyttes til skjærkryp-



Figur 1.1: Prinsippkisse av spenningstilstand for materiale fra horisontalt plan til naturlig skråning.

forsøkene i denne masteroppgaven. Det er tidligere gjort en vurdering av Esp som forsøksfelt, og hvilke lokasjoner som er egnet for opptak av blokkprøver som kan anvendes til skjærkrypforsøk (King, 2013).

1.2 Problemstilling

I denne oppgaven skal forfatter derfor ta for seg prosessen fra prøvetaking fram til og med utført udrenert skjærkrypforsøk. Dette innebærer å finne gode prosedyrer for alle leddene i prosessen. Det skal også ses på muligheten til å vurdere mobiliseringsgraden av s_u i de tilfellene der en blokkprøve går til krypbrudd.

For å kunne gjennomføre udrenerte skjærkrypforsøk som vil gi et grunnlag for å kunne besvare problemstillingen, må spenningstilstanden for en naturlig skråning kartlegges. Dette gjøres ved å bestemme materialets in situ spenninger og flyteflate. For å finne materialets flyteflate må det gjennomføres K'_0 -forsøk (se del 3.5.1 for nærmere beskrivelse) med ulike K'_0 -verdier og ulike trinntider. Ut fra resultatene fra K'_0 -forsøkene kan flyteflater skisseres, og prøver fra plane områder kan konsolideres til den spenningstilstanden som tilsvarer spenningstilstanden i prøver fra naturlige skråninger.

Oppgavens læringsmål er beskrevet med følgende punkter:

- Gi et sammendrag av prosessene involvert i kryp
- Teste og etablere prosedyrer for utførelse av trinnvise K'_0 -forsøk på kvikkleire i treaksialapparat
- Fra K'_0 -forsøkene skal det etableres flyteflater for det testede materialet. Disse skal brukes for å estimere 10 000 års flyteflate og relevant konsolideringsnivå for utførelse av udrenerte skjærkrypforsøk
- De eksperimentelle flyteflatene skal sammenlignes med teoretiske flyteflater
- Det skal etableres en prosedyre for å konsolidere en prøve skånsomt til en høy skjærmobilisering relevant for en naturlig skråning
- Det skal undersøkes hvorvidt prøvematerialet påvirkes når den konsolideres fra in situ tilstand til den relevante spenningstilstanden

1.3 Oppgavens disposisjon

Denne masteroppgaven er disponert på følgende måte. Kapittel 2 tar for seg teori som er relevant for problemstillingen. Teoridelen er igjen delt opp i flere deler som omhandler flyteflater, kryp og krypprosessen samt blokkprøveteorier. Etter det er et lengre kapittel som tar for seg en grundig beskrivelse av forsøksprosessen, planlagt utførelse og de utførte forsøkene. Deretter, i kapittel 4, er resultatene fra de utførte forsøkene presentert. I diskusjonsdelen blir resultatene fra resultatkapitlet tolket, vurdert og diskutert, før det er presentert en kort konklusjon i kapittel 6. I kapittel 7 er det skrevet om anbefalinger ved videreføring av arbeidet gjort i denne masteroppgaven.

Kapittel 2

Teori

Innholdet i dette kapitlet er ment å gi leseren en oversikt over tema som er relevant for oppbyggingen av problemstillingen og prosessen med å besvare denne. Alle aspekter er derfor ikke like grundig beskrevet. All teori tar utgangspunkt i leire om ikke annet er oppgitt.

Når naturlige skråninger går til brudd, er det et resultat av kombinasjonen av variasjon i effektivspenningen og den tidsavhengige responsen i materialet. En variasjon i effektivspenning oppstår på grunn av ulike faktorer, som poretrykksvariasjon eller en endring i rammebetingelsene til skråningen. En slik endring i rammebetingelsene kan være erosjon, grunnvannstandsending eller varierende vannstand som motvekt i bunn av skråningen (Tavenas mfl., 1978). Videre teori vil fokusere på tidsavhengige utfordringer ved naturlige skråninger, og spesielt krypeffekten.

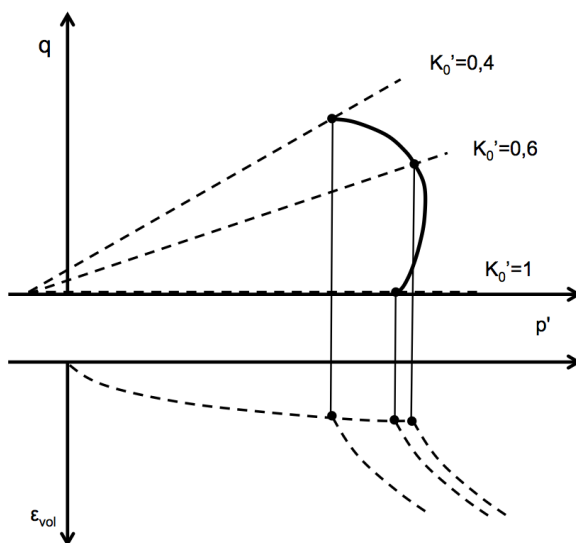
2.1 Prekonsolideringsspenning

En leires struktur og mekaniske oppførsel er et produkt av flere faktorer. Sedi-
menteringsmiljø, aldring og utvasking er noen av disse faktorene. Dette medfører at hvert enkelt materiale som blir testet i laboratoriet kan ha en unik struktur og mekanisk oppførsel. Dette gjør at tilsynelatende like materialer kan oppføre seg ulikt ved samme behandling (Leroueil mfl., 1979).

Prekonsolideringsspenningen, p'_c , sier mye om en leire og er en av de viktigste parameterne for å anslå deformasjon av et leirmateriale (Länsivaara, 1999). p'_c er

definert som den største spenningsverdien materialet har blitt utsatt for, gjennom sin historie. Den markerer overgangen mellom materialets overkonsoliderte (OC) område og normalkonsoliderte (NC) område. p'_c er også en parameter bruk i ødometerettest om det punktet der materialet begynner å flyte, altså der materialet begynner å pådra seg store plastiske tøyninger. Dette spenningspunktet blir kalt flytepunktet eller *yielding point*. (Wood, 1990). p'_c er en relativ størrelse og er en funksjon av flere parametere som blant annet tøyningshastighet, tid og temperatur. Den vanligste måten å finne p'_c på, er ved ødometerforsøk. Da benyttes vanligvis enten konstant tøyningshastighet, CRS, eller trinnvis last, IL.

2.1.1 Flyteflate

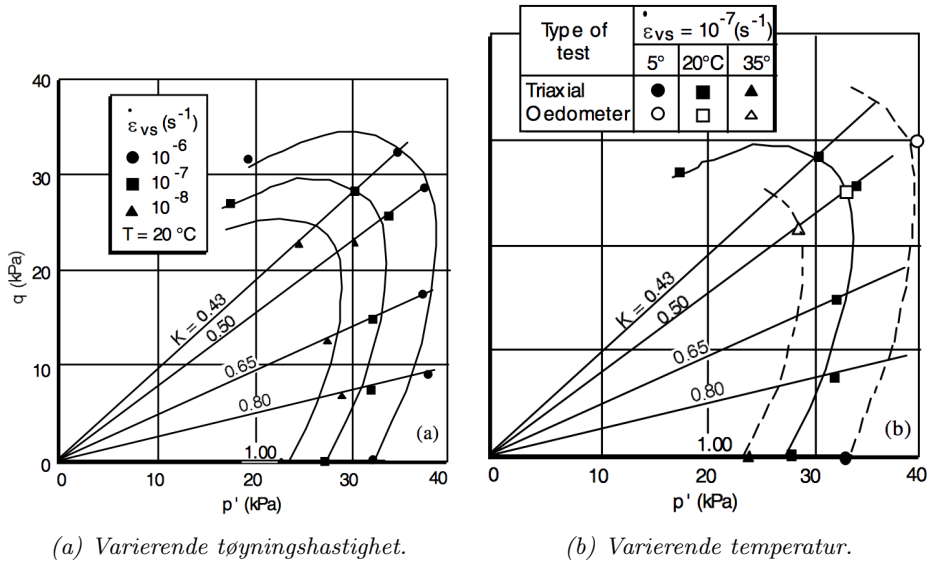


Figur 2.1: Skissering av flyteflate plottet fra prekonsolideringsspenninger funnet ved K'_0 -forsøk. I nederste del av figuren er volumtøyningene plottet mot p' . Ulike K'_0 verdier gir forskjellige punkter, p' , der kurven går fra elastisk til plastisk oppførsel. Disse p' -verdiene plottes deretter mot q som vist i den øverste delen av figuren (Nordal, 2013b).

Flyteflate er definert som en todimensjonal spenningstilstand med samme betydning som at prekonsolideringsspenningen er endimensjonal (Länsivaara, 1999). En flyteflate for en leire er skissert i figur 2.1. Ulike prekonsolideringsspenninger er funnet ved K'_0 -forsøk og plottet i et $q - p'$ -diagram, der $K'_0 = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ og $p' = \frac{1}{3} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$. Ved å trekke en linje mellom p'_c -verdiene finner man

flyteflaten for materialet. K'_0 -forsøk vil bli nærmere beskrevet i del 3.5.1.

Siden flyteflaten er knyttet til p'_c er også flyteflaten relativ og avhengig av de samme faktorer som p'_c . Dette har blant annet Boudali vist i sin doktorgradsavhandling (Boudali, 1995). Figur 2.2 viser flyteflater for ulike 2.2a) tøyningshastigheter og 2.2b) temperaturer. Figuren viser hvordan flyteflaten flytter seg mot høyre ved økende tøyningshastighet og temperatur. Dette betyr at materialet viser en sterkere oppførsel og tåler mer.



Figur 2.2: Flyteflater skissert ved ulike forsøksfaktorer (Boudali, 1995).

2.1.2 Teoretiske flyteflater

Hvis formen på en flyteflate for en gitt trinntid er kartlagt, er det teoretisk mulig å finne beliggenheten til flyteflaten for en annen trinntid. Det teoretiske forholdet mellom flyteflatene er etablert ved at matematiske likninger er tilpasset de observerte resultatene fra laboratorie- og felttester.

Likningen 2.1 og 2.2, brukt i Soft Soil Creep-modellen (SSC model), viser sammenhengen mellom effektivspenningstilstanden, p'_0 , prekonsolideringsspenningen, p'_c og volumetrisk krep ε_c , og sier noe om kryphastigheten (Degago og Grimstad, 2014; Nordal, 2013a).

$$\Delta \varepsilon_c = \mu^* \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad (2.1)$$

$$\Delta \varepsilon_c = (\lambda^* - \kappa^*) \cdot \ln \frac{p'_c}{p'_0} \quad (2.2)$$

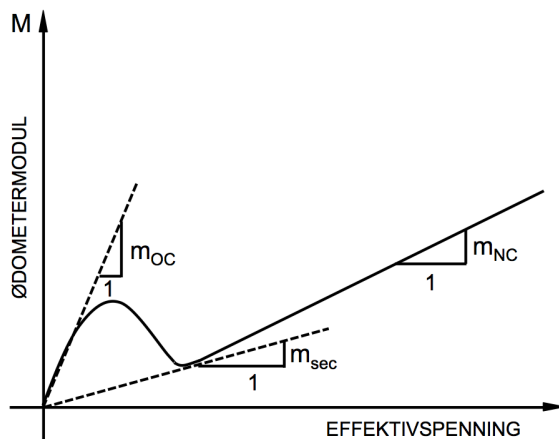
Ved å kombinere disse likningene, fås likning 2.3 og 2.4.

$$\mu^* \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_0} = (\lambda^* - \kappa^*) \cdot \ln OCR \quad (2.3)$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \left(\frac{1}{OCR} \right)^{\frac{r_s}{m_{sec}}} \quad (2.4)$$

Hvor $OCR = \frac{p'_c}{p'_0}$, $\mu^* = \frac{1}{r_s}$ er modifisert kryppparameter, λ^* og κ^* er modifisert indeksverdi for henholdsvis NC- og OC deformasjon (se figur 2.8a) og gir $(\lambda^* - \kappa^*) = \frac{1}{m_{sec}}$, da verdien av κ^* er så liten i forhold til λ^* at den kan neglisjeres. τ_0 er referansetid og svarer til $OCR=1$, mens τ er tid som svarer til OCR .

Når de nødvendige parameterene er kjent, kan flere flyteflater for samme materiale estimeres. Parameteren r_s er vist i figur 2.16, og m_{sec} er vist i figur 2.3.



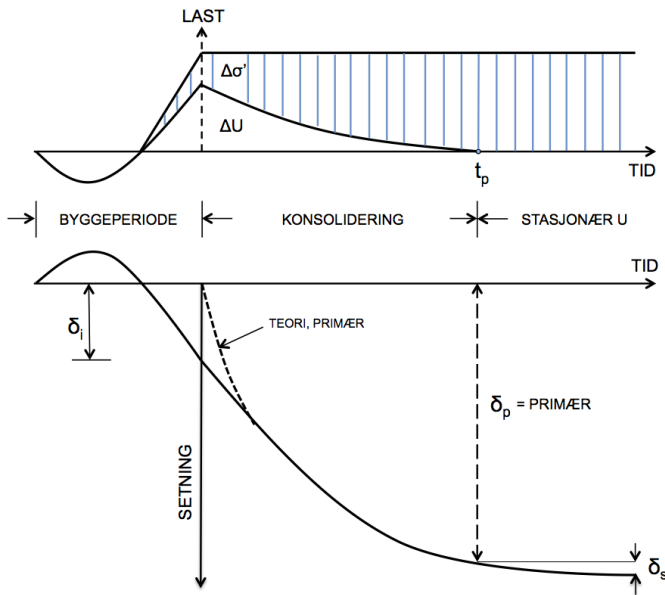
Figur 2.3: Diagram med parametre m_{OC} , m_{NC} og m_{sec} , funnet fra ødometerforsøk (Sandven, 2012).

2.2 Krypteori

Kryp er et fenomen som har vært omtalt og forsket på i flere tiår (Bjerrum, 1967; Campanella og Vaid, 1974; Casagrande og Wilson, 1951; Singh og Mitchell, 1968; Vaid og Campanella, 1977). Hvordan kryp påvirker materialets egenskaper, hva som påvirker kryp og kryphastigheten, samt hvordan man tar høyde for kryp ved byggeprosjekt er noen av tingene som har fått mer fokus opp gjennom årene.

2.2.1 Deformasjon

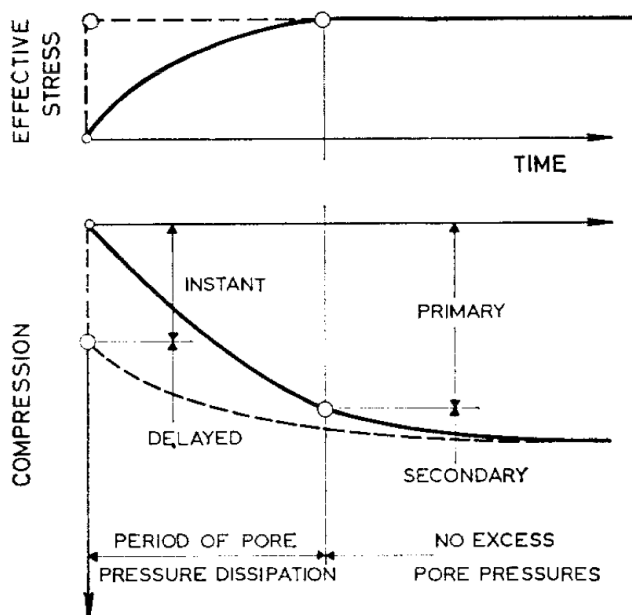
Lang tids deformasjoner av jord, setninger, deles opp i initial-, primær- og sekundærsetninger, se figur 2.4. Initialsetning, δ_i , kommer av skjærtøyninger og formendringer og er elastiske eller plastiske deformasjoner som opptrer umiddelbart etter belastning. Primærsetninger, δ_p , er setninger som skyldes full poretrykksutjevning ved utpressing av porevann etter pålasting. Dette er en prosess som tar kort tid i permeable materialer som sand og grus, og lengre tid i mindre permeable materialer som silt og leire (Vegvesen, 2010).



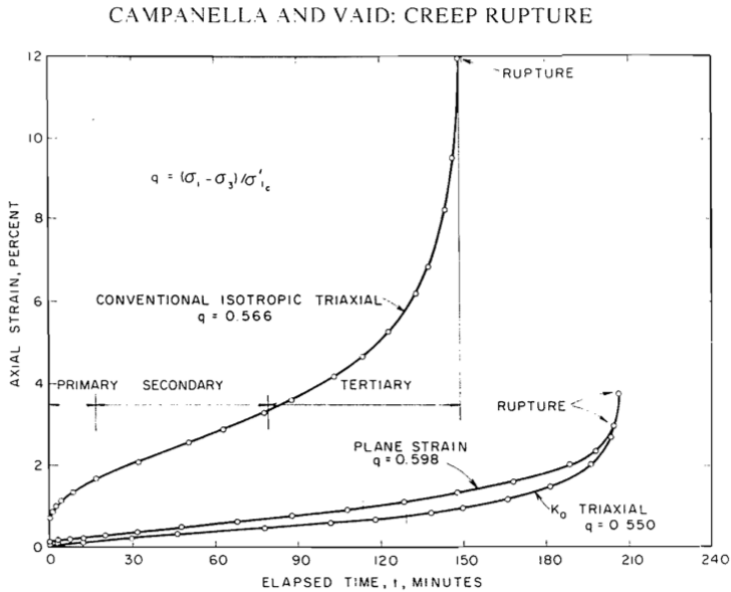
Figur 2.4: Prinsippkisse av setnings- og tidsforløp for en drenert tilstand for pålasting av et materiale (Janbu, 1989).

2.2. KRYPTTEORI

Sekundærsetninger (δ_s), også kjent som kryp, er en prosess som ved lang tids konstant effektivspenning påvirker materialet ved nedbrytning av mekaniske og fysiske effekter i og mellom mineralpartiklene (Emdal, 2009; Vegvesen, 2010). På grunn av krepfenomenet kan dermed deformasjoner forekomme etter lang tid, selv om spenningstilstanden er konstant og poreovertrykket er utlignet (Emdal, 2009). Fordi fasene med primær- og sekundærsetninger overlapper hverandre er det vanskelig å definere overgangen mellom de to setningene (Christensen, 1986). Bjerrum innførte begrepene *instant*, umiddelbar, og *delayed*, forsinket for å lettere forklare deformasjon på grunn av kryp (Bjerrum, 1967). Figur 2.5 viser sammenhengen mellom disse begrepene og de mer brukte primær- og sekundær deformasjon. Hvis man tar utgangspunkt i at dreneringsveien er neglisjerbar ved et hvilket som helst krypforsøk kan man anta at endringen i effektivspenningene virker inn umiddelbart ved belastning. Det vil si at den første endringen i deformasjon kun er linket til endringen i effektivspenningene, mens den forsinkede deformasjonen kun er knyttet til kryp. Denne inndelingen gjør det lettere å skille hvilke deformasjoner som skyldes kryp, enn om en benytter primær og sekundær deformasjon.



Figur 2.5: Instant og delayed deformasjon sammenlignet med primær og sekundær deformasjon (Bjerrum, 1967).



Figur 2.6: Her er det vist kryptoppførsel ved ulike konsolideringsmetoder, både isotropisk, anisotropisk og ved plantøyingsforhold (Campanella og Vaid, 1974).

2.2.2 Påvirkning av krypt

Kryptutviklingen påvirkes av blant annet forhold som konsolideringsmetode, temperatur, skjærspenninger, dreneringsforhold og leirens materialegenskaper.

Campanella og Vaid har undersøkt hvordan ulike konsolideringsmetoder påvirker utviklingen av krypt (Campanella og Vaid, 1974). De utførte kryptester på prøver i laboratoriet konsolidert under isotropisk, anisotropisk (K_0 -konsolidering) og plan tøyning, men med like vertikale effektivspenninger. Testene ble utført på en marin, mett, uforstyrret NC leire. Forsøkene viste at kryptkurven for anisotropisk konsolidering ble svært forskjellig fra kryptkurven for isotropisk og plan tøyning konsolidering, se figur 2.6. Den oppnådde aksielle tøyningen ved brudd var 4-5 ganger så stor ved isotropisk konsolidering som ved konsolidering under plan tøyning (Campanella og Vaid, 1974).

Ved temperaturøkning skjer en økning i poretrykk. Ved udrenert kryptforsøk er det endringen i poretrykket som bidrar til kryptbrudd, og dermed er en økning i temperatur en pådriver for kryptbrudd. I tillegg påvirker leirens egenskaper, som struktur og porøsitet. Disse egenskapene avgjør hvor fort materialet takler

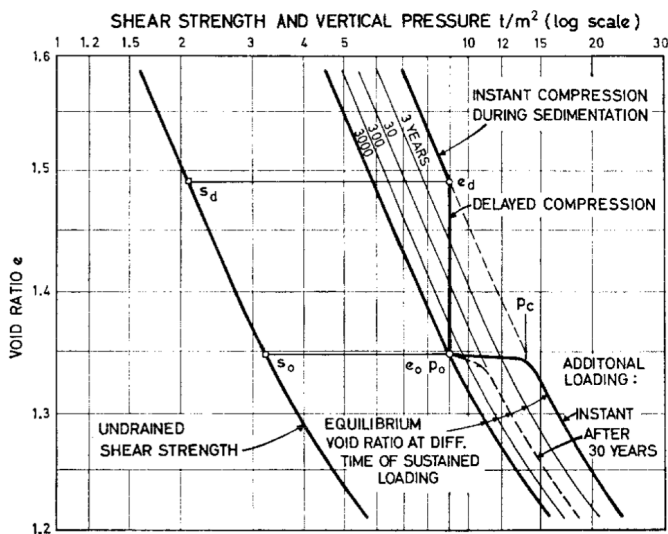
volumforandringer, noe som er vesentlig for utviklingen av kryp. Utviklingen av krypbrudd avhenger av hvilke skjærspenninger leiren blir utsatt for, ettersom man kommer nærmere bruddtaket ved økende skjærspenninger (Fredriksen, 1983).

2.3 Krypprosessen

I et udrenert krypforsøk vil det være ulike effekter som påvirker utviklingen av krypkurven. Effekter som destruktering og kryp i seg selv, er i mer eller mindre grad med på denne utviklingen. For å si noe om utviklingen, må definisjonen av hvordan destruktering og kryp påvirker krypkurven gjøres rede for.

2.3.1 Effekten av kryp på et materiale

Hvordan krypeffekten påvirker egenskapene til et material er et tema som har vært forsket på i mange år (Bjerrum, 1967; Casagrande og Wilson, 1951; Tavenas mfl., 1978). I denne oppgaven har forfatter valgt å ta utgangspunkt i Bjerrums teori om instant og delayed deformasjon for å se nærmere på hvordan kryp påvirker styrkeegenskapene til et materiale.



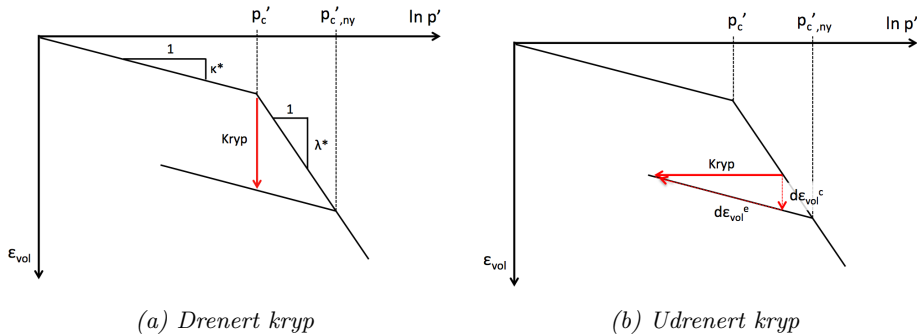
Figur 2.7: Instant og delayed deformasjon sett i sammenheng med den udrenerte skjærstyrken, og hvordan kryp gir en større s_u (Bjerrum, 1967).

En drenert krypsituasjon er skissert i figur 2.7, der det er tegnet inn forklaringen av instant og delayed deformasjon. Det beskrives en sammenheng mellom kryp, i figuren vist som delayed deformasjon til høyre, og den udrenerte skjærstyrken, vist som kurve til venstre. Når materialet kryper fra e_d til e_0 , vises det at det samtidig skjer en økning i udrenert skjærstyrke fra s_d til s_0 .

En forenklet skisse av en drenert prøve som kryper, er vist i figur 2.8a i et $\ln p' - \varepsilon_{\text{vol}}$ diagram. Økningen i volumtøyninger forekommer selv om effektivspenningene er konstante og dette gjør at materialet får en ny, høyere prekonsolideringsspenning ($p'_{c,ny}$). For udrenert kryp ser kurven annerledes ut, se figur 2.8b. Ved udrenert kryp tillates ikke volumtøyninger ettersom porevannet ikke får forlate prøven. Prøven ønsker å endre seg, og vil derfor få en plastisk volumtøyning, som også kan kalles kryp volumtøyninger, $d\varepsilon_{\text{vol}}^c$. Samtidig vil en elastisk volumtøyning, $d\varepsilon_{\text{vol}}^e$, prøve å kompensere slik at total volumtøyning forblir uendret, se likning 2.5:

$$d\varepsilon_{\text{vol}} = d\varepsilon_{\text{vol}}^e + d\varepsilon_{\text{vol}}^c = 0 \quad (2.5)$$

Som vist i figur 2.7 og 2.8a øker den udrenerte skjærstyrken og prekonsolideringsspenningen for drenert kryp. For udrenert kryp vises det i figur 2.8b hvordan prekonsolideringsspenningen øker.



Figur 2.8: En forenklet forklaring på effekten av kryp der den øker prekonsolideringsspenningen. Figur a) viser den drenerte effekten, mens figur b) viser den udrenerte.

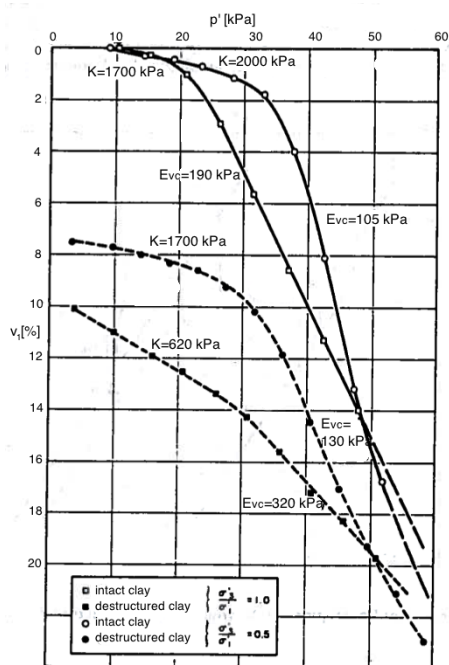
2.3.2 Effekten av destruktering på et materiale

Destrukturering vil si en endring i struktur og/eller bindinger i et materiale. Destrukturering kan oppstå under volumtøyninger eller skjærtøyninger, ettersom

2.3. KRYPPROSESSEN

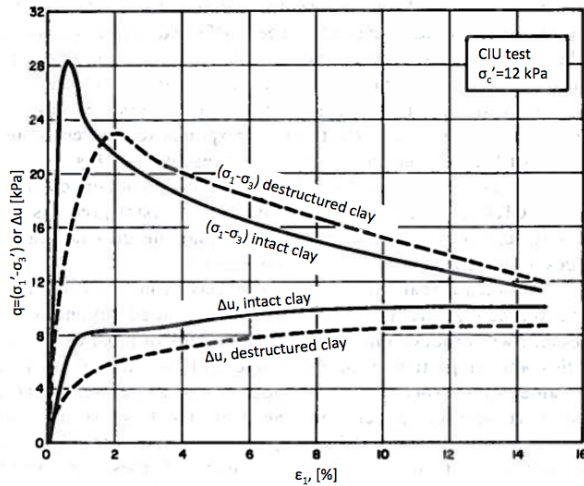
tøyningene påvirker strukturen i materialet. Leroueil mfl. har testet effekten av destruktivering for å se hvordan strukturen påvirker egenskapene til et materiale (Leroueil mfl., 1979).

En destrutturert prøve ble laget ved å først konsolidere prøven i 36 timer, for deretter å avlaste den i 24 timer og tilslutt la prøven swelle. De destrutturerte prøvene ble deretter testet opp mot de uforstyrrede prøvene. I figur 2.9 vises forskjellen på en destrutturert og uforstyrret prøve i et $p'-v$ -plott, der volummodul, K , i det OC-området har blitt redusert fra 1700 til 620 kPa for $K'_0=1$. I tillegg har E_{vc} økt i NC-området. Skjærstyrken i et destrutturert materiale er lavere enn i et uforstyrret materiale, som vist i figur 2.10. Leroueil mfl. konkluderte med at både prekonsolideringsspenningen, skjærstyrken og bruddflaten blir påvirket av strukturen i materialet.



Figur 2.9: Konsolideringsforsøk på uforstyrret og destrutturert materiale (Leroueil mfl., 1979).

For å beskrive egenskaper til omrørt leire, der leirens struktur og bindinger er fjernet, innførte Burland et nytt begrep, *intrinsic* (Burland, 1990). Intrinsic egenskaper blir brukt om egenskapene til en omrørt leire med et vanninnhold i området



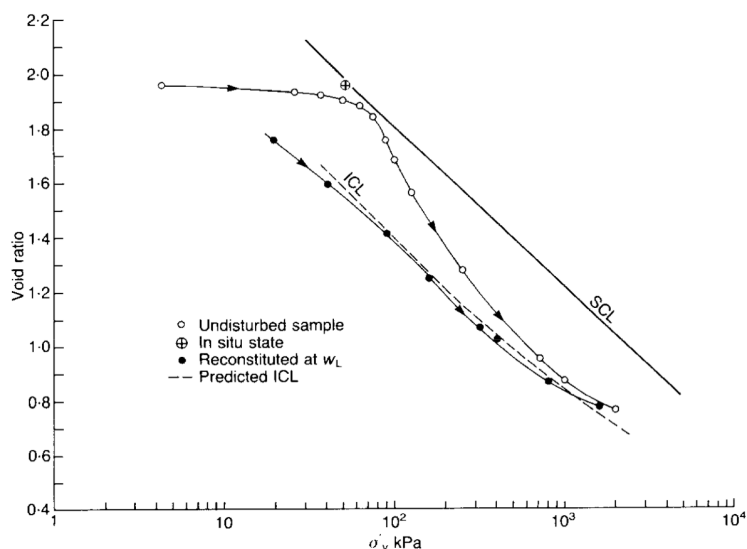
Figur 2.10: CIU forsøk på uforstyrret og destrutturert materiale (Leroueil mfl., 1979).

$w_L < w < 1,5w_L$. Begrepet kan sammenlignes med destrukturing, da det er et begrep som tar for seg materialets iboende egenskap og hvordan strukturen og bindingene påvirker materialets oppførsel. Ved å sammenligne egenskaper fra intrinsic og uforstyrret materiale er det mulig å anslå virkningen av strukturen og bindingene i det uforstyrrede materialet. Figur 2.11 viser resultatet av et ødometerforsøk gjort på både omrørt og uforstyrret materiale (Burland, 1990). Kurvene viser at den uforstyrrede prøven har en høyere p'_c enn den omrørte prøven, mens den uforstyrrede prøven en lavere styrke enn den omrørte etter at p'_c er nådd. Inntegnet på figur 2.11 er i tillegg linjene ICL, Intrinsic Compression Line, og SCL, Sedimentation Compression Line som er innført av Burland. Disse linjene vil ikke bli forklart noe nærmere, da dette ikke er relevant for det som presenteres i dette avsnittet.

Den beskrevne forskningen viser at destrukturing svekker materialets styrke.

2.3.3 Tiksotropi

Tiksotropi er definert ved et materials tap av viskositet under skjær, og den etterfølgende materials evne til å gjenvinne den tapte viskositeten når strømmingene i materialet opphører. Dette vil si at tiksotropi, i likhet med krypeffekten, er med på å styrke materialet (Mewis, 1979). Effekten av tiksotropi er omdiskutert, og ikke alle er like enige om dens eksistens ved et krypforsøk.



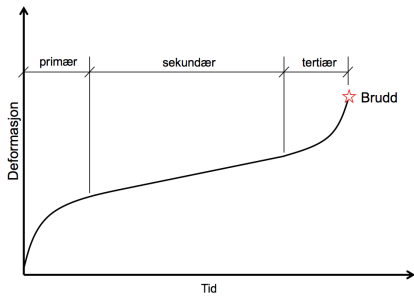
Figur 2.11: En ødometertest gjort på bløt leire fra Bothkennar, Skottland, både uforstyrret og omrørt prøve ($w_L=85,4\%$ og $w_P=41,0\%$) (Burland, 1990).

2.3.4 Stabilt eller ustabilt kryppforsøk

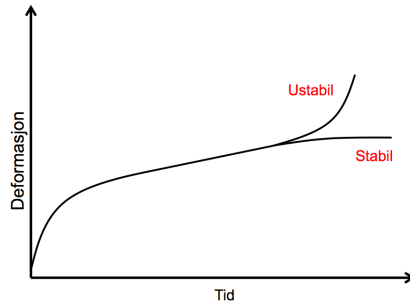
Et udrenert kryppforsøk har forskjellige faser, som vist i figur 2.12. Fasene kalles primær-, sekundær- og tertiærkryp, der primærfasen defineres ved at tøyningshastigheten avtar og sekundærkryppfasen ved at tøyningshastigheten er konstant. Tertiærkryppfasen er den fasen der tøyningshastigheten øker og tilslutt ender i et kryppbrudd. Ikke alle kryppforsøk kommer til den tertiære fasen, der tøyningshastigheten øker. Da stabiliserer kryppforsøket seg i sekundærfasen og prøven går aldri til kryppbrudd. Det skiller en stabil situasjon og en ustabil situasjon, se figur 2.13.

Som nevnt tidligere, er destruktering og kryp med å påvirke om et udrenert kryppforsøk forblir stabil i sekundærfasen eller går over til å bli ustabil og ende opp i kryppbrudd.

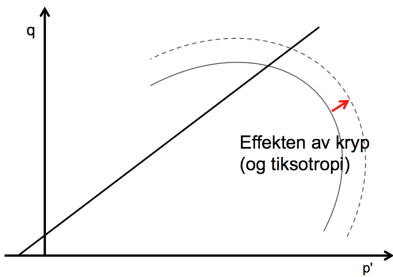
Krypeffekten, destruktering og muligens tiksotropi opptrer samtidig, og hvilken effekt som er den dominerende avgjør om materialet svekkes eller styrkes, se figur 2.14 og 2.15. Hva som er den dominerende effekten avhenger av i hvilken grad materialet utsettes for skjær, altså hvor høyt mobilisert materialet er.



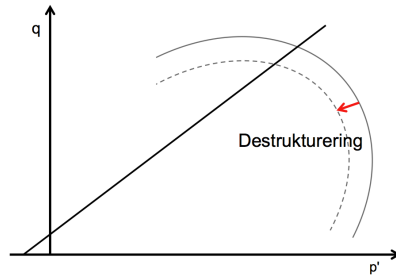
Figur 2.12: Grafisk fremstilling av primær, sekundær og tertier krep.



Figur 2.13: Skisse av stabil/ustabil udrenert krepkurve.



Figur 2.14: En forenklet skisse av effekten krep har på flyteflaten.



Figur 2.15: En forenklet skisse av effekten destrukturering har på flyteflaten.

2.4 Beregning av krypdeformasjon og tøyningshastighet

2.4.1 Janbus metode

Det finnes flere metoder for å beregne deformasjon som følge av kryp. Den mest brukte i Norge er Janbus metode. Denne metoden tar utgangspunkt i motstanden i et materiale for å forklare setninger. Med motstand menes i denne sammenhengen forholdet mellom årsaksendringen og virkningsendringen. Ved å måle virkningen av en kjent, påtvungen årsak er det mulig å finne motstanden (Janbu, 1989).

Tidsmotstanden, R , i jord bestemmes ved ødometerforsøk og er definert ved likning 2.6:

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon_s} = r_s(t - t_r) \quad (2.6)$$

Sekundærtøyningene, ε_s , beregnes med likning 2.7:

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

De resulterende sekundærsetningene, δ_s , beregnes med likning 2.8:

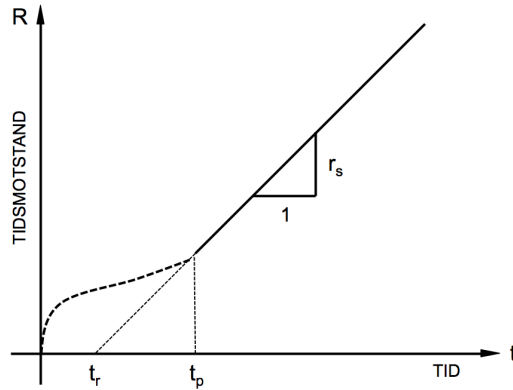
$$\delta_s = \int_0^H \varepsilon_s dH \quad (2.8)$$

Hvor H er høyden på jordlaget, t_p er tid til primærsetningene er avsluttet, t er tid etter t_p , og r_s og t_r er tidsmotstandstall som alle bestemmes ved ødometerforsøk, se figur 2.16.

2.4.2 Singh og Mitchells metode

I tillegg til Janbu har Singh og Mitchell utviklet en alternativ metode for beskrivelse av kryp. De utviklet en generell beskrivelse av krypkarakteristikk for jord som;

- kunne brukes på forskjellige jordtyper



Figur 2.16: Tidsmotstandkurve (Janbu, 1989).

- var gjeldene for både lineære og kurvede forhold mellom tøyning og tid
- inneholdt parametere som var lett å bestemme

Ut fra dette har de utledet to likninger (2.9 og 2.10) for to kurvetyper, $\dot{\epsilon}$ -logtid og $\dot{\epsilon}$ - D , se figur 2.17 og 2.18 (Fredriksen, 1983; Singh og Mitchell, 1968).

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln \dot{\epsilon}(t_1, D) - m * \ln \frac{t}{t_1} \quad (2.9)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln \dot{\epsilon}(t, D_0) + \alpha D \quad (2.10)$$

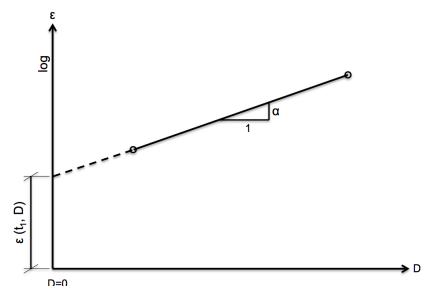
Hvor D er deviatorspenningen, $\dot{\epsilon}$ er tøyningshastigheten ved t , m er stignings-tallet på kurven i figur 2.17, α er stigningstallet på kurven i figur 2.18 og t_1 er referansetid (f.eks. 1 min).

Ved å kombinere ligning 2.9 og 2.10 fås likningen for tøyning ved kryp:

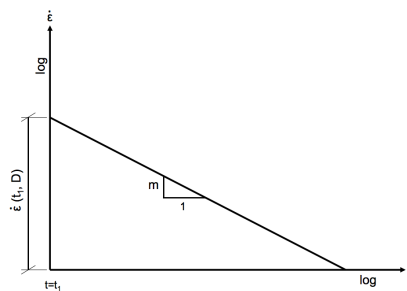
$$\dot{\epsilon} = A e^{\alpha D} \left(\frac{t}{t_1}\right)^m \quad (2.11)$$

Likning 2.11 viser at for å kunne beregne tøyningene ved kryp trengs paramete-rene A , α og m , der A er tøyningshastigheten ved t_1 og $D=0$. Disse parameterene finner man ved hjelp av to kryptester.

Fredriksen gjorde en sammenligning av de to metodene i sin diplomoppgave (Fredriksen, 1983). Det ble bevist at ved $m=1$ er likningene for kryp like for begge



Figur 2.17: $\dot{\epsilon}$ -log t kurve som brukes ved beregning av kryptøyning i Singh og Mitchells metode (Fredriksen, 1983).



Figur 2.18: $\dot{\epsilon}$ - D kurve som brukes ved beregning av kryptøyning i Singh og Mitchells metode (Fredriksen, 1983).

metodene, hvis en ser bort fra t_r . Ingen av modellene ble beskrevet som bedre enn den andre.

2.5 Blokkprøvet teori

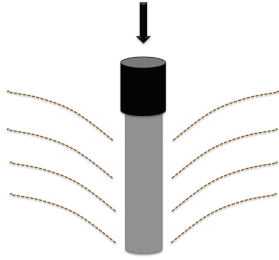
I de senere årene er det blitt vanligere å ta prøver med blokkprøvetaker i stedet for stempelprøvetaker. Årsaken til dette er den gode prøve kvalitet ved store dybder, og i sensitive og lavplastiske leirer (Karlsrud mfl., 2013). Dette kapitlet skal belyse forskjellen mellom blokkprøver og stempelprøver, og hvordan dette påvirker videre beregninger som tar utgangspunkt i resultatet fra disse prøvene.

2.5.1 Prøvetaking

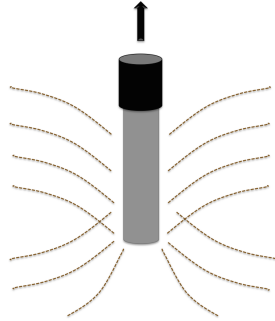
Figur 2.19, 2.20 og 2.21 viser forenklede skisser av prøvetaking med henholdsvis stempel- og blokkprøvetaker. Ved stempelprøvetaking presses prøvetakeren ned til ønsket dybde der en sylinder løses ut og presses med konstant hastighet nedover, se figur 2.19. Deretter løsnes materialet i bunn ved rotasjon eller strekk og sylindren føres rolig oppover igjen, se figur 2.20. Ulempen med denne metoden er at når prøvesylindren presses nedover dyttes jorden også nedover og det samme skjer når prøven trekkes opp, da jorden blir dratt med oppover. Denne stakingen og strekkingen under prøvetakingen samt utskyvningen av prøven i laboratoriet fører til at materialet blir forstyrret, noe som vil påvirke prøveresultatene.

Blokkprøver blir tatt ved at blokkprøvetakeren roterer samtidig som den presses nedover, se figur 2.21. Tre kniver kutter jorden samtidig som det spyles kontinu-

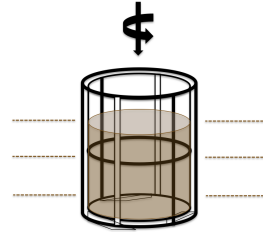
erlig med vann. Bunnen av prøven kuttet ved hjelp av tre kniver som løses ut i bunn av prøvetakeren. Prøven hviler på disse knivene mens den blir ført rolig opp igjen. Denne metoden utføres slik at prøven forblir uforstyrret (Karlsrud mfl., 2013).



Figur 2.19: Stempel ned.



Figur 2.20: Stempel opp.

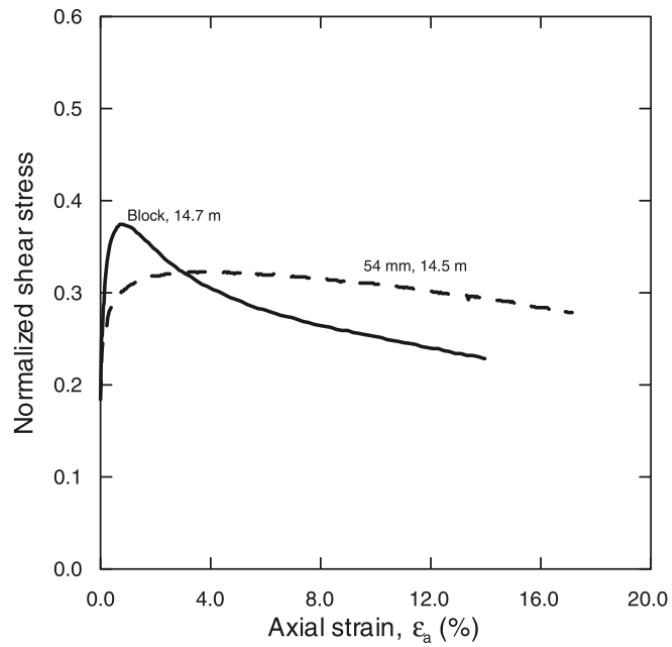


Figur 2.21: Blokk ned.

2.5.2 Prøveforstyrrelse

Da de ved University of Sherbrooke i Canada i løpet av 1970-tallet utviklet den første blokkprøvetakeren, ble det høyaktuelt å sammenligne prøver tatt med denne blokkprøvetakeren, og den ordinære stempeltakeren. Lunne, Berre og Strandvik gjorde en studie der de sammelignet forskjellige styrkeparametere med materiale fra både blokkprøvetaker, 54 mm stempel og 75 mm japansk stempelprøvetaker. Resultatene viste at blokkprøvene var overlegne, og viste et mer korrekt bilde av egenskapene til materialet, se figur 2.22 (Lunne, Berre og Strandvik, 1997). Når den udrenerte skjærstyrken, s_u , målt fra blokkprøve brukes til beregning av stabilitet, må det vurderes om blant annet tidseffekter må tas hensyn til. Dette har ikke vært vanlig da s_u målt på stempelprøve har en innbakt styrkereduksjon på grunn av at materialet er forstyrret. s_u til et material brukes blant annet i korrelasjon med CPT og CPTU, og det er derfor viktig å tenke over bruken av s_u direkte, fått fra blokkprøver.

Selv om blokkprøvetaking er mer vanlig nå enn tidligere og gir en betydelig bedre prøve kvalitet, er 54 mm stempelprøvetakeren fortsatt i bruk. Grunnen til dette er blant annet at 54 mm prøvetakeren er rimeligere å bruke, mer effektiv i felten og at systemene i laboratoriet er tilpasset prøvetakeren. I tillegg gir prøver fra 54 mm stempelprøvetakeren akseptable resultater.



Figur 2.22: Eksempel fra Berre mfl. (2007) som viser forskjellen på blokkprøve og 54 mm prøves skjærstyrke. Normalisert skjærspenning er skjærspenning dividert med σ_{vo} (Berre mfl., 2007).

Kapittel 3

Beskrivelse av forsøksprosessen og utførte forsøk

I dette kapittelet blir det tatt for seg en beskrivelse av materialene og hvilket utstyr som er brukt til testingen, hvordan selve forsøkene er gjennomført og hvilke forsøksparametere som er vurdert i denne sammenhengen.

3.1 Prøvetaking

Ved innsamling av prøver til forsøkene er det benyttet en blokkprøvetaker, NTNUs MiniBlokk. Denne gir gode og uforstyrrede prøver med diameter 160 mm og maks høyde på 300 mm. MiniBlokk er praktisk i bruk med en borerigg, og gjør opptakingsprosessen effektiv. Bilder fra prøvetakingen er vist i figur 3.1 og 3.2. På prøvetidspunktet var det ikke frost i bakken, kun et lite snølag.

Etter at prøvene ble tatt opp ble de pakket inn og transportert til NTNU, der de ble plassert i et kjølerom for oppbevaring. Det var viktig at materialet ble behandlet med forsiktighet under hele prøvetakingprosessen og transporten, da dette er avgjørende for en god kvalitet på materialet.



Figur 3.1: Blokkprøvetaking på Esp med NTNUs MiniBlokk.



Figur 3.2: MiniBlokk i bruk med en borerigg.

3.2 Materialbeskrivelse

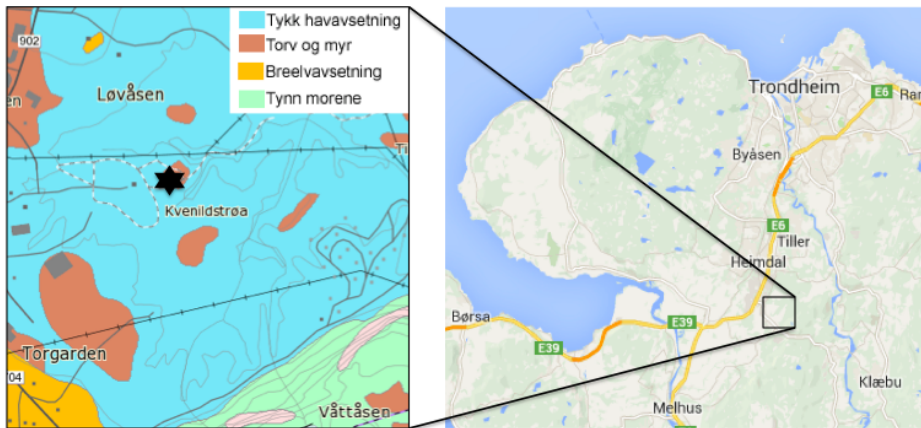
Utgangspunktet for oppgaven er den vesentlige forskjellen i de målte styrkeparameterne fra blokkprøve og stempelprøve. For å få et optimalt utgangspunkt var det derfor viktig at prøvene var fra blokkprøver og av god kvalitet. Kvaliteten på materialet kan sjekkes ved å se på utpresset porevann under konsolideringen samt kurven under utført ødometerforsøk. Ettersom prøver fra blokkprøvertakere gir flere teststykker fra samme dybde, kan resultatene for disse prøvene sammenlignes direkte. For problemstillingen i denne masteroppgaven er det vesentlig at materialet som benyttes i forsøkene er kvikkleire. Kvikkleire defineres ut fra flere kriterier som måles i laboratoriet (Emdal, 2009):

- omrørt skjærstyrke, $s_r < 0,5 \text{ kPa}$
- sensitivitet, $S_t > 30$

Det er derfor brukt materiale fra Tiller og Esp, på Byneset, som er kjente kvikkleireområder og har vist seg egnet til formålet. For en total oversikt over de forskjellige prøvedatoene og annen informasjon om forsøkene, se vedlegg A.

3.2.1 Tiller

Tiller-materialet er hentet den 23.08.13 fra Tiller, som ligger ca 10 km sør for Trondheim, se figur 3.3. NGUs lømassekart viser at Tiller ligger i et område med tykk havavsetning der kvikkleire er påvist (NGU, 2014). Materialet er tidligere klassifisert som en sensitiv leire med lav plasititet. Det er i tillegg noe overkonsolidert. Noen av de viktigste verdiene er gjengitt i tabell 3.1 (Gylland mfl., 2013).



Figur 3.3: Kart som viser prøvetakingbeliggenheten fra Tiller ((NGU, 2014) og (Google, 2014)).

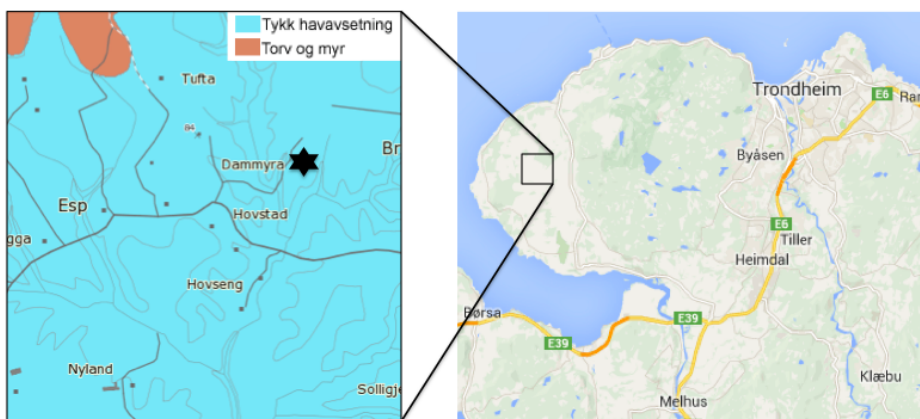
Tabell 3.1: Gjennomsnitt indeksverdier for Tiller-materiale (Gylland mfl., 2013).

Parameter	Symbol	Verdi	Enhet
Leireinnhold		38,0	%
Vanninnhold	w	37,8	%
Plastisitetsindeks	I_p	6,3	%
Saltinnhold	s	1,5	g/l
Omrørt skjærstyrke	s_r	0,20	kPa
Sensitivitet	S_t	200	-

3.2.2 Esp

Det andre materialet brukt i denne oppgaven er hentet fra Esp, på Byneset i perioden 18.03.14-09.05.14, se figur 3.4. Dette området er valgt på grunn av kvikkleireskredet som gikk på morgenen 01.01.2012 (NVE, 2012). Det er gjort en vurdering av Esp som forsøksfelt (King, 2013). Der det ble påvist kvikkleire rundt 7 og 10 meters dybde. Materialet ble beskrevet som en homogen, middel sensitiv til sensitiv leire med lav plastisitet.

I tillegg har forfatter utført indekstesting av materialet som er brukt til forsøkene. Et sammendrag av de viktigste resultatene er gjengitt i tabell 3.2. For mer informasjon om resultatene av rutineundersøkelsene, se vedlegg B.



Figur 3.4: Kart som viser prøvetakingbeliggenheten fra Esp, Byneset ((NGU, 2014) og (Google, 2014)).

Tabell 3.2: Indeksverdier for Esp-materiale.

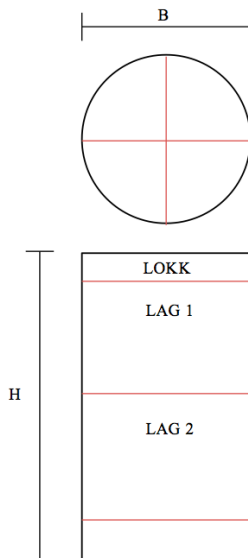
Parameter	Symbol	Verdi	Enhet
Leireinnhold		32,0	%
Vanninnhold	w	37,0	%
Plastisitetsindeks	I_p	6,0	%
Saltinnhold	s	0,7	g/l
Omrørt skjærstyrke	s_r	0,29	kPa
Sensitivitet	S_t	80	-

3.3 Klargjøring av prøvemateriale for treaksialapparat

Alle forsøkene er utført på blokkprøvemateriale. For å klargjøre materialet til testing ble blokkprøver først satt på et stativ for å gjøre oppdelingsjobben lettere, se figur 3.5. Som vist i figur 3.6 ble prøven først delt opp horisontalt i et lokk og to lag. Deretter ble hvert av lagene delt vertikalt i fire deler. For å unngå inntørking av de prøvedelene som ikke ble testet med en gang, ble de pakket inn med plastfolie og vått papir.



Figur 3.5: Stativet materialet står på under oppdeling og visuell inspeksjon av materialet.



Figur 3.6: Oppdelings-tegning av MiniBlokk-materiale.



Figur 3.7: Tråsåg foran stativet som brukes til å trimme materialet til 54 mm-prøve.

Treaksialapparatet som ble benyttet til forsøkene er tilrettelagt for 54 mm-prøver, og derfor måtte prøvestykkene trimmes ned til sirkulære 54 mm prøver. Dette ble gjort ved hjelp av utstyr som vist i figur 3.7. Ved å kutte av små remser av prøvematerialet rundt hele prøven, fikk den tilslutt en manglekantet form, som skal tilsvare et sirkulært tverrsnitt, se figur 3.8. For å få gode resultater er det viktig at denne prosessen utføres nøyaktig. Dette krever både øvelse og teknikk.

Etter trimming ble prøven montert på et bunnstykke med mettede filtre i begge ender, vist i figur 3.9. Både bunn- og toppstykket ble smurt inn med tykk grease

3.3. KLARGJØRING AV PRØVEMATERIALE FOR TREAKSIALAPPARAT

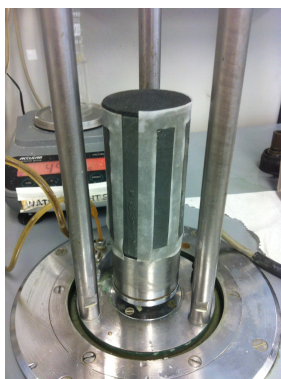


Figur 3.8: Trimmeprosessen vist ved tre stadier.

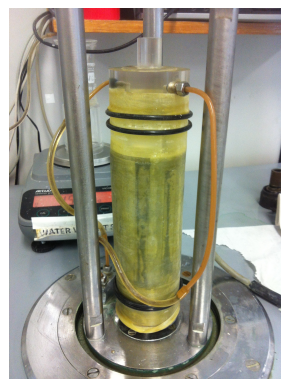
for å gi en ekstra sikkerhet mot lekkasje. Et gjennomfuktet papirfilter ble plassert rundt prøven for å redusere drenasjetiden, som vist i figur 3.10. For å unngå kontakt mellom cellevannet og prøven, ble en membran, også kalt gummihud, tredd over prøven, vist i figur 3.11. I begge ender ble det festet to o-ringer for å hindre lekkasje mellom membranen og topp- og bunnstykke. Prøven var nå klar for baktrykk og konsolidering. Dette ble gjort i henhold til vanlig prosedyre ved geoteknikk på NTNU.



Figur 3.9: Ferdig trimmet prøve montert på pidestall med mettede filtre i begge ender.



Figur 3.10: Prøven med gjennomfuktet papirfilter plassert rundt for drenasje.



Figur 3.11: Gummihud, toppstykke og o-ringer er satt på og prøven er ferdig montert.

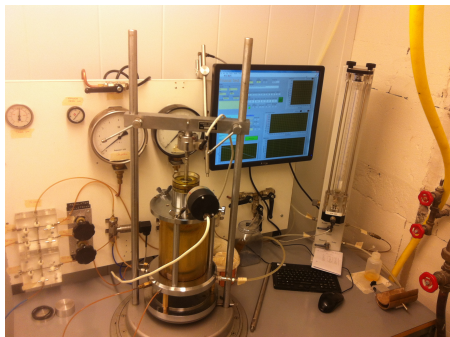
3.4 Forsøkslokasjon

Det ble gjennomført testing ved to lokasjoner, lab A og lab B, begge tilhørende geoteknikkavdelingen på NTNU.

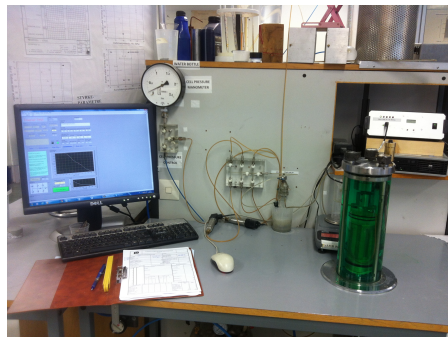
Tabell 3.3: Oversikt over laboratoriene brukt til forsøk.

Laboratorie	Temperatur	Utstyr
Lab A	10 – 12 °C	Treaksialapparat A
Lab B	23 °C	Treaksialapparat B Ødometer Utstyr for rutineundersøkelser

Lab A er plassert i et kjølerom, som har en konstant temperatur på 10 – 12 °C. Denne plasseringen er også skjermet for støy og trafikk, for å unngå at forsøket ble påvirket av omgivelsene. Romtemperaturen i lab B holdes rundt 23 °C, og med mer trafikk rundt apparatene. Det var derfor ønskelig å utføre alle forsøkene i lab A under kontrollerte, kalde omgivelser for å simulere in situ forhold best mulig. Utstyret for både ødometerforsøkene og indekstesting finnes kun i lab B, og dermed ble disse forsøkene utført der. Alle K'_0 - og skjærkrypforsøk var planlagt utført i lab A, men på grunn av problemer med lekkasje, diskutert i del 5.1.2, ble treaksialapparat B tatt i bruk for å kunne kjøre to forsøk samtidig.



(a) Treaksialapparatet A i lab A



(b) Treaksialapparatet A i lab B.

Figur 3.12: Oppsettet av treaksialapparatene i henholdsvis a) lab A og b) lab B.

Treaksialapparatet A, plassert i lab A, er vist i figur 3.12a, mens treaksialapparatet B som står i lab B er vist i figur 3.12b. Hovedsaklig er treaksialapparatene

satt sammen slik at de kan utføre det samme, men det er noen forskjeller som må nevnes.

Treksialapparat A:

- kan kjøre med konstant vertikal last ved udrenert forsøk
- har en byrette, slik at forsøk kan kjøres med baktrykk
- lasten påføres utenifra via en stang
- kun enveis drenasje

Treksialapparat B:

- kan ikke kjøre med konstant vertikal last ved udrenert forsøk
- måler utpresset vann i et glass på en vekt
- lasten påføres inni cellen, direkte

Dette vil si at skjærkrypforsøkene må utføres ved treksialapparat A, ettersom det kun er der det er mulig å gjennomføre kryptesten. Det er også viktig å kjøre kryptest med baktrykk, for å få riktig måling av poretrykk. Baktrykk er nærmere beskrevet i del 3.5.2.

3.5 Forsøk

Det er utført forskjellige tester i forbindelse med denne masteroppgaven. Ødometerforsøk, rutineundersøkelser og standard skjærforsøk er gjennomført etter standard prosedyre ved laboratoriet for geoteknikk på NTNU. De standardiserte testene vil ikke bli nærmere omtalt her, men leser henvises til Norsk Standard, se tabell 3.4, ved behov for detaljert beskrivelse.

Videre vil prosedyre og utføring av K'_0 - og skjærkrypforsøk bli presentert. I tillegg er det gitt en kort beskrivelse av noen parametere som er vesentlig for resultatene.

3.5.1 K'_0 -forsøk

Som beskrevet i del 1.1 er det viktig å finne en flyteflate og dens form for å kunne etterligne materialets in situ spenninger i en naturlig skråning. For å finne denne flyteflaten, og dermed den ønskede konsolideringsverdien, har det blitt utført K'_0 -forsøk.

Tabell 3.4: Oversikt over henvisninger til Norsk Standard (NS).

Forsøk	NS
Vanninnhold	8013:1982
Konus	8015:1988
Plastisitetsgrense	8003:1982
Flytegrense	8001:1982
Densitet	8011:1982
Hydrometer	8005:1990
Ødometer, IL	8017:1991
Ødometer, CRS	8018:1993

Planlagt gjennomføring

K'_0 -forsøkene ble kjørt under drenerte forhold i et treaksialapparat, der det er mulig å styre radielt- og aksielt trykk for å oppnå ønsket K'_0 -verdi. For å unngå forsøk som tar uhensiktsmessig lang tid, var antall trinn vurdert i forhold til trinntiden. Fire pålastingstrinn var minimum antall trinn som ville gi nok data til å få et resultat uten at forsøkene tok for lang tid. De planlagte forsøkene er beskrevet i tabell 3.5 og 3.6, der alle forsøkene skulle gjennomføres med fire pålastingstrinn. Valget av K'_0 -verdier var vurdert og tatt i samråd med veileder. Grunnen til at det ble valgt $K'_0=0,4$ og $0,6$ var for å kunne skissere den delen av flyteflaten som er aktuell for spenningstilstanden i en naturlig skråning.

Tabell 3.5: Planlagte K'_0 -forsøk for materiale fra Tiller.

Lokasjon	K'_0	Trinntid [h]	ID
Tiller	0,4	1	T_k0_0.4_t1
Tiller	0,4	24	T_k0_0.4_t24
Tiller	0,6	1	T_k0_0.6_t1
Tiller	0,6	24	T_k0_0.6_t24

I tabell 3.7 og 3.8 er de planlagte trinnene for K'_0 -forsøk på Tiller-materialet listet opp, og i tabell 3.9 og 3.10 for Esp-materialet. Utførte ødometertester har gitt $p'_{c,oeo}$ på 150 og 140 kPa ved dybde rundt 8 m, for prøver fra henholdsvis Tiller og Esp. Ut fra dette var to trinn i K'_0 -forsøkene før $p'_{c,oeo}$ verdien og to av trinnene etter $p'_{c,oeo}$ verdien er passert.

3.5. FORSØK

Tabell 3.6: Planlagte K'_0 -forsøk for materiale fra Esp.

Lokasjon	K'_0	Trinntid [h]	ID
Esp	0,4	1	E_k0_0.4_t1
Esp	0,4	24	E_k0_0.4_t24
Esp	0,6	1	E_k0_0.6_t1
Esp	0,6	24	E_k0_0.6_t24

Tabell 3.7: Planlagte trinn for $K'_0=0,4$ for materiale fra Tiller.

Trinn	σ'_1	σ'_3	$\Delta\sigma'_1$
1	50	20	30
2	100	40	60
3	220	88	132
4	300	120	180

Tabell 3.9: Planlagte trinn for $K'_0=0,4$ for materiale fra Esp.

Trinn	σ'_1	σ'_3	$\Delta\sigma'_1$
1	80	32	48
2	120	48	72
3	170	68	102
4	210	84	126

Tabell 3.8: Planlagte trinn for $K'_0=0,6$ for materiale fra Tiller.

Trinn	σ'_1	σ'_3	$\Delta\sigma'_1$
1	50	30	20
2	100	60	40
3	220	132	88
4	300	180	120

Tabell 3.10: Planlagte trinn for $K'_0=0,6$ for materiale fra Esp.

Trinn	σ'_1	σ'_3	$\Delta\sigma'_1$
1	80	48	32
2	120	72	48
3	170	102	68
4	210	126	84

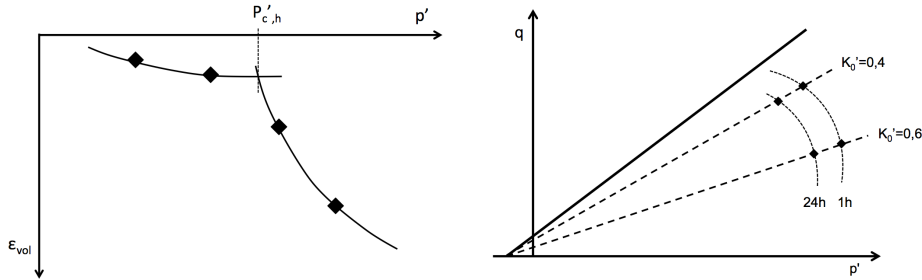
Prosedyre for K'_0 -forsøk

Før forsøkene kunne utføres, ble $p'_{c,oe\text{do}}$ funnet ved ødometerforsøk. Deretter ble K'_0 -forsøkene kjørt i et treaksialapparat. Prøvene ble påført laster som tilsvarer både mindre og større verdier enn $p'_{c,oe\text{do}}$. Påføringen av lasten ble utført etter en prosedyre der celletrykket ble økt til riktig σ'_3 , for deretter å øke vertikal last i et trinn til riktig σ'_1 . Deretter ble ε_{vol} ved endt lasttrinn plottet mot p' . En kurve er tilpasset de to punktene før p'_c og en kurve er tilpasset de to punktene etter. Krysningspunktet mellom kurvene tilsvarer p'_c , som vist i figur 3.13a.

Kurvene ble funnet ved hjelp av likning 3.1 som beskriver tøyning ved endring i spenning for leirer, med hensyn på modulustallet, m . Kurvene er brukt for å lettere kunne tolke p'_c for de ulike forsøkene.

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \cdot \ln\left(\frac{p'_2}{p'_1}\right) \quad (3.1)$$

p'_c -verdien ble så plottet i et $q - p'$ -diagram sammen med de andre verdiene for andre K'_0 -verdier. Ved hjelp av disse ble en flyteflate skissert. Ved å i tillegg endre trinntiden ble også 1 og 24 timers flyteflater skissert, se figur 3.13b.



(a) p'_c funnet ved K'_0 -forsøk med eksempelvis fire trinn.

(b) K'_0 -forsøket plottet i et $q - p'$ -diagram for skissering av flyteflatene.

Figur 3.13: Enkel forklaring av hvordan flyteflater plottes fra K'_0 -forsøk.

Alternativ prosedyre for K'_0 -forsøk

Ettersom flere av K'_0 -forsøkene gikk til brudd, ble det utført K'_0 -forsøk med en alternativ prosedyre. Den alternative prosedyren gikk ut på å mer skånsomt påføre lastene, slik at materialet ikke skulle pådra seg kryp som skyldtes prosedyren.

Istedenfor å øke den vertikale lasten i et trinn, rett etter at celletrykket ble satt på, ble prøven stående med celletrykket til kurven for utpresset porevann var flatet ut. Deretter ble den vertikale lasten lastet på i flere trinn til riktig σ'_1 var nådd, hvor hvert trinn fikk flate ut.

3.5.2 Skjærkrypforsøk

Ettersom det var problemer med lekkasje og gjennomføring av K'_0 -forsøkene, ble det ikke gjennomført skjærkrypforsøk i forbindelse med denne masteroppgaven. I dette kapitlet vil forfatter presentere valget av metode samt den testprosedyren for skjærkrypforsøk som skulle blitt brukt til disse forsøkene.

Planlagt gjennomføring

Skjærkrypforsøkene var planlagt kjørt i treaksialapparat, for å kunne utsette prøven for skjær ved å styre radielt og aksielt trykk. Ved å se på en udrenert situasjon, tas det høyde for den verst tenkelige situasjonen med tanke på stabilitet. Det vil kun være en udrenert tilstand i en kort periode ved pålasting av en naturlig skråning, når det ses i sammenheng med resten av varigheten av kryppprosessen. En naturlig skråning av kvikkleire vil først oppføre seg udrenert og poretrykk bygges opp på grunn av lav permeabilitet, men etter hvert som tiden går klarer leiren å utjevne poretrykket og man får en drenert tilstand.

Skjærforsøkene er derfor tidsavhengige, og under planleggingen ble de gjort en vurdering på hvor lang tid hvert forsøk skulle kjøres. Hvis forsøket ble stoppet for tidlig ville det muligens ikke avdekkes skjærkryp som kunne ha forekommet etter forsøksstopp. Motargumentet var at prøve kvaliteten til blokkprøvene avtar med økende tid fra prøvetaking, og etter at prøven er åpnet og delt opp. Det var derfor ønskelig å bestemme den lengste forsøkestiden som ikke gikk på bekostning av kvaliteten på materialet som venter på å bli testet. Etter avtale med veiledere ble én uke per forsøk satt som maks forsøkestid.

De planlagte skjærkrypforsøk er beskrevet i tabell 3.11. Det var kun planlagt skjærkrypforsøk på Esp-materialet, ettersom det kun var planlagt opptak av prøver fra Esp. Planen skulle vurderes og eventuelt revideres underveis i arbeidet, ut fra oppnådde resultater og eventuelle utfordringer i forbindelse med testing. Antall tester skulle avhenge av tilgjengelig tid.

Tabell 3.11: Planlagte skjærkrypforsøk på materiale fra Esp.

Lokasjon	% Δq	ID
Esp	80	E_dq_80
Esp	60	E_dq_60
Esp	50	E_dq_60
Esp	40	E_dq_40
Esp	20	E_dq_20

Prosedyre for skjærkrypforsøk

Testprosedyren for skjærkrypforsøk omhandler trinnene:

- Baktrykk
- Konsolidering
- Poretrykksparamter, B
- Skjærkryp

Baktrykk

Poretrykket reduseres fra in situ-poretrykk til atmosfærisk trykk eller mindre når prøver tas opp fra grunnen. Dette gjør at luft som var løst opp i porevannet «felles» ut. Dermed er prøven ikke lenger mett. Ved å bruke baktrykk under testing i treaksialapparater kan en gjenskape en mettet situasjon.

Metningsgraden i en prøve forteller hvor stor prosentandel av porevolumet som er fylt med vann. I laboratoriet måles metningsgraden ved måling av vannvolum og porevolum (Janbu, 1989).

Metning oppnås ved å øke poretrykket til et nivå der vann absorberer luft inn i porene. I leire, som har lav permabilitet, antas det at det ikke skapes luftbobler i noe særlig grad inni selve prøven. Grunnen til at baktrykk er viktig ved forsøk på leire er for å eliminere luft i systemet, altså i ventil, slangene, byretten og mellom membran og prøven. Luftbobler i systemet hindrer «rett respons» ved målingen, og er derfor uønsket (Head, 1986).

Hvordan baktrykk brukes i forbindelse med testingen er en vurderingssak. Det er uansett viktig å opprettholde en positiv effektivspenning og derfor må baktrykk og celletrykk reguleres simultant. Ved for rask påføring av baktrykk vil jordskjelettet påvirkes ved at jorden komprimeres for å kompensere for plassen luften tok før den ble løst opp i porevannet. Det er derfor viktig at baktrykk ikke påføres for raskt.

Valgt baktrykksplan for skjærkrypforsøkene er vist i tabell 3.12. Av sikkerhetsmessige grunner, er det valgt et maks baktrykk på 400 kPa, da det er usikkert hvor mye mer utstyret tåler. Det er viktig å starte forsiktig med baktrykk, og derfor er de første trinnene mindre enn de siste. Ut fra drenasjevei ble det vurdert hvor lang tid hvert trinn skal vare.

Tabell 3.12: Plan for påføring av baktrykk.

Steg	Celletrykk [kPa]	Baktrykk [kPa]	Tid [h]
1	30	20	1
2	60	50	1
3	110	100	1
4	160	150	0,75
5	210	200	0,75
6	260	250	0,75
7	310	300	0,75
8	360	350	0,75
9	410	400	-

Konsolidering

Etter at prøven er påført maksimalt ønsket baktrykk, rundt 400 kPa, er den klar for konsolidering. For å kunne simulere en skråning blir prøven konsolidert til riktig spenningstilstand funnet ut fra flyteflatene. Det er valgt en trinnvis anisotropisk konsolidering, bestående av fire like store trinn, der hvert trinn er på en time. Etter at siste lasttrinnet er nådd, blir prøven stående slik over natten. Selve konsolideringsprosedyren er den samme som for forsøkene utført høsten 2013 (Torpe, 2013), og ble valgt for å kunne sammenligne resultatene for forsøkene utført høsten 2013 med resultater for forsøk som gjennomføres våren 2014. Det er forventet problemer med å nå riktig spenningstilstand uten å påføre materialet krep som skyldes prosedyren, ut fra erfaringen fra K'_0 -forsøkene.

Poretrykksparemeter

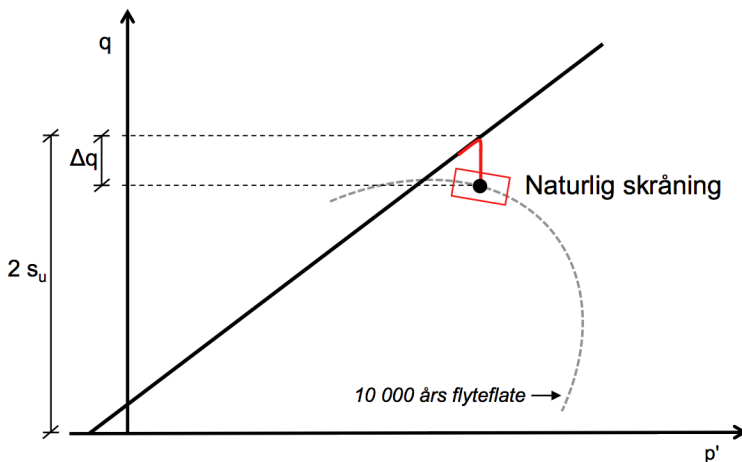
Etter konsolideringen måles Skemptions poretrykksparemeter, B (Skempton, 1954). Denne måles for å se hvor mett prøven er, ved å øke celletrykket i en lukket situasjon og se på økningen i poretrykket, se ligning 3.2.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.2)$$

Skjærkryp

Siste trinn i testprosedyren for skjærkryp, er å stenge dreneringsveiene og påføre prøven en konstant vertikal last som simulerer kryplast.

Ved å variere den vertikale lasten ut ifra ulike % av Δq verdier, se figur 3.14, vil tiden til krepbrudd variere. Det vil da være mulig å si noe om en overgangsfase, der prøven går fra stabile til ustabile forhold. Det vil også være mulig å si noe om mobiliseringsgraden av s_u , dersom det utføres et standard skjærforsøk fra relevant spenningstilstand, som vist med rød linje i figur 3.14.



Figur 3.14: Forklaring på hvordan et udrenert skjærkryp kan måles ved hjelp av Δq .

For å kunne si noe om mobiliseringsgraden av s_u og definere et området som er stabilt for udrenert skjærkrypforsøk er det avhengig av at alle forsøkene er konsolidert helt likt, slik at utgangspunktet er det samme for alle forsøkene, og at materialet står stabilt i den konsoliderte spenningstilstanden.

3.6 Materialeegenskaper etter konsolidering

Materiale fra både Tiller og Esp er testet for å se om egenskapene til materialet er endret etter endt konsolidering. Spørsmålet er om denne prosessen vil endre egenskapene til materialet, slik at det for eksempel ikke lenger er et kvikt materiale? Om dette er tilfelle, vil det i så fall være vanskelig å se på hvordan kvikkleire vil oppføre seg ved udrenert skjærkryp.

Udrenert skjærstyrke, s_u , og omrørt skjærstyrke, s_r , fra konusforsøk samt vanninnhold er målt for materialet før og etter konsolidering, for både Tiller- og Espmateriale. Deretter sammenlignes resultatene. Spenningstilstanden materialene er konsolidert til, er bestemt etter at flyteflatens form og plassering var funnet.

3.7 Konstante forsøksparametere

For å få gode og sammenlignbare forsøk er det viktig å vite hvilke parametere som er med på å påvirke forsøkene.

Tøyningshastighet

Tøyningshastighetens effekt på materialets egenskaper er godt dokumentert (Boudali, 1995; Graham, Crooks og Bell, 1983). Graham mfl. (1983) så en 10-20% endring i den målte skjærstyrken og overkonsolideringsspenningen ved en tidoblet forandring i tøyningshastighet. For å unngå at en parameter som vil påvirke parameterne s_u og $p'_{c,odedo}$ er tøyningshastigheten holdt konstant ved både standard skjærforsøk og ødometerforsøk.

Temperatur

Det er forsket mye på effekten av temperatur og hva den gjør med materialets egenskaper (Boudali, 1995; Tidfors og Sällfors, 1989). Det er derfor tatt utgangspunkt i å kjøre forsøkene under temperaturforhold som simulerer in situ forhold.

Kapittel 4

Resultat

I denne delen presenteres resultatene fra de utførte forsøkene. Hvis ikke annet er kommentert, er forsøkene gjennomført i henhold til testplanene beskrevet i kapittel 3.

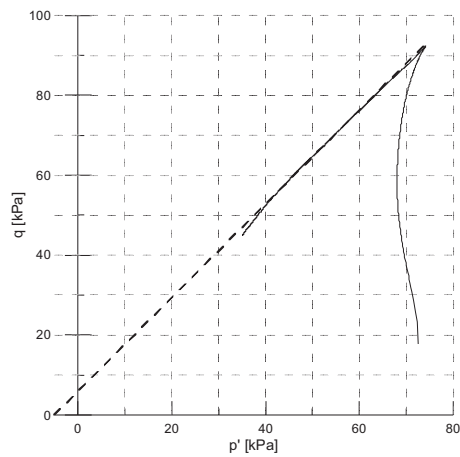
4.1 Standard forsøk

Ettersom Tiller-materialets materialegenskaper er godt dokumentert, er det kun kjørt standard skjærforsøk og ødometerforsøk på materialet fra Esp. Det ble kjørt CRS på to forskjellige blokkprøver, og disse resultatene er benyttet til sammenligning forskjellig prøve kvalitet.

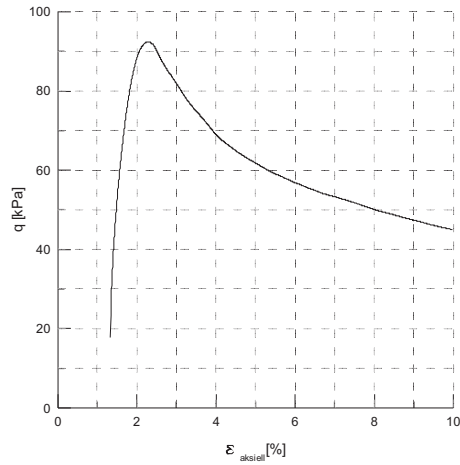
4.1.1 Standard skjærforsøk

For Esp-materialet er det kjørt ett standard skjærforsøk på en blokkprøve fra dybde 7,9-8,2, se figur 4.1 og 4.2. Forsøket ble kjørt med samme prosedyre som beskrevet for skjærkrypforsøk i del 3.5.2, med unntak av siste fase der det istedenfor kjøres et udrenert standard skjærforsøk (STD). Udrenert skjærstyrke, s_u , for denne prøven ble målt til omtrent 47 kPa, og materialet har en attraksjon på 8 kPa og en friksjonsvinkel på 28° .

4.1. STANDARD FORSØK



Figur 4.1: Standard skjærforsøk plottet i $q - p'$ -diagram for en blokkprøve fra dybde 7,9-8,2, fra Esp.

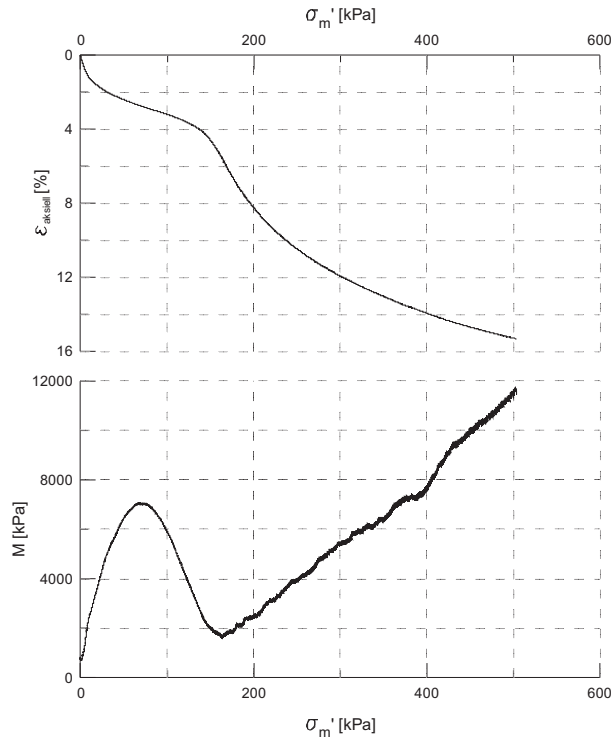


Figur 4.2: Standard skjærforsøk plottet i $q - \varepsilon_{aksjell}$ -diagram for en blokkprøve fra dybde 7,9-8,2, fra Esp.

4.1.2 Ødometerforsøk

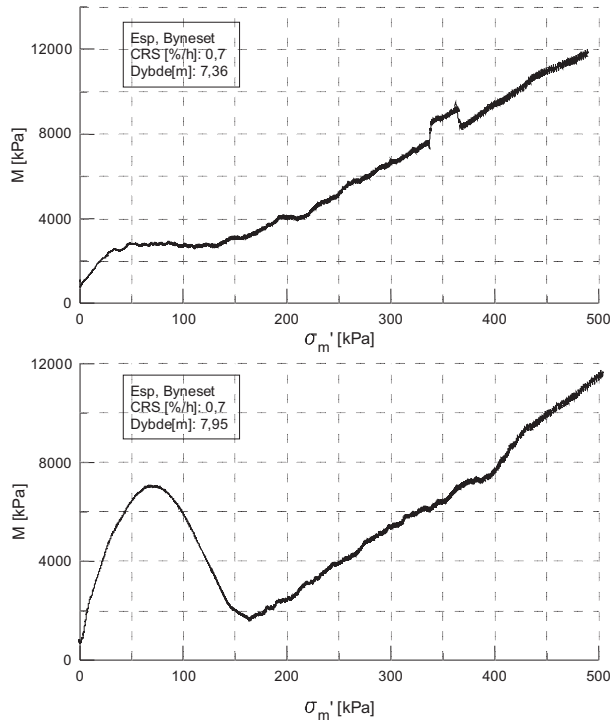
Resultat fra ødometerforsøk gjort på materiale fra dybde 7,9-8,2 m er vist i figur 4.3. Dette resultatet viser at prekonsolideringsspenningen, $p_{c,oe\text{do}}$, er i størrelsesorden 140 kPa. m_{OC} og m_{sec} er funnet til å være henholdsvis 120 og 10 for ødometerforsøket, mens m_{NC} er 30 med referansespenning, σ_{ref}' , 115 kPa.

En sammenligning av to CRS forsøk utført på blokkprøver fra samme hull, men ulik dybde, kan ses i figur 4.4.



Figur 4.3: Resultat fra CRS test på blokkprøve fra Esp, fra blokk 7,9-8,2 på dybde 7,95 m.

4.1. STANDARD FORSØK



Figur 4.4: Sammenligning av CRS utført på to forskjellige blokkprøver fra Esp, fra blokk 7,3-7,6 og 7,9-8,2. Forsøkene er fra henholdsvis 7,36 og 7,95 m dybde.

4.2 K'_0 -forsøk

Tabell 4.1 og 4.2 viser en oversikt over de gjennomførte K'_0 -forsøkene. Det ble gjort noen endring underveis i forsøksperioden, da det viste seg at det var vanskelig å gjennomføre de høyt mobiliserte og lange K'_0 -forsøkene. Bakgrunnen for denne endringen er diskutert i del 3.5.1. Der en prøve har oppført seg annerledes enn normalt, er dette kommentert i tabellen.

Tabell 4.1: Gjennomførte K'_0 -forsøk for materiale fra Tiller.

Lokasjon	K'_0	Trinntid [h]	ID	Kommentar
Tiller	0,4	1	T_k0_0.4_t1	
Tiller	0,4	2,5	T_k0_0.4_t2.5	
Tiller	0,4	24	T_k0_0.4_t24	Gikk til brudd i 3.trinn.
Tiller	0,4	24	T_k0_0.4_t24-2	Gikk til brudd i 2.trinn.
Tiller	0,4	24	T_k0_0.4_t24-3	Gikk til brudd i 3.trinn.
Tiller	0,6	1	T_k0_0.6_t1	
Tiller	0,6	24	T_k0_0.6_t24	

Tabell 4.2: Gjennomførte K'_0 -forsøk for materiale fra Esp.

Lokasjon	K'_0	Trinntid [h]	ID	Kommentar
Esp	0,4	1	E_k0_0.4_t1	Gikk til brudd i 1.trinn.
Esp	0,45	1	E_k0_0.45_t1	
Esp	0,45	24	E_k0_0.45_t24	Gikk til brudd i 3.trinn.
Esp	0,6	1	E_k0_0.6_t1	
Esp	0,6	24	E_k0_0.6_t24	
Esp	0,45	24	E_k0_0.45_t24_test	Begynte å krype i 1.trinn
Esp	0,45	24	E_k0_0.45_t24_test2	Begynte å krype i 2.trinn
Esp	0,45	24	E_k0_0.45_t24_test3	Begynte å krype i 2.trinn

4.2. K'_0 -FORSØK

Kommentarer til forsøkene på Tiller-materiale:

- De tre første forsøkene, T_k0_0.6_t1, T_k0_0.4_t1 og T_k0_0.4_t2.5 ble utført i lab A, mens resten i lab B
- Ingen lekkajse, men kurven for utpresset porevann rakk ikke å flate ut på 3. og 4. trinn for 1 timers forsøkene
- T_k0_0.4_t24(-2,-3) ble ikke gjennomført, da alle forsøkene gikk til brudd

Kommentarer til forsøkene på Esp-materiale:

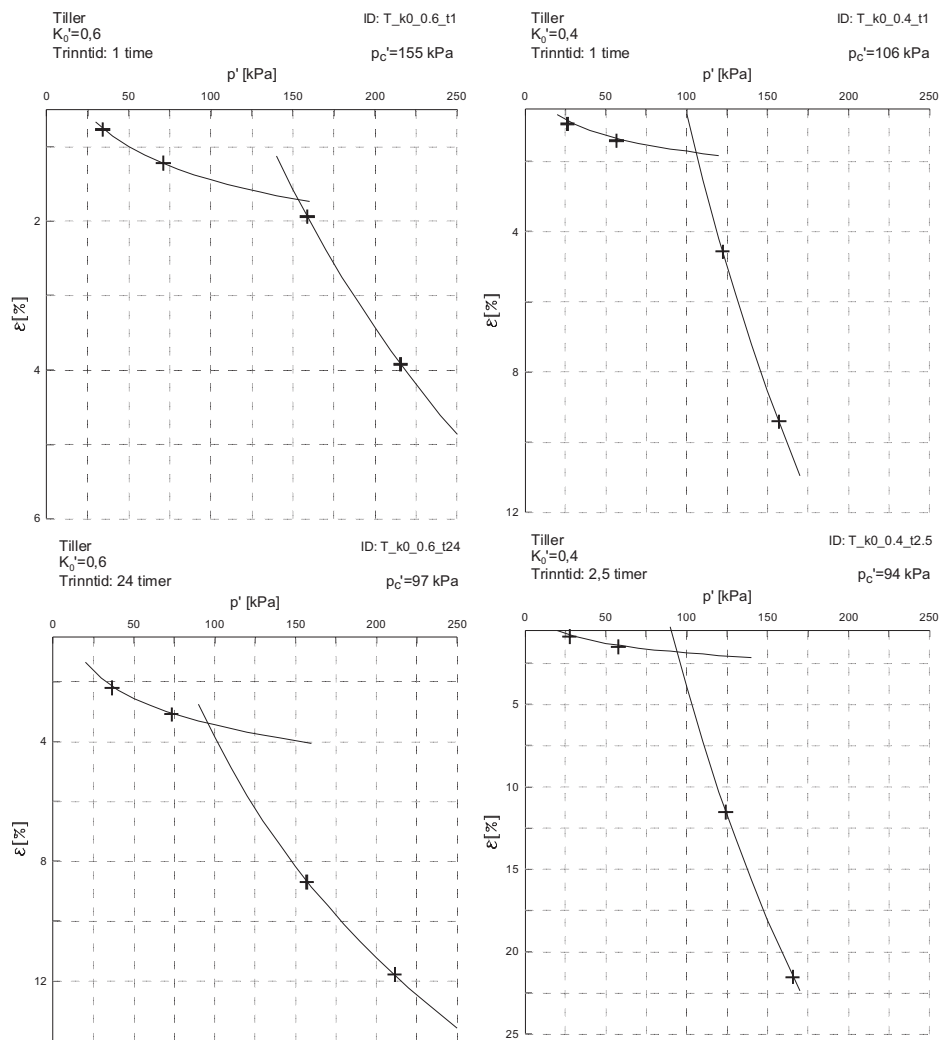
- Alle forsøkene ble gjennomført i lab A
- K'_0 verdien ble endret fra 0,4 til 0,45, da første forsøket, E_k0_0.4_t1, gikk til brudd i løpet av 1. trinn
- Ingen lekkajse, men kurven for utpresset porevann rakk ikke å flate ut på 3. og 4. trinn for 1 timers forsøkene
- E_k0_0.45_t24 ble ikke gjennomført, da forsøket gikk til brudd i 3. trinn

Figur 4.5 og 4.6 viser resultatene av de fire pålastingstrinnene for de 7 gjennomførte K'_0 -forsøkene plottet i et $p' - \varepsilon$ diagram. Kurvene ble funnet ved hjelp av likning 3.1 og m verdiene som tilsvarer kurvene er beskrevet i tabell 4.3. Kurvene er brukt for å lettere kunne tolke p'_c for de ulike forsøkene.

Tabell 4.3: m_{OC} og m_{NC} verdier for kurvene brukt i tolkning av K'_0 -forsøkene.

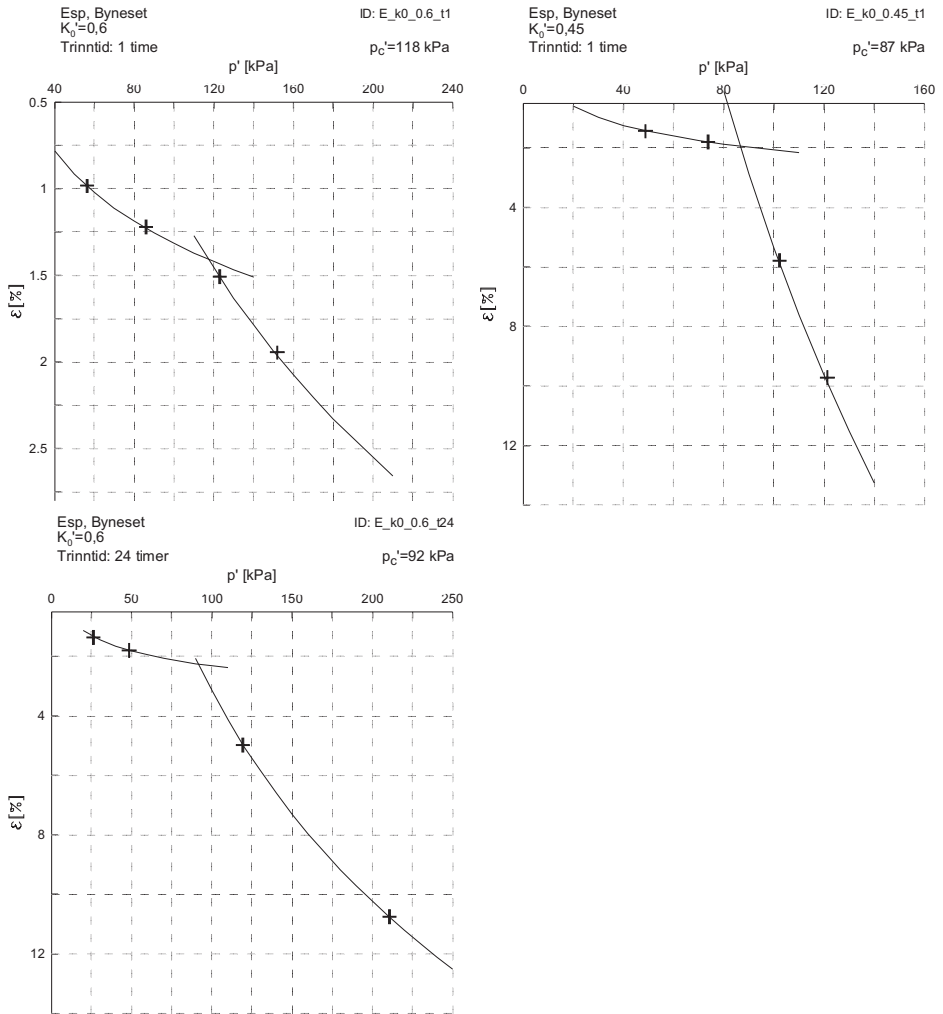
Forsøk	m_{OC}	m_{NC}
T_k0_0.4_t1	158	5,2
T_k0_0.4_t2.5	122	2,9
T_k0_0.6_t1	160	15,6
T_k0_0.6_t24	79	9,5
E_k0_0.45_t1	113	4,3
E_k0_0.6_t1	175	47
E_k0_0.6_t24	140	9,9

I figur 4.7 og 4.8 er p'_c for de forskjellige K'_0 -forsøkene plottet i et $q - p'$ diagram. Fra dette kan det trekkes linjer mellom punktene med lik trinntid, som vil tilsvare en flyteflate.

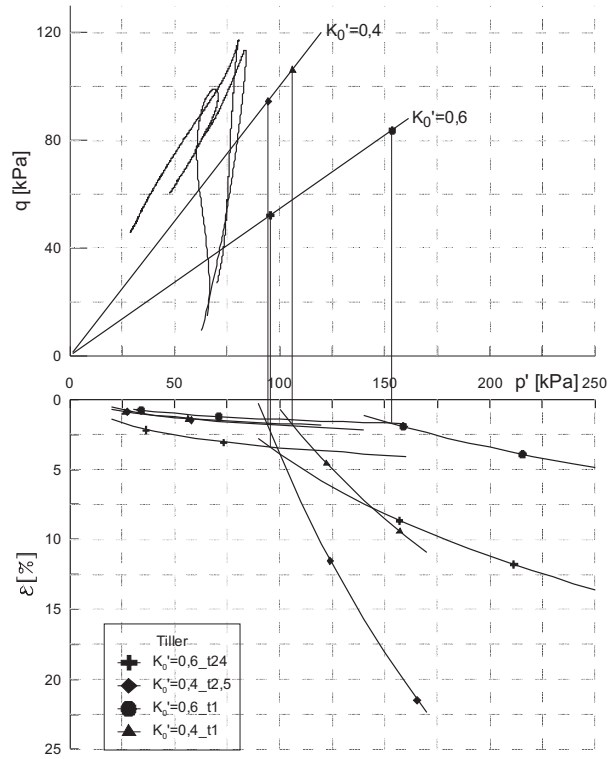


Figur 4.5: K'_0 -forsøkene plottet for Tiller-materiale.

4.2. K'_0 -FORSØK

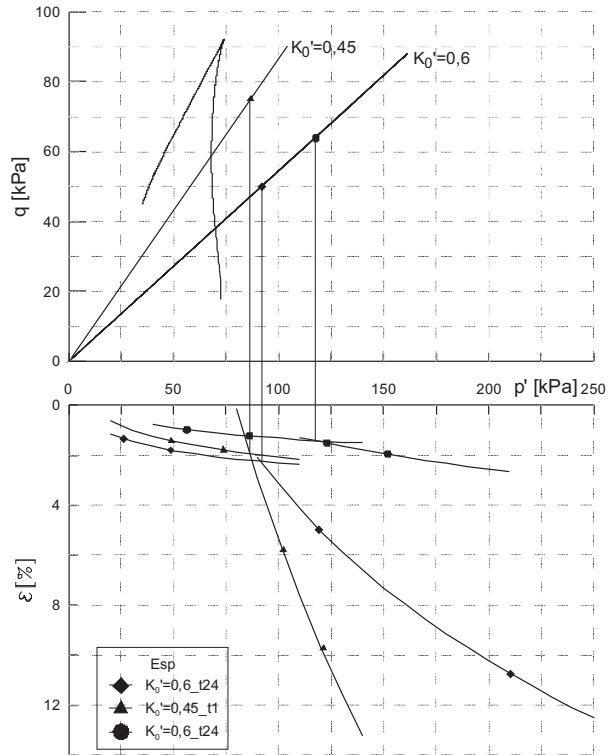


Figur 4.6: K'_0 -forsøkene plottet for Esp-materiale.



Figur 4.7: Alle K_0' -forsøkene samlet og plottet i et $q - p'$ diagram for Tiller-materiale.

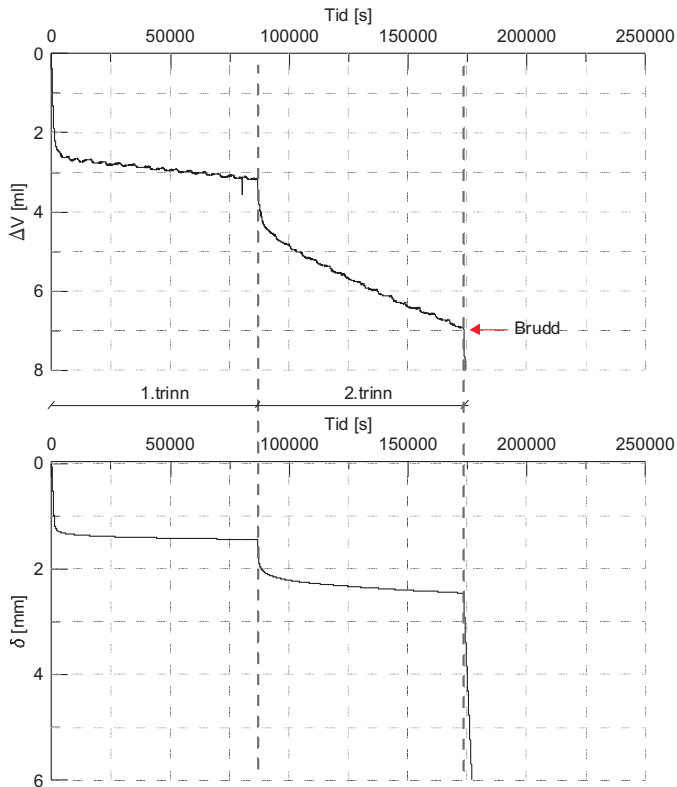
4.2. K'_0 -FORSØK



Figur 4.8: Alle K'_0 -forsøkene samlet og plottet i et $q - p'$ diagram for Esp-materiale.

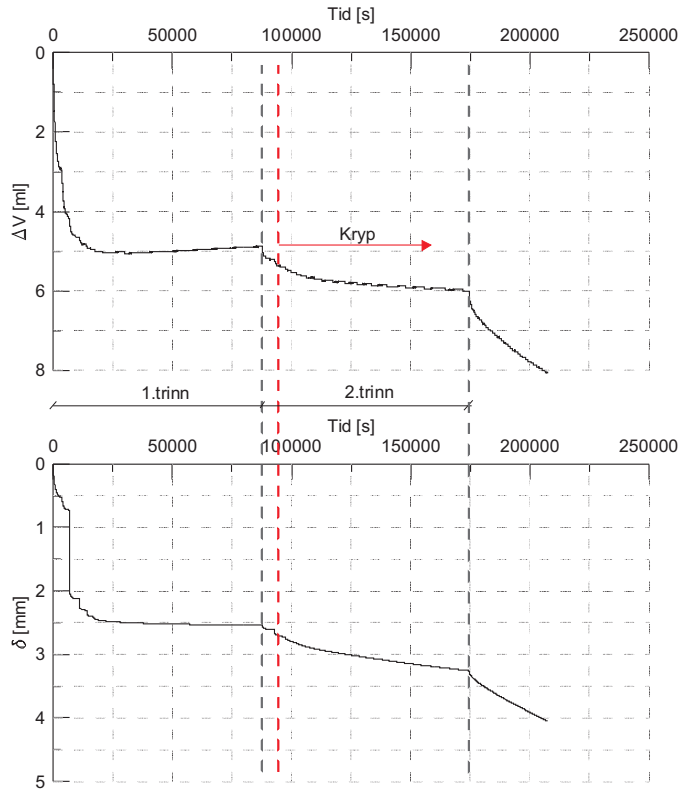
4.2.1 Alternativ prosedyre for utførelse av K'_0 -forsøk på kvikkleire

I figur 4.9 vises utpresset porevann, ΔV , og deformasjon, δ , mot tid for forsøk gjort med den opprinnelige prosedyren valgt for K'_0 -forsøkene. På grunn av forsøk som gikk til brudd ble en alternativ prosedyre for K'_0 -forsøk testet. De samme diagrammene er vist i figur 4.10 for forsøk gjennomført med den alternative prosedyren. Det observeres uønsket krep som skyldes prosedyren etter påbegynt 2. trinn, da materialet fortsetter å deformere seg så mye uten en lastøkning.



Figur 4.9: Den opprinnelige prosedyren for K'_0 -forsøk vist i ΔV – tid og δ – tid-diagram. Dette forsøket gikk til brudd ved pålasting i 3. trinn.

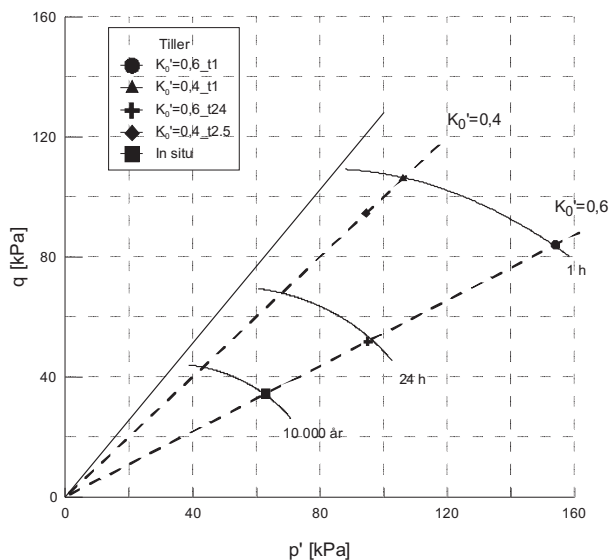
4.3. FLYTEFLATER



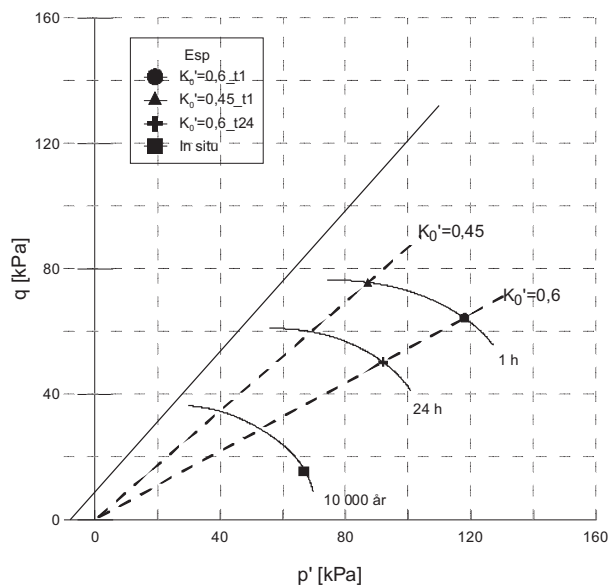
Figur 4.10: Alternativ prosedyren for K'_0 -forsøk vist i ΔV – tid og δ – tid-diagram, hvor det kan observeres kryp som skyldes prosedyren etter påbegynt 2.trinn ved endring i både δ og ΔV .

4.3 Flyteflater

I figur 4.11 og 4.12 er flyteflater funnet ved K'_0 -forsøk skissert for henholdsvis Tiller- og Esp-materiale.



Figur 4.11: Flyteflater skissert for de gjennomførte K_0' -forsøkene for Tiller.



Figur 4.12: Flyteflater skissert for de gjennomførte K_0' -forsøkene for Esp.

4.4 Materialegenskaper ved konsolidering

Tabell 4.4 viser resultatene fra rutineundersøkelser gjort på materiale før og etter konsolidering, både for Tiller- og Esp-materiale. Tiller-materialet brukt til forsøket er tatt opp 23.08.13, mens Esp-materialet er tatt opp 09.05.14.

Tabell 4.4: Resultater fra rutineundersøkelse på materiale fra før og etter konsolidering.

		Tiller		Esp	
		Før	Etter	Før	Etter
s_u	kPa	31,4	54,4	24,5	20,1
s_r	kPa	0,49	0,98	0,20	0,20
s_t	-	64,1	55,5	122,4	100,5
w	%	37,2	38,2	37,3	36,5

Kommentar til forsøkene:

- Prosedyren for konsolidering er tilsvarende prosedyre som beskrevet i del 5.2.1 for å unngå en effektivspenningssti for nærme bruddlinjen
- Tiller-materialet ble konsolidert til en spenningstilstand høyere enn nødvendig, da flyteflaten ble tolket feil første gang.
- Begge forsøkene ble gjennomført uten lekkasje
- Forsøkene var konsolidert over natten
- Økningen i vanninnhold skyldes mest sannsynlig enten naturlig variasjon i materialet, ettersom målingen er gjort fra to forskjellige prøvedeler, eller en veifeil
- Tiller-materialet har stått lagret siden 23.08.13. Dette betyr at ukjente aldringseffekter har påvirket Tiller-materialet i større grad enn for Esp-materialet. En effekt av aldring er økt omrørt skjæstyrke
- Det er derfor vurdert til at Esp-materialet er mer relevant for tolkning enn Tiller-materialet

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Vurdering av materialene og utstyr

En vurdering av materialet og utstyret brukt til forsøkene er beskrevet i denne delen.

5.1.1 Materialet

Standard skjærforsøket ble gjennomført uten problemer. For å kunne fastslå materialets friksjonsvinkel er det ønskelig å utføre flere like forsøk, slik at usikkerheten avtar.

Denne prøven ble konsolidert til in situ spenningstilstand. Derfor er den målte verdien ikke gjeldene når det skal vurderes en mobiliseringsgrad av s_u der prøven kryper til brudd. Det vil være mer aktuelt å måle s_u fra riktig spenningstilstand, altså en spenningstilstand tilsvarende en naturlig skråning.

To ødometerforsøk, CRS, ble utført på to ulike blokkprøver tatt fra samme hull, men fra ulik dybde, vist i figur 4.4. Det er tydelig å se forskjellen i prøve kvalitet når de to prøvene sammenlignes, ettersom prøven fra dybde 7,95 har en mye mer markant oppførsel i det overkonsoliderte området. Prekonsolideringsspenningen er også lettere å bestemme ut fra prøven med høy prøve kvalitet. Det er derfor brukt prøver fra blokkprøven fra dybde 7,9-8,2 til resten av forsøkene, da denne var av mye høyere prøve kvalitet.

Det er viktig å vurdere prøvekvaliteten når udrenert skjærkryp på blokkprøver skal kjøres. Det vil være vanskelig å få gode og riktige resultater hvis ikke utgangspunktet er høykvalitets blokkprøver, ettersom problemstillingen rundt skjærkryp handler om forskjellen i høykvalitetsblokkprøver og 54 mm stempelprøver.

5.1.2 Utstyret

Treaksialapparatet A i lab A viste tendenser til lekkasje når de første forsøkene ble utført. En lekkasje vil si at vann fra cellen kommer seg inn til prøven. Etter en pålasting vil materialet normalt etter en stund være ferdig med å drenere porevann og kurven for utpresset porevann, ΔV , vil flate ut. Den vanligste måten å observere lekkasje er at kurven for utpresset porevann ikke flater ut, men har en konstant ΔV .

Lekkasjen var uønsket og det ble gjort tiltak for å bedre situasjonen. Toppstykket med drenasje ble byttet ut med et tett toppstykke, slik at en mulig lekkasje via toppstykket kunne utelukkes. I tillegg til bytte av toppstykke, var et annet tiltak å bruke en tykkere gummihud enn de vanlige. Det ble også utforsket om en eventuelt ekstra smøremembran ville hjelpe, som er nærmere beskrevet i vedlegg C. Etter at disse tiltakene var tatt i bruk viste et testforsøk at det ikke var lekkasje ved apparatet.

Siden det ikke var gjennomført mange K'_0 -forsøk her ved NTNU tidligere, var det vanskelig å vite hvordan materialet skulle oppføre seg. Det ble derfor satt et spørsmålsteget ved det som ble sett på som en mulig lekkasje ved utføringen av K'_0 -forsøk. De høyt mobiliserte K'_0 -forsøkene hadde en utpresset porevannskurve som ikke flatet ut. Samtidig tilsvarte ikke mengde utpresset porevann kun den aksielle deformasjonen. I sammenheng med dette ble det vurdert faktisk hvor lite radiell deformasjon som skulle til for å presse ut den ekstra mengden porevann som ble registrert. Det ville vært interessant å få målt radiell deformasjon og sett på dette i sammenheng med resten av de målte enhetene, for å kunne si noe mer om oppførselen til materialet under K'_0 -forsøk.

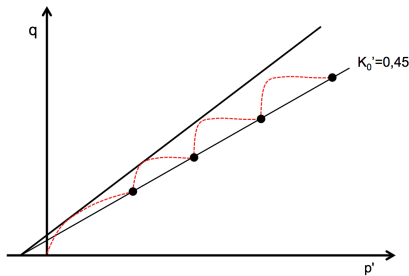
5.2 K'_0 -forsøkene

Alle forsøkene ble gjennomført i lab A, med unntak av to Tiller-forsøk, T_k0_0.4_t24 og T_k0_0.6_t24. Det er selvfølgelig ønskelig å utføre alle forsøkene under så like forhold som mulig, for å kunne redusere usikkerheten rundt forsøksforholdene, men det ble nødvendig å ta i bruk lab B på grunn av et stramt tidskjema.

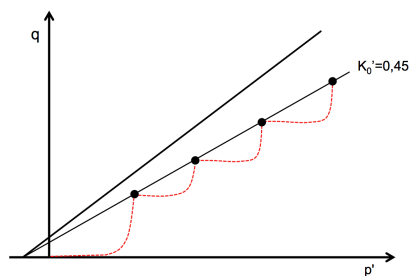
5.2.1 Endret prosedyre for K'_0 -forsøk på kvikkleire

Da det viste seg at alle forsøkene med 24 timers trinntid på prøver med en mobiliseringsgrad på $K'_0=0,4-0,45$ gikk til brudd i løpet av 2. eller 3.trinn, ble prosedyren for gjennomføringen av K'_0 -forsøkene vurdert. Ved å se nærmere på forsøkene, pålastingsmetoden og permabiliteten til materialene, var det mulig å anta at forsøkene gikk til brudd på grunn av udrenert krypbrudd.

Påføringen av lasten ble utført etter en prosedyre der celletrykket ble økt til riktig σ'_3 , for deretter å øke vertikal last i et trinn til riktig σ'_1 . Denne prosedyren ble ikke nærmere vurdert opp mot effektivspenningsstien før oppstart. En mulig vurdering av hvordan effektivspenningsstien oppfører seg er vist i figur 5.1.



Figur 5.1: Prinsippkisse av effektivspenningsstien ved prosedyre brukt ved K'_0 -forsøkene.



Figur 5.2: Prinsippkisse av effektivspenningsstien ved den nye prosedyren for K'_0 -forsøk kjørt på kvikkleire.

På grunn av den lave permabiliteten til kvikkleire, vil materialet oppføre seg udrenert ved pålastning for en periode, før det klarer å utjevne det poretrykket som har bygget seg opp. Selv om K'_0 -forsøkene ble utført i en drenert tilstand, vil de dårlige dreneringsforholdene i kvikkleire føre til oppbygging av poretrykk, som igjen kan føre til utvikling av udrenert kryp. Det at effektivspenningsstien er nært bruddlinjen i utgangspunktet gjør at det ikke skal mye kryp til før prøven går til

brudd. Det ble erfart at når trinnene i forsøket ligger så nærme bruddlinjen, er det viktig å behandle materialet forsiktig under selve pålastingen.

Ved å ta hensyn til effektivspenningsstien og dreneringsforholdene ved kvikkleire, ble en alternativ prosedyre bestemt og testet for gjennomføring av K'_0 -forsøk. Denne prosedyren tok utgangspunkt i å kontrollere effektivspenningsstien, slik at prøven ikke var i nærheten av bruddlinjen, se figur 5.2. Dette kan gjøres ved å først øke celletrykket til ønsket verdi, for deretter i små skritt legge på vertikal last til ønsket effektivspenningsforhold er nådd. For å unngå kryp som skyldes prosedyren underveis, ble prøven stående til $\Delta V - tid$ kurven flatet ut for hvert lasttrinn. Poretrykk er tilsynelatende helt utjevnet når kurven flater ut, men uten en poretrykksmåler inne i prøven, kan man ikke vite det helt sikkert.

Denne prosedyren ble testet på tre prøver. Alle forsøkene viste en tendens til sekundær kryp, som skyldes prosedyren, i enten 1. eller 2. trinn, som vist i figur 4.10. Lekkasje kan utelukkes som usikkerhet rundt forsøkene, ettersom det er deformasjon og utpressing av porevann samtidig. Ut fra disse resultatene kan det tyde på at det ikke er mulig å gjennomføre høyt mobiliserte K'_0 -forsøk på kvikkleire som går over lang tid.

5.3 Flyteflater

For å få et godt nok grunnlag for vurdering av de få punktene fra K'_0 -forsøkene og de skisserte flyteflatene, er det i tillegg blitt beregnet teoretiske flyteflater. De teoretiske flatene brukes til sammenligning og vurderingsgrunnlag for de flyteflatene funnet ved forsøk.

5.3.1 Teoretiske flyteflater

De teoretiske flyteflatene har tatt utgangspunkt i in situ spenningene, og en 10 000 års flyteflate, siden det antas at materialet er 10 000 år gammelt.

Tiller

For Tiller er materialet brukt til K'_0 -forsøkene fra dybde 8,95-9,30, grunnvannstanden (GV) ligger 0,5 m under overflaten, $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$ og antatt $K'_0=0,6$. Dette gir en beregnet in situ spenning på $p'=63 \text{ kPa}$ og $q=34,4 \text{ kPa}$ for dybde 9 m. Parametrene r_s og m_{sec} er tolket til å være henholdsvis 500 og 20 (Gylland mfl., 2013).

Esp

Materialet fra Esp er ikke forsket nok på, og noen av parameterne for å regne in situ spenning må antas. Materialet brukt er fra dybde 7,9-8,2 med en $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$. Det er gjort en konservativ antagelse på $GV=0,5 \text{ m}$ og en antatt $K'_0=0,8$. Dette gir en beregnet in situ spenning på $p'=66,7 \text{ kPa}$ og $q=15,4 \text{ kPa}$ for dybde 8 m. Parameteren m_{sec} er funnet fra figur 4.3 til å være 10. Det er ikke gjennomført IL forsøk på Esp-materiale, derfor er r_s antatt. Det er her valgt å bruke r_s lik 500 som er tilsvarende r_s for Tiller-materiale, da materialene kan ses på som relativt like med tanke på materialegenskaper.

OCR-forhold

Tabell 5.1 viser alle parameterverdiene brukt for beregning av flyteflatene. Likning 2.4 er benyttet ved beregning av OCR-forhold mellom flyteflatene. Det er tatt utgangspunkt i 10 000 års flyteflaten og in situ spenningene. OCR-forholdet mellom 10 000 års flyteflates og 1- og 24 timers flyteflate vises i tabell 5.2.

Tabell 5.1: Parametervalg for Tiller- og Espmateriale for teoretiske flyteflater.

	Tiller	Esp
M	1,28	1,12
α	0,1	0,1
r_s	500	500
m_{sec}	20	10

Tabell 5.2: OCR-forhold mellom 10 000 års flyteflates og 1- og 24 timers flyteflate.

Trinntid	Tiller	Esp
24 h	1,670	1,290
1 h	1,895	1,377

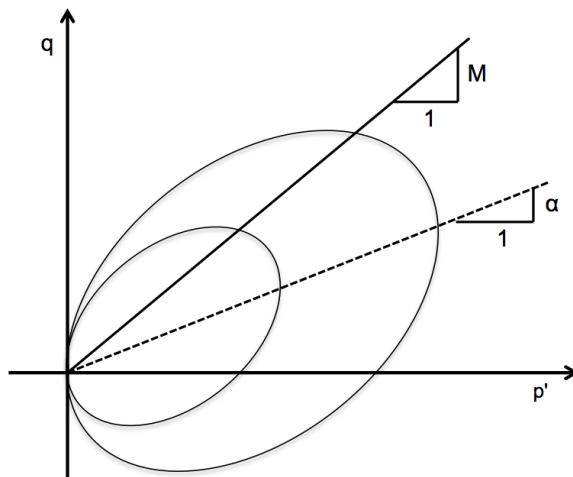
For å finne formen for flyteflatene er det valgt en rotert ellipse. Denne er funnet ved hjelp av likning 5.1 (Nordal, 2013b). Ellipsen er tilpasset, så godt det har latt seg gjøre, formen funnet fra forsøkene ved å variere α .

$$F = (q - \alpha p')^2 - (M^2 - \alpha^2)(p'_0 - p')p' = 0 \quad (5.1)$$

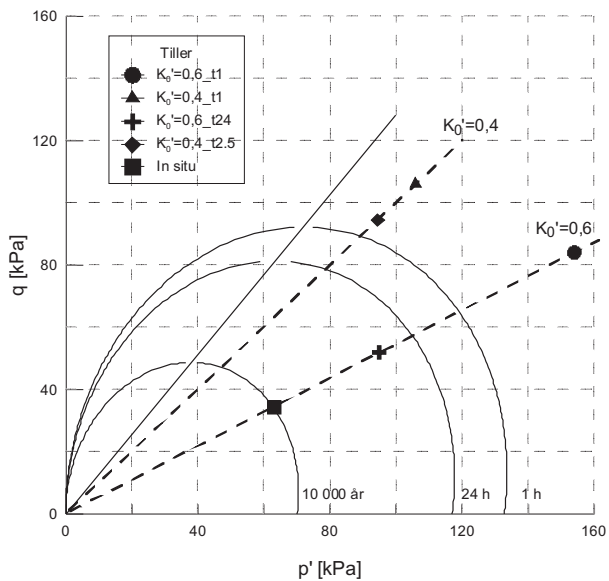
Hvor M er stigningstallet for bruddlinjen i et $q - p'$ -plott og α er den anisotrope fastningsparameteren, vist i figur 5.3.

I figur 5.4 og 5.5 er de beregnede flyteflatene skissert, for både Tiller og Esp. Inntegnet er også punktene fra de utførte K'_0 -forsøkene.

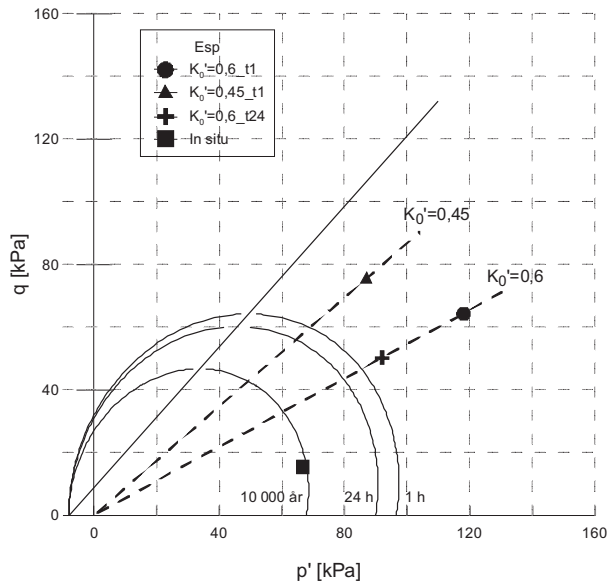
5.3. FLYTEFLATER



Figur 5.3: Forklaring av parameterne for en rotert ellipse.



Figur 5.4: De teoretiske flyteflatene for Tiller-materiale.



Figur 5.5: De teoretiske flyteflatene for Esp-materiale.

5.3.2 Sammenligning av flyteflater

Når man sammenligner flyteflatene funnet fra forsøk utført i laboratoriet og fra beregning for begge materialene, ser man en vesentlig forskjell. De målte 1 og 24 timers flyteflatene fra forsøkene ligger mye lenger til høyre enn de teoretiske. Det vil si at de målte resultatene tilsier et sterkere materiale enn de teoretiske beregnede resultatene.

Poretrykket i et treaksialapparat måles kun på utsiden av prøven, og det er derfor umulig å vite hvilke forhold som er inni prøven, og når hele prøven er uten poretrykk. På grunn av kvikkleirens permabilitet er det sannsynlig at det tar tid før hele prøven har oppnådd de ønskelige forholdene. Trinntiden ble målt fra lasten ble satt på, og det er derfor usikkert hvor lenge prøven var utsatt for de riktige effektivspenningene. Trinntiden burde i utgangspunktet måles fra det tidspunktet poretrykket er utliknet i hele prøven. Dette vil bety at prøvene som ble brukt til forsøkene med trinntid på en time, mest sannsynlig ikke hadde oppnådd de ønskede forholdene i den målte timen. Dette stemmer bedre, ettersom forsøk med lavere trinntid ville gitt et sterkere materiale som tilsvarer en plasserig lenger til høyre.

I tillegg til usikkerheten rundt effektivspenningene er det for få punkter å for-

holde seg til. Det gjør det vanskelig å avgjøre om punktene er gyldige eller ikke. Usikkerheten ved de teoretiske flyteflatene ligger i bestemmelse av parametrene, r_s og m_{sec} . En endring i en eller begge parametre gir store utslag på forholdet mellom flyteflatene.

5.3.3 Tiltak

For å kunne bestemme flyteflater og flyteflatens form er det foreslått flere tiltak som kan gjøre prosessen lettere. Hvis det er anledning til å kjøre forsøk med lengre trinntid, som for eksempel 48 timer eller 1 uke, er dette å anbefale. Da vil den korte tiden prøven ikke har riktige effektivspenningsforhold kunne negliseres, ettersom den har så lite å si i forhold til resten av forsøks tiden. Det er også ønskelig å ha muligheten til å måle poretrykk inne i prøven, for å ha kontroll på effektivspenningene i hele prøven. Da er det mulig å kjøre forsøk med kortere trinntid og fortsatt ha kontroll på effektivspenningene.

Det er nødvendig å utføre flere forsøk, både K'_0 -forsøk og trinnvis ødometer, for å kunne gi mer nøyaktige flyteflater og flyteflatens form. Det er viktig å bruke prosedyren som behandler prøven forsiktig under pålastning. Dette er for at prøven ikke skal drar på seg kryp som skyldes prosedyren, under forsøkene. Ved å pådra seg kryp vil strukturen i prøven endre seg, og forsøket vil være mislykket.

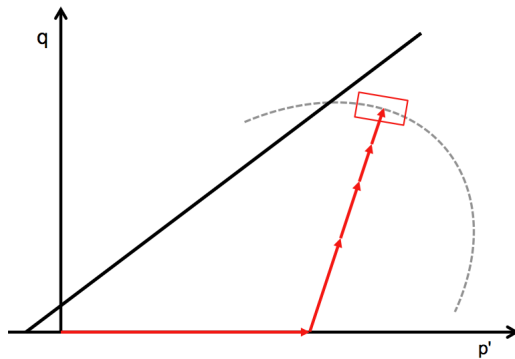
5.4 Skjærkryppforsøk

På grunn av tidsbegrensninger på denne masteroppgaven og problemer med gjennomføringen av K'_0 -forsøkene, ble det ikke tid til å gjennomføre udrenerte skjærkryppforsøk.

Etter prosessen med K'_0 -forsøkene, og problematikken rundt prosedyren, har forfatter fått mer fokus på hvordan materialet må behandles ved pålastingsprosessen. Det er helt avgjørende at materialet blir behandlet forsiktig under konsolideringen. Hovedfokuset for å få sammenlignbare skjærkryppresultater må ligge på konsolideringsfasen. Det er i konsolideringsfasen grunnlaget legges, da det er både viktig å komme til riktig spenningsstilstand for å kunne simulere en naturlig skråning samt at materialets struktur ikke er endret på på grunn av kryp. Konsolideringsfasen beskrevet i del 3.5.2 er derfor vurdert til å være for hard mot materialet, og det foreslås å bruke en mer skånsom konsolideringsmetode.

En mer skånsom konsolideringsmetode vil være å følge spenningsstien skissert i figur 5.6. Denne metoden er testet i forbindelse med forsøket der materialegen-

skapene ble vurdert etter endt konsolidering, i del 4.4. Prosedyren bestod av fem pålastingstrinn. Først ble celletrykket satt til ønsket σ'_v , og slik ble prøven stående i ca. 60 min til kurven for utpisset porevann var flatet ut. Deretter startet den vertikale pålastingen, som var delt opp i fire pålastingstrinn. Trinnene var delt opp, som vist i figur 5.6, der den første vertikale pålastingen var høyere enn den neste. Dette var for å minske risikoen for brudd når prøven nærmet seg bruddlinjen. Hvert av disse trinnene stod rundt 40 min før neste pålastingstrinn. Dette var for å sikre utjevnet poretrykk. Prosedyren fungerte meget godt, ettersom prøven stod stabilt i så høy skjærmobilisering.



Figur 5.6: Konsolideringsmetode for udrenert skjærkrypforsøk.

5.5 Vurdering av relevant utgangspunkt for forsøkene

Riktig utgangspunkt for en prøve er avgjørende for å kunne si noe om udrenert skjærkryp. Med utgangspunkt menes her den spenningstilstanden prøven har før skjærkrypforsøket. For å finne den riktige spenningstilstanden til et material som skal simulere en naturlig skråning, må flyteflatens form og in situ spenningene være kjent for å konsolidere prøven til en så riktig spenningstilstand som mulig. Dette er vist i figur 1.1. Flyteflatens form finner man ved å kjøre K_0 -forsøk.

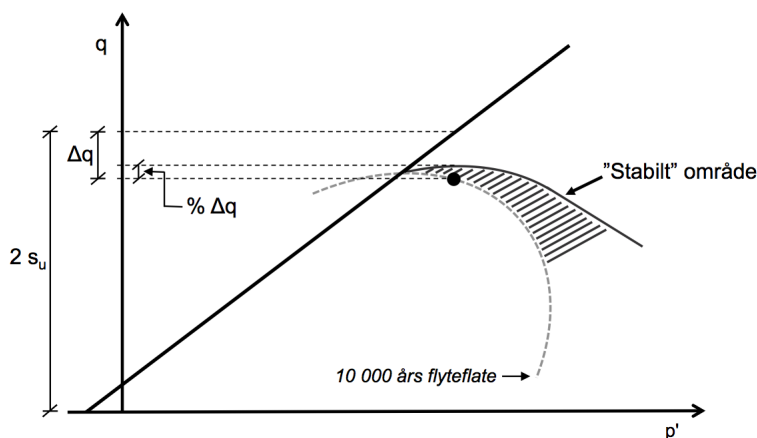
I løpet av høsten 2013 ble det utført udrenert skjærkrypforsøk for å kunne si noe om mobiliseringsgraden av s_u , f_{su} , der prøven går til krypbrudd. Resultatene som ble funnet, tilsa en f_{su} rundt 0,5 for krypbrudd (Torpe, 2013). Dette vil si at for å unngå krypbrudd ved udrenert skjærkryp, må sikkerhetsfaktoren, F , for en skråning ligge på rundt 2. Denne verdien var alt for stor til å kunne være

realistisk for en skråning. Grunnen til dette var at forsøkene ble konsolidert til en spenningstilstand tilsvarende materialets in situ spenninger. Materialet, som ble hentet fra et plant område, hadde aldri vært utsatt for skjær av betydning. Materiale fra et plant område kan i mye mindre grad motstå skjærspenninger enn et materiale fra en skråning, som har opplevd skjærspenninger gjennom hele sin historie. Det er med andre ord ikke rart at materialet testet i høst, ikke taklet skjærspenningene og utviklet krepbrudd ved en mye lavere f_{su} enn forventet. Disse forsøkene er med på å bekrefte viktigheten av valg av riktig utgangspunkt, konsoliderings spenningstilstand.

5.5.1 Stabilt område

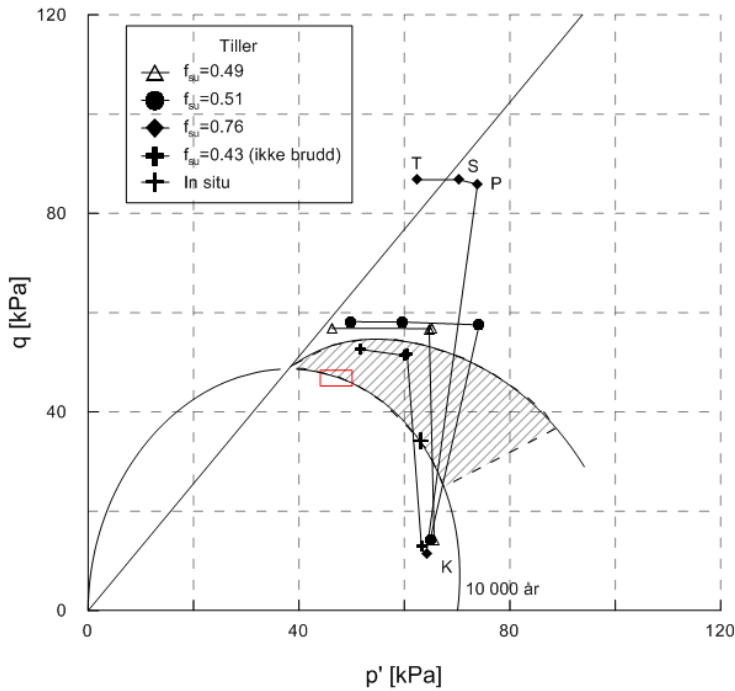
Figur 5.7 viser en prinsippskisse av et stabilt område der et materiale i en naturlig skråning ikke vil kripe til brudd på grunn av udrenert skjærkryp. Ved å gjennomføre forsøk med ulik vertikal last tilsvarende en % av Δq , vil en kunne beskrive det stabile området. Ved å kjøre et standard skjærforsøk fra den samme spenningstilstanden som skjærkrypforsøkene finner man en s_u som kan relateres til % av Δq . Dette gjør det mulig å si noe om mobiliseringsgraden av s_u for udrenert skjærkrepbrudd.

Det er viktig å legge merke til at Δq vil endre seg ettersom spenningstilstanden før skjærforsøket endrer seg.



Figur 5.7: Prinsippskisse av et anslått stabilt område for udrenert skjærkryp for materiale fra en naturlig skråning. Denne kan bestemmes ved hjelp av forsøk gjort på forskjellige % av Δq .

I figur 5.8 er noen av forsøkene gjennomført høsten 2013, plottet mot et skissert stabilt område. Det stabile området er skissert ut fra forsøkene. Det vil si at grensen går mellom de forsøkene som gikk til brudd og de som ikke gikk til brudd. Bokstavene K, P, S og T beskriver henholdsvis konsoliderings-, primær-, sekundær- og tertiærfase for forsøkene. Forsøkene $f_{su}=0,49$, $f_{su}=0,51$ og $f_{su}=0,76$ er utenfor det stabile området, og har derfor gått til krepbrudd. $f_{su}=0,43$ gikk ikke til brudd og er derfor innenfor det stabile området. Det skisserte stabile området vil, med flere forsøk med riktig utgangspunkt, kunne bestemmes med mer nøyaktighet.



Figur 5.8: Udrenert skjærkrypforsøk gjennomført høsten 2013 plottet mot et antatt stabilt område.

5.6 Materialegenskaper ved konsolidering

På grunn av forskjellig lagringstid, er resultatene fra Esp-materialet vurdert som mer relevant for tolkning, og blir derfor diskutert videre.

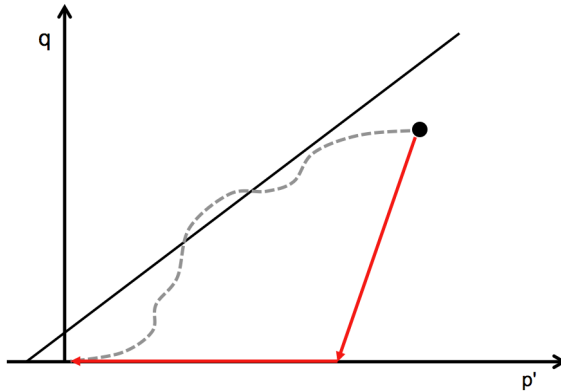
Resultatene viser at det ikke er så stor forskjell på materialeegenskapene ved før og etter konsolidering, med unntak av den udrenerte skjærstyrken, s_u . s_u har sunket ved konsolidering, fra 24,5 til 20,1 kPa. Når Esp-prøven ble bygd ut av treaksialapparatet viste det seg at deler av bunnen var mykere enn forventet, se figur 5.9.



Figur 5.9: Espforsøket etter det er bygd ut av apparatet og plassert opp ned, slik at bunnen er på toppen. Deler av bunnen var mykere enn normalt, som vises godt på prøven.

En slik forandring av struktur ville normalt vises på enten utpresset porevann eller aksiell deformasjonsmålinger. Da det ikke er registret en endring i utpresset porevann eller deformasjonsmålingene, er det mulig å anta at endringen har skjedd under avlastingsprosessen, etter endt forsøk. Ved avlastingen ble både celletrykket og aksiell last senket samtidig. Dette kan ha ført til at prøven er i nærheten av bruddlinjen under avlastingen, som skissert med stiplede linje i figur

5.10. For å unngå en slik oppførsel er det nødvendig å avlaste prøven som vist med den røde linjen i figur 5.10. Det gjøres ved først å avlaste prøven for den aksielle lasten, for deretter å senke celletrykket.



Figur 5.10: Den stiplede linjen viser mulig avlastingsmetode, mens den røde linjen viser en avlastingsmetode som er ønskelig for avlasting som ikke påvirker strukturen i materialet.

Det er med andre ord ikke registrert en drastisk endring i egenskapene til materialet, hvis en kan anta at avlastingsprosessen gjorde at prøven mistet noe av sin udrenerte skjærstyrke. Det er uansett ønskelig å gjennomføre et nytt forsøk, der avlastingen følger metoden beskrevet i figur 5.10, for å avklare situasjonen. Materialet er også fortsatt kvikt etter konsolideringsprosessen. Det vil si at en endring i spenningstilstand ikke påvirker materialets omrørte styrke.

5.7 Anbefalt prosedyre for gjennomføring av relevante skjærkrypforsøk

I denne delen er en anbefalt prosedyre presentert, for hvordan man skal gå fram for å få utført relevante skjærkrypforsøk. Denne prosedyren er basert på erfaringer opparbeidet gjennom laboratorieforsøk og diskusjoner rundt forsøkene.

For å kunne gjennomføre skjærkrypforsøk som vil besvare problemstillingen, har utgangspunktet alt å si. Det vil si at for å kunne se på udrenert skjærkryp, må materialet konsolideres til en relevant spenningstilstand, som simulerer en naturlig skråning. Naturlige skråninger ligger mobilisert rundt $f=0,83-0,90$, og det er i dette området man må sikte seg inn mot for forsøkene. For å kunne konsolidere til relevant spenningstilstand, er det flere forhold som må kartlegges på forhånd, slik at resultatene fra udrenert skjærkrypforsøk er sammenlignbare og relevante for problemstillingen.

- K'_0 -forsøk:

Det bør utføres minst fire K'_0 -forsøk, med to ulike K'_0 -verdier og to trinntider. Det må velges K'_0 -verdier som gir punkter i det området som er interessant for å simulere en naturlig skråning. Etter erfaringer er det anbefalt å bruke K'_0 -verdiene 0,6 og 0,5, ettersom det var vanskelig å gjennomføre en høyere mobilisert K'_0 uten å påføre prøven kryp som skyldes prosedyren. Anbefalt prosedyre for K'_0 -forsøkene er å øke celletrykket til ønsket σ'_3 og la prøven stå til kurven for utpresset porevann er flatet ut. Deretter øke den vertikale lasten i flere små trinn, til ønsket σ'_1 er nådd, og hvor hvert trinn får flate ut.

- Flyteflater:

Etter at K'_0 -forsøkene er gjennomført kan man skissere flyteflatens form og plassering ut fra punktene fra K'_0 -forsøkene. Om det skulle være nødvendig, kan disse flyteflatene sammenlignes med teoretiske beregnede flyteflater. For å kunne beregne flyteflater må det utføres ødometerforsøk, både IL og CRS, for å bestemme r_s og m_{sec} . Når flyteflatens form er bestemt kan man definere rett spenningstilstand for skjærkrypforsøket.

- Konsolideringen:

Prøven kan nå konsolidere til relevant spenningstilstand. Det er vesentlig at konsolideringsprosedyren er skånsom mot prøven. Prosedyren består av fem pålastningstrinn. Først økes celletrykket til ønsket σ'_3 , og slik bør prøven bli stående i ca. 60 min til kurven for utpresset porevann er flatet ut. Deretter starter den vertikale pålastingen, som er delt opp i fire pålastningstrinn.

Trinnene er delt opp, slik at den første vertikale pålastingen er høyere enn den neste. Dette er for å minke risikoen for brudd når prøven nærmer seg bruddlinjen. For å unngå endringer i materialets egenskaper, er det vesentlig å ha kontroll på effektivspenningsstien. Det er derfor ønskelig med måling av poretrykk inni prøven.

- Standard skjærforsøk:

Fra relevant konsolideringsspenningstilstand er det nødvendig å kjøre et standard skjærforsøk, som definerer s_u fra denne spenningstilstanden. Hvis det skal være mulig å si noe om mobiliseringsgrad av s_u der prøven kryper til brudd, må s_u defineres ut fra relevant spenningstilstand.

- Udrenert skjærkrypforsøk:

Til slutt må det kjøres skjærkrypforsøk med ulik vertikal last. Det gir muligheten til å si noe om for hvilken vertikal last prøven går fra stabilt til et ustabil område. Etter nok forsøk, kan det skisseres et stabilt område for udrenert skjærkrypforsøk.

5.7. ANBEFALT PROSEDYRE FOR GJENNOMFØRING AV RELEVANTE SKJÆRKRYPFORSØK

Kapittel 6

Konklusjon

Etter endt gjennomføring, tolkning og diskusjon er det under summert opp følgende konklusjoner:

- Materialet og utstyret brukt i denne masteroppgaven viser seg egnet til å gi riktig grunnlag for besvarelse av problemstillingen.
- Prøvekvaliteten på materialet kan tolkes ut fra ødometerforsøk.
- Det har vært utfordrende å gjennomføre høyt mobiliserte K'_0 -forsøk på kvikkleiremateriale med lang trinntid, ettersom forsøkene enten har gått til brudd eller begynt å pådra seg kryp som skyldes prosedyren. Det kan tyde på at det ikke er mulig å gjennomføre slike forsøk.
- Det er avgjørende å behandle materialet forsiktig under pålastingsprosessen for å få korrekte resultater. Dette gjelder for både K'_0 -forsøk og konsolideringsfasen.
- Effektivspenningsstien må evalueres i sammenheng med pålastingsprosessen, slik at man unngår at materialet endres. Om pålastingsprosessen er for hard mot materialet kan det pådra seg kryp, som følge av prosedyren, som vil endre materialets struktur. Denne endringen betyr at materialet ikke lenger er egnet for videre forsøk.
- For å kunne si noe om udrenert skjærkryp på kvikkleire er det avgjørende at utgangspunktet for forsøkene er riktig for problemstillingen. Det er viktig å konsolidere forsøkene til riktig spenningstilstand, ettersom materialet som brukes til forsøkene er hentet fra et plant område, men skal simulere en naturlig skråning.

-
- Ved å kjøre nok forsøk med likt utgangspunkt er det mulig å si noe om et stabilt område for udrenert skjærkryp.
 - Hvordan konsolideringsfasen for et udrenert skjærkrypforsøk burde være, er vurdert opp mot prosedyren for K'_0 -forsøkene. Det er anbefalt å velge en skånsom konsolideringsprosedyre der effektivspenningsstien er tatt i betraktning, for å unngå og endre på materialet før skjærkrypforsøket. Prosedyren består av fem pålastingstrinn. Først økes celletrykket til ønsket σ'_3 , og slik bør prøven bli stående i ca. 60 min til kurven for utpresset porevann er flatet ut. Deretter starter den vertikale pålastingen, som er delt opp i fire pålastingstrinn. Trinnene er delt opp, slik at den første vertikale pålastingen er høyere enn den neste, helt til σ'_1 er nådd.

Kapittel 7

Videre arbeid

I løpet av denne masteroppgaven er det flere ting som gjerne skulle vært jobbet ytterligere med, og flere forsøk som burde gjennomføres for å kunne besvare problemstillingen. For å gjøre det lettere å fortsette arbeidet som er startet på, er det under beskrevet nærmere hva som er aktuelt å se på ved videre arbeid.

På grunn av usikkerheten rundt de punktene funnet fra K'_0 -forsøkene, er det ønskelig å gjennomføre flere K'_0 -forsøk. Ved å skaffe en poretrykksmåler som kan måle poretrykket inne i prøven, vil det være lettere å ha kontroll på effektivspenningsforholdet inne i prøven. Dette gjør det mulig å gjennomføre forsøk med kort trinntid. I tillegg vil det være mulig å ha kontroll på effektivspenningsstien, som er nødvendig under pålastingsprosessen for å unngå krep. Om det blir vanskelig å installere en poretrykksmåler er det mulig å endre trinntiden til 48 timer eller 1 uke, ettersom den perioden prøven ikke har riktig effektivspenningsforhold vil kunne neglisjeres, da den har så lite å si i forhold til resten av forsøksperioden.

Den nye prosedyren for K'_0 -forsøk bør testes for $K'_0 > 0,45$ og undersøke for hvor lav mobiliseringsgrad prosedyren fungerer. Det kan eventuelt da kjøres forsøk på denne mobiliseringsgraden som vil hjelpe til å finne riktig form på flyteflaten. Det kan også vurderes å utføre K'_0 -forsøk for $K'_0 = 0$, for å ha flere holdepunkter for å finne flyteflatens form. Det burde også utføres IL-forsøk på Esp-materiale for å kunne bestemme r_s . De teoretiske flyteflatene vil da være mer nøyaktige, som igjen gir et bedre grunnlag for å sammenligne med flyteflatene funnet ved K'_0 -forsøk. Når flyteflatens form er etablert, burde det kjøres udrenert skjærforsøk fra riktig konsolideringsforhold slik at en s_u tilpasset konsolideringstilstanden kan brukes til vurdering når udrenerte skjærkrepforsøk utføres.

Litteraturliste

- Berre, T., Lunne, T., Andersen, K. H., Strandvik, S. og Sjørusen, M. (2007). “Potential improvements of design parameters by taking block samples of soft marine Norwegian clays”. *Canadian Geotechnical Journal* 44.6, s. 698–716.
- Bjerrum, L. (1967). “Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings”. *Géotechnique* 17.2, s. 81–118.
- Boudali, M. (1995). “Comportement tridimensionnel et visqueux des argiles naturelles”. Ph.d.-avh. Université Laval, Québec, Canada.
- Burland, J. B. (1990). “On the compressibility and shear strength of natural clays”. *Géotechnique* 40.3, s. 329–378.
- Campanella, R. G. og Vaid, Y. (1974). “Triaxial and plane strain creep rupture of an undisturbed clay”. *Canadian Geotechnical Journal* 11.1, s. 1–10.
- Casagrande, A. og Wilson, S. D. (1951). “Effect of rate of loading on the strength of clays and shale at constant water content”. *Géotechnique* 2.3, s. 251–263.
- Christensen, S. (1986). “Triaxial creep tests Eberg clay”. *SINTEF report*.
- Degago, S. A. og Grimstad, G. (2014). “Significance of sample quality in settlement analysis of field cases”. In *Proceedings for Numerical Methods in Geotechnical Engineering*.
- Emdal, A. (2009). *Introduksjon til Geoteknikk*. Kompendium.
- Fredriksen, F. J. (1983). “Undersøkelse av en leires krypegenskaper under drenerte og udrenerte forhold”. Masteroppg. NTNU.
- Google (2014). *GOOGLE MAPS*. URL: <https://www.google.no/maps/preview>.
- Graham, J., Crooks, J. H. A. og Bell, A. L. (1983). “Time Effects on the Stress-Strain Behavior of Natural Soft Clays”. *Géotechnique* 33.3, s. 327–340.

- Gylland, A., Long, M., Emdal, A. og Sandven, R. (2013). "Characterisation and engineering properties of Tiller clay". *Engineering Geology* 164, s. 86–100.
- Head, K. H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 3: Effective Stress Tests*. Pentech Press Limited.
- Janbu, N. (1989). *Grunnlag i geoteknikk*. Tapir.
- Karlsrud, K., Otter, R. og Gjelsvik, V. (2013). "State-of-the-art: Blokkprøver".
- King, J. R. (2013). "Udrenert skjærkryp i kvikkleire". Masteroppg. NTNU.
- Länsivaara, T. (1999). "A study of the mechanical behavior of soft clay". Ph.d.-avh. NTNU.
- Leroueil, S., Tavenas, F., Brucy, F., Rochelle, P. L. og Roy, M. (1979). "Behavior of Destructured Natural Clays". *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 105.6, s. 759–778.
- Lunne, T., Berre, T. og Strandvik, S. (1997). "Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay". I: *Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*.
- Mewis, J. (1979). "Thixotropy - A General Review". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 6, s. 1–20.
- NGU (2014). *Løsmassekart*. URL: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>.
- NIFS (2013). *NIFS*. URL: www.naturfare.no.
- Nordal, S. (2013a). *Creep and the Soft Soil Creep Model*. Forelesning i TBA4116 Geoteknikk VK.
- Nordal, S. (2013b). *Geotechnical Engineering - Advanced course*. Kompendium.
- NVE (2011). "Vurdering av områdestabilitet ved utbygging på kvikkleire og andre jordarter med sprøbruddegenskaper".
- NVE (2012). *Kvikkleireskred ved Esp, Byneset i Trondheim*. Tekn. rapp. 1-2012. NVE.
- Sandven, R. (2012). *Geotechnics, Field and Laboratory Investigations-Part 2*. Kompendium.
- Singh, A. og Mitchell, J. K. (1968). "General stress-strain-time function for soils". *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* 94.SM1, s. 21–46.
- Skempton, A. W. (1954). "The pore-pressure coefficients A & B". *Géotechnique* 4, s. 143–147.

LITTERATURLISTE

- Tavenas, F., Leroueil, S., Rochelle, P. L. og Roy, M. (1978). "Creep behaviour of an undisturbed lightly overconsolidated clay". *Canadian Geotechnical Journal* 15.3, s. 402–423.
- Tidfors, M. og Sällfors, G. (1989). "Temperature effects on preconsolidation pressure". *Geotechnical Testing Journal* 12.1, s. 93–97.
- Torpe, G. (2013). "Evaluering av udrenert skjærkryp i sensitiv leire". Masteroppg. NTNU.
- Vaid, Y. og Campanella, R. G. (1977). "Time Dependent Behavior of an Undisturbed Clay". *Geotechnical Division* 103.7, s. 693–709.
- Vegvesen, S. (2010). *Geoteknikk i vegbygging*. Håndbok V221.
- Wood, D. M. (1990). *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press.

Vedlegg

Vedlegg A

Forsøksinformasjon

Lokasjon	Testnavn	Blokk	Lag	Bruk	Prøvetaking	Åpnet	Testet
Tiller	T_k0_0,4_t1	8,95-9,30	1	k0 forsøk	23.08.13	17.03.14	07.03.14
Tiller	T_k0_0,6_t1	8,95-9,30	1	k0 forsøk	23.08.13	17.03.14	19.03.14
Tiller	T_k0_0,4_t2,5	8,95-9,30	1	k0 forsøk	23.08.13	17.03.14	21.03.14
Tiller	T_index_1	8,95-9,30	1	indeks	23.08.13	17.03.14	17.03.14
Tiller	T_IL_t24	8,95-9,30	2	ødometer	23.08.13	17.03.14	25.04.14
Tiller	T_k0_0,6_t2,5	8,95-9,30	2	k0 forsøk	23.08.13	17.03.14	
Tiller	T_k0_0,4_t24	8,95-9,30	2	k0 forsøk	23.08.13	17.03.14	29.04.14
Tiller	T_k0_0,6_t25	8,95-9,30	2	k0 forsøk	23.08.13	17.03.14	29.04.14
Tiller	T_k0_0,4_t24-1	9,30-9,60	1	k0 forsøk	23.08.13	05.05.14	05.05.14
Tiller	T_k0_0,4_t24-2	9,30-9,60	1	k0 forsøk	23.08.13	05.05.14	06.05.14
Tiller	T_kons_test	9,30-9,60	1	kons. + indeks	23.08.13	05.05.14	15.05.14
Tiller	T_kons_index	9,30-9,60	1	indeks	23.08.13	05.05.14	15.05.14
Tiller	T_kons_test_2	9,30-9,60	2	kons. + STD	23.08.13	05.05.14	16.05.14

Lokasjon	Testnavn	Blokk	Lag	Hull	Bruk	Prøvetaking	Åpnet	Testet
Esp	E_k0_0,6_t24	7,30-7,60	1	1	k0 forsøk	18.03.14	02.04.14	02.04.14
Esp	E_CRS_7,4	7,30-7,60	1	1	ødometer	18.03.14	02.04.14	02.04.14
Esp	E_STD_7,90-8,20_2	7,90-8,20	1	1	STD	18.03.14	07.04.14	08.04.14
Esp	E_k0_0,4_t1	7,90-8,20	1	1	k0 forsøk	18.03.14	07.04.14	28.04.14
Esp	E_k0_0,45_t1	7,90-8,20	1	1	k0 forsøk	18.03.14	07.04.14	29.04.14
Esp	E_CRS_7,95	7,90-8,20	1	1	ødometer	18.03.14	07.04.14	07.04.14
Esp	E_k0_0,6_t1	7,90-8,20	2	1	k0 forsøk	18.03.14	07.04.14	30.04.14
Esp	E_k0_0,45_t24	7,90-8,20	2	1	k0 forsøk	18.03.14	07.04.14	06.05.14
Esp	E_k0_0,6_t24	7,90-8,20	2	1	k0 forsøk	18.03.14	07.04.14	01.05.14
Esp	E_kons_test	7,90-8,20	1	2	kons	09.05.14	07.04.14	20.05.14
Esp	E_k0_0,45_t24_test	7,90-8,20	1	2	k0 forsøk	09.05.14	20.05.14	20.05.14
Esp	E_index	7,90-8,20	1	2	indeks	09.05.14	20.05.14	20.05.14
Esp	E_k0_0,45_t24_test2	7,90-8,20	1	2	k0 forsøk	09.05.14	20.05.14	21.05.14
Esp	E_k0_0,45_t24_test3	7,00-7,30	1	2	k0 forsøk	09.05.14	23.05.14	23.05.14

Vedlegg B

Rutineresultater, Esp

Tabell B.1: Resultater fra rutineundersøkselser på Esp-materiale

	Borestad	Byneset, Esp	Byneset, Esp		Byneset, Esp	
	Materiale	Blokkprøve	54 mm		Blokkprøve	
	Dybde	7,33-7,45	6,2-7,0		7,97-8,12	
	Prøvetaking	18.03.14	24.01.14		18.03.14	
	Labtesting	24.03.14	26.03.14		10.04.14	
s_u	kPa	22,6	26,0	24,0	24,0	28,4
s_r	kPa	0,29	0,39	0,29	0,39	0,29
s_t		77,9	66,7	82,8	61,5	97,9
w	%	38,4	35,5	38,1	38,8	36,0
w_L	%	17,6	24,6	33,8		26,4
w_P	%	18,6	18,7	18,6	19,9	
ρ_s	g/cm^3			2,45		
ρ	g/cm^3			1,41		
s	g/l			0,7		
Leireinnhold	%			32		

Date: 26.03.14

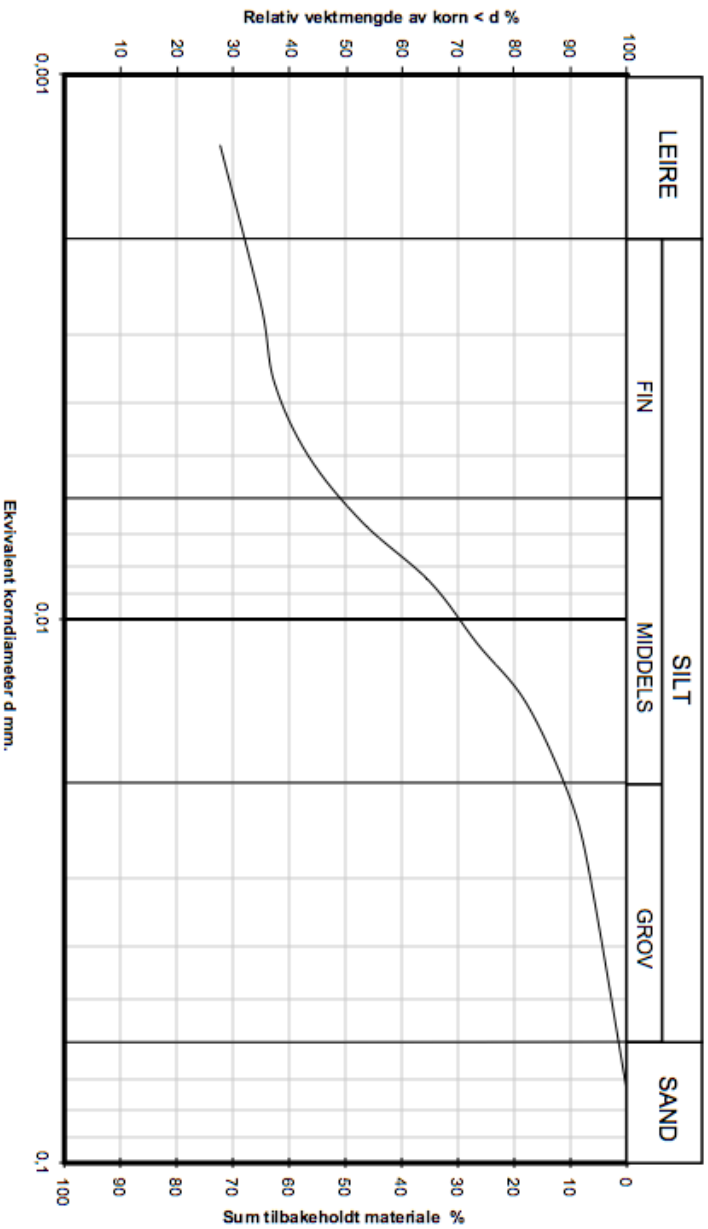
Oppdragsnummer:

Hullnummer: Miniblokk 1

Oppdragsgiver:

Prøvested: Esp

Dybde: 6,3



Figur B.1: Hydrometeranalyse av materiale fra Esp, dybde 6,2-7,0.

Vedlegg C

Testing av ekstra membran

Lekkasje fra cellevannet inn til prøven viste seg å være et problem. Underveis i prosessen ble derfor ulike løsninger testet for å få stoppet lekkasjen. En teori med utgangspunkt i at gummihuden trekker til seg vann under forsøket og dermed muligens transporterer vann fra cellevannet inn til prøven, gjorde at fokus var på å beskytte gummihuden med noe ekstra.

Etter samtale med forskjellige produsenter av membranbeskyttelse, hvor det ble forklart hva som var ønsket av produktet, fikk vi tilsendt en vareprøve av Purflex G fra Mapei. Dette er en tokomponent produkt. Det ble blandet og smørt på to gummihuder, se figur C.1. Det var vanskelig å få et tynt dekkende lag. Når laget hadde tørket var det klart at det ble for stivt og ville være en «hindring» for lateral deformasjon. Konklusjonen var at produktet ikke kunne brukes til dette formålet.



Figur C.1: Purflex G smørt på to gummihuder