

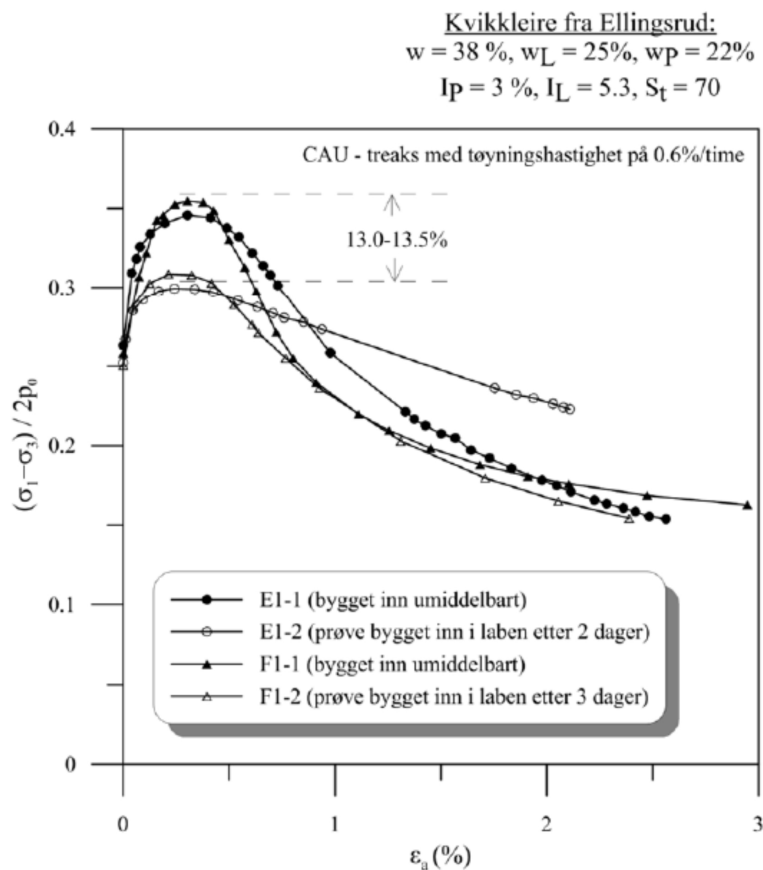


Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6. Kvikkleire

Effekt av lagringstid på prøvekvalitet

67
2014

R
A
P
P
O
R
T



Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire

Effekt av lagringstid på prøvekvalitet

Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket

2014

Rapport nr. 67/2014

Effekt av lagringstid på prøvekvallitet

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket

Utarbeidet av:

Jean-Sebastien L'Heureux, Yunhee Kim (NGI)

Dato: 01.12.2013 Opplag: P.O.D.

ISBN: 978-82-410-1019-4

Avrop:

Uavhengig av om udrenert skjærfasthet er målt i laboratoriet eller in-situ, er det trolig noe påvirket av prøveforstyrrelse. Generelt, vil prøveforstyrrelse(r) føre til at målt fasthet er lavere enn hva som faktisk kan bli mobilisert i felt. Prøver testet i laboratoriet vil oppleve forstyrrelser på grunn av spenningsavlastning og mulig forstyrrelse av den naturlige strukturen i jorda forårsaket av prøvetaking og håndtering i felten, transport til laboratoriet, laboratorie-lagring, og prøveforberedelse/behandling. Ved langtids lagring, kan forstyrrelser også skyldes omfordeling av vann og kjemiske endringer, samt mulige endringer i vanninnhold dersom prøvene ikke er skikkelig forseglet.

På grunn av begrenset kapasitet på laboratoriene er det ofte slik at sensitive leireprøver svært sjelden testes rett etter prøvetaking. Ventetiden kan være i størrelsesorden dager, uker eller noen ganger måneder. En slik lang forsinkelse/lagring gir ikke bare redusert troverdighet for testresultater, men kan også bidra negativt ved å øke usikkerheten bak dimensjonerende verdier. Derfor er det behov for å undersøke og dokumentere effekten av lagringstiden på prøveforstyrrelse og skaffe mer robuste kriterier for å klassifisere prøvekvallitet.

Prosjektet deles opp i to trinn der første trinn vil være en arkivstudie og oppsummering av tilgjengelig materiale og resultater fra tidligere undersøkelser. Omfang av trinn to vil være avhengig av resultater fra første trinn, men det er sannsynlig at tilgjengelig data må suppleres med nye prøver og nye laboratorieundersøkelser for å få tilstrekkelig grunnlag for anbefalinger og konklusjoner.

Basert på tilgjengelige lab.-resultater for sensitive leirer, ønsker vi en anbefaling knyttet til effekt av lagringstid av sensitive leirer. Det vil si at vårt mål er å finne ut om det er mulig å angi maks. anbefalt lagringstid for ulike prøvetyper og prøvedybder i forhold til oppnåelig prøvekvallitet. Anbefalingen bør underbygges med sammenstilling av forsøksresultater og konkrete referanser samt forslag til arbeidsprogram for trinn 2. Vi ber om at leveransen også har synspunkter knyttet til resultatene/konklusjonene: Hva skal, bør eller kan tas i bruk? Hvordan skal det brukes?

Emneord: prøvekvallitet, blokkprøver, kvikkleire, lagringstid



Rapport / Report

NIFS – N.6.4.3 Effekt av lagringstid på prøvekvalitet

State of the art-rapport

20130672
1. desember 2013
Rev. nr.: 0

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGL.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGL.



Prosjekt

Prosjekt: NIFS – N.6.4.3 – Effekt av lagringstid på prøve kvalitet
Dokumenttittel: State-of-the-art-rapport
Dokumentnr.: 20130672
Dato: 1. desember 2013
Rev. nr./rev. dato: 0

Hovedkontor:
Pb. 3930 Ullevål Stadion
0806 Oslo

Avd Trondheim:
Pb. 1230 Sluppen
7462 Trondheim

T 22 02 30 00
F 22 23 04 48

Kontonr 5096 05 01281
Org. nr 958 254 318 MVA

ngi@ngi.no
www.ngi.no

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Statens Vegvesen
Kontaktperson: Vikas Thakur
Kontraktreferanse: Avropsskjema oppdragsnummer N-6.4.3 mottatt 2013-08-23

For NGI

Prosjektleder: Jean-Sebastien L'Heureux
Utarbeidet av: Jean-Sebastien L'Heureux, Yunhee Kim
Oversettelse av: Tone Solem
Kontrollert av: Kjell Karlsrud

Sammendrag

Denne rapporten fokuserer på effekten av lagringstid på prøve kvalitet i sensitiv leire. Rapporten ble utarbeidet i forbindelse med etatsatningsprosjektet "Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred" (NIFS), delprosjekt 6, som fokuserer på stabilitet i kvikkleireavsetninger. Den første delen av rapporten diskuterer de flerfoldige faktorene som leder til prøveforstyrrelser i sensitiv leire, etterfulgt av en grundig gjennomgang av tilgjengelig litteratur data og upublisert data fra NGI, som dokumenterer effekten av lagringstid på jordparametere tolket fra laboratoriet.

Lagring av leirprøver over tid kan påvirke leirens mekaniske egenskaper. De mest betydelige mekaniske effekter over tid føre til en reduksjon i 1) stivhet, 2) peak skjærstyrke, 3) prekonsolideringstrykk (p'_c), 4) omrørt udrenert skjærstyrke, 5) sensitivitet og 6) kompresjonsindeks. Disse endringene er knyttet til en migrasjon av porevæsker (forandring i prøvens vanninnhold tvers over prøven) og tilhørende

Sammendrag (forts.)



Dokumentnr.: 20130672
Dato: 2013-12-01
Rev. nr.: 0
Side: 4

forandringer i spenningsfordeling, til tørking og fuktighetstap, kjemiske virkninger og pH-forandringer (grunnet oksydasjon), og også temperatur- og fuktighetsforandringer.

Resultatene presentert i denne rapporten viser at effekten av lagringstid for de mekaniske egenskapene for leire kan være nokså viktig i de tidlige stadiene av lagringstiden (ca. de første ti dagene), særlig for prøver samlet med en stempelprøvetaker (54 – 72 mm). Det er derfor en betydningsfull praksis å utføre undersøkelsene så fort som mulig etter prøvetaking.

Vurdering av prøve kvalitet er en viktig del av geoteknisk prosjektering som hjelper geoteknikere å velge riktig mekaniske egenskaper for en leire. Forandringer i porevannskjemi er som regel ikke vurdert i vanlige geotekniske laboratorieundersøkelser, selv om mange resultater har vist at små forandringer i porevannskjemien kan føre til forandringer i udrenert skjærstyrke for leire. Forandringer i porevannskjemi og pH innen leirprøver burde evalueres dersom prøvene skal lagres over lengre tid.

Grunnet begrenset kapasitet i geotekniske laboratorier, blir leire prøver sjelden testet umiddelbart etter prøvetaking. Ventetiden kan variere fra dager til måneder. Det er derfor et behov for å kvantifisere betydningen av lagringstid for de mekaniske egenskapene for leire, og for å gi retningslinjer for industrien. Et forslag til et laboratorieprøveprogram kommer derfor på slutten av denne rapporten.

Innhold

1	Introduksjon	6
2	Årsaker til prøveforstyrrelser i bløtt og sensitiv leire	7
3	Effekten av lagringstid	10
3.1	Innvirkning på indeksegenskaper	10
3.2	Innvirkning på mekaniske egenskaper	13
3.3	Innvirkning på porevannskjemi	22
3.4	Oppsummering – kilde og konsekvenser av lagringstid	26
4	Effekten av lagringstid og vurdering av prøve kvalitet	29
5	Forslag til laboratorieprogram	32
6	Konklusjon	34
7	References	35

Kontroll- og referanseside

1 Introduksjon

Norges Geotekniske Institutt (NGI) ble av Statens Vegvesen (SVV), Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) tildelt en rammeavtale innen det statlige prosjektet "Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred" (NIFS) delprosjekt 6, som fokuserer på kvikkleireproblematikk. Innenfor denne rammeavtalen inngikk studien av effekten av lagringstid på prøvekvallitet.

Geoteknisk prosjektering i områder med sensitiv leire og vitenskapelig forståelse av bløtt og kvikk leirer, avhenger av prøver hvor forstyrrelsene er minimalisert. Prøveforstyrrelser oppstår som et resultat av mange faktorer i forbindelse med prøvetaking, transport av prøver, ekstrusjon, samt forberedelse før laboratorietesting. Strukturendringer i bløtt og sensitiv leire kan også over tid oppstå i lagringsrommet grunnet migrasjon av porevann og geokjemiske reaksjoner innen prøven. Grunnet begrenset kapasitet i geotekniske laboratorier, blir prøver sjelden testet like etter prøvetaking, og ventetiden kan variere fra dager til flere måneder. Konsekvensene av slike forsinkelser er sjelden vurdert, og ofte også fullstendig ignorert av geoteknikere, selv om det kan forandre prøvens mekaniske egenskaper. Det er derfor et behov for å øke vår kunnskap og dokumentere effekten av lagringstid på prøvekvallitet.

Denne rapporten ble utarbeidet gjennom en analyse av litteratur og upublisert data fra NGI, i tillegg til en diskusjon med prosjektmedarbeidere høsten 2013. Et lite notat fra professor Mike Long ved Universitetet i Dublin var også tilgjengelig for dette prosjektet, og hjalp oss med å finne relevant litteratur. Følgende personer har bidratt til prosjektet gjennom diskusjoner og innsamling av data:

Vikas Thakur – SVV (kontaktperson NIFS)
Yunhee Kim – NGI
Kjell Karlsrud – NGI
Kristoffer Kåsin – NGI
Magnus Rømoen – NGI
Toralf Berre – NGI
Morten Andreas Sjørnsen – NGI
Mike Long – UCD
Jean-Sebastien L'Heureux – NGI (prosjektleder)

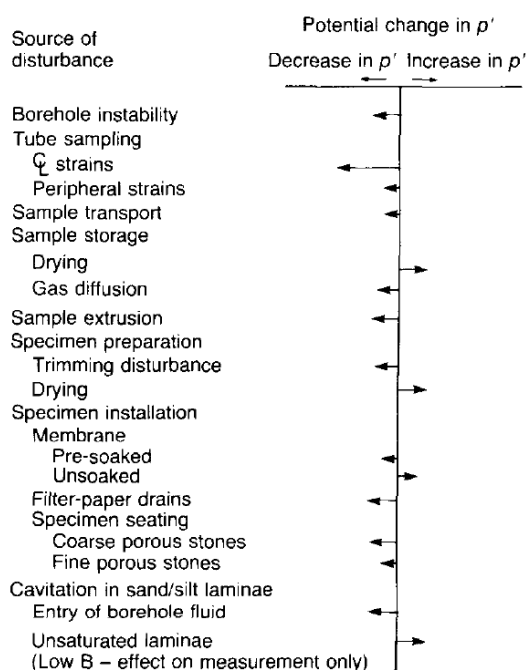
Rapporten begynner med en kort og generell gjennomgang av faktorer som påvirker prøvekvalliteten. Slike faktorer er viktige å ta med i beretningen, da disse kan påvirke effekt av lagringstiden. Hovedformålet med denne rapporten er å summere tilgjengelig litteratur og nylig forskning vedrørende effekten av lagringstid på jordparametere. Dette er presentert i kapittel 3. Videre gir rapporten noen anbefalinger og presenterer forslag til et laboratorieprogram for å bedre kunne vurdere effekten av lagring på prøvekvallitet i framtiden. Dette er presentert i kapittel 5.

2 Årsaker til prøveforstyrrelser i bløtt og sensitiv leire

Leires mikrostruktur har en stor innflytelse på de mekaniske egenskapene i bløtt og sensitiv leire. Dersom båndene som forårsaker mikrostrukturen blir ødelagte, er leire forstyrret eller destrutturert. De mest signifikante virkningene av prøveforstyrrelse i bløtt leire summeres av Hight og Leroueil (2003) på følgende måte:

- En nedgang i leiras stivhet
- En nedgang i peak skjærstyrke og i prekonsolideringstrykk (p'_c), i tillegg til en sammentrekning for hele den limit state kurven
- En nedgang i kompressionsindeksen

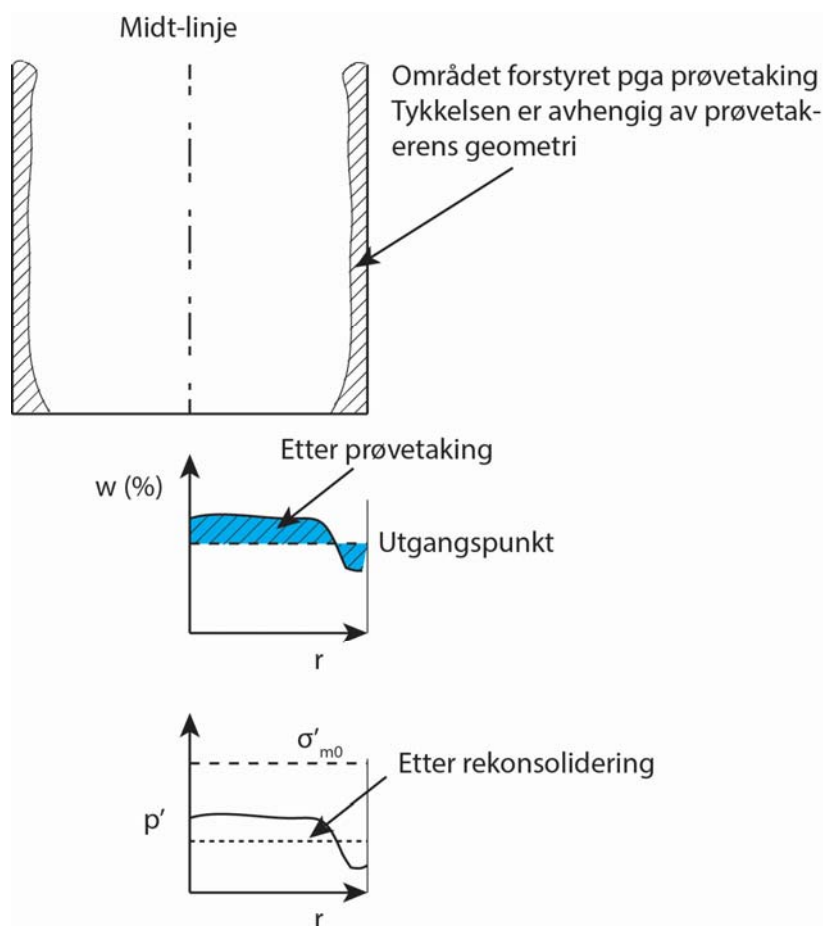
Prøveforstyrrelser oppstår utvilsomt som et resultat av mange faktorer i forbindelse med prøvetaking, transport av prøver, lagring av prøver, ekstrusjon, samt forberedelser for laboratorietesting (Figur 1).



Figur 1: Faktorer som påvirker effektiv spenningene i bløtt leireprøver.

Som følge av Hvorslevs (1949) fundamentale arbeid, som representerer den første omfattende studien av prøveforstyrrelser, kom store bidrag til dette emnet i 1960-årene gjennom arbeid utført av Skempton og Sowa (1963), Ladd og Lambe (1963), og Noorany og Seed (1965). Disse studiene identifiserte tap av skjærspenning forbundet med å ta opp en prøve fra jorda som en uunngåelig komponent av forstyrrelser forbundet med prøvetaking (Figur 2). I tillegg kvantifiserte de virkningen av denne prosessen på skjærstyrke målt i laboratoriet, og oppdaget at det bare delvis kunne beskrive resultatene oppnådd for "forstyrrede" prøver. Utover årene fortsatte studien av forstyrrede prøver, og disse var konsentrert omkring utvikling av prøvetakere (LaRochelle et al. 1981); rekonsolideringsprosedyrer for

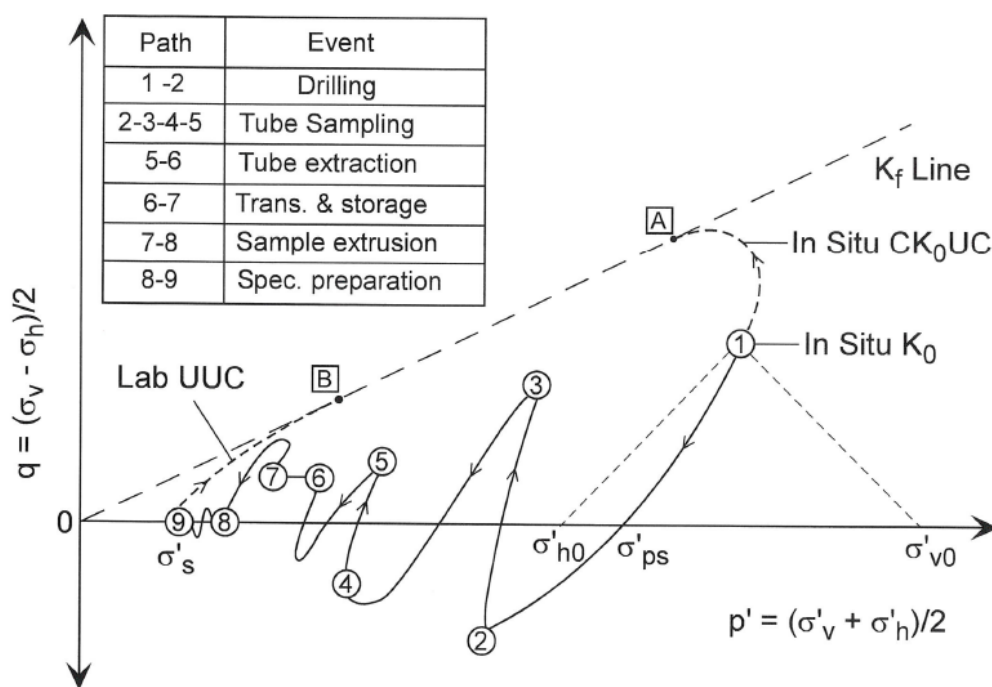
gjenvinning av leiras intakte egenskaper i laboratoriet (Bjerrum 1973; Ladd og Foott 1974); utarbeidelse av retningslinjer for tilstrekkelig håndtering i laboratoriet (lagring av prøver, forberedelse, etc.); prosedyrer (Atkinson et al. 1992); undersøkelse av effekten av prøvforstyrrelse for diverse geotekniske parametere gjennom analyse av laboratedata (Hight et al. 1992), og/eller simulering av prøveprosessen i laboratoriet (Noorany og Poormand 1973; Clayton et al. 1992; Siddique et al. 1999); og modellering av forstyrrelsesprosessen gjennom analytiske (Baligh et al. 1987) eller numeriske (Budhu and Wu 1992) teknikker. Videre arbeid har også undersøkt virkningen av ulike detaljer ved prøvetakerens geometri, inkludert indre og ytre klaring, eggvinkel på inn og utsiden av prøvetakeren og arealforholdet (Clayton et al. 1998). En økning av parameterne nevnt ovenfor leder til økt kompressiv tøyning foran skjære-eggen eller til økt strekk tøyning over skjære-eggen.



Figur 2: Forenklet illustrasjon av vanninnhold og effektiv spenningsfordeling etter tubeprøvetaking i normal eller lett overkonsolidert leire

Undersøkelser av blokkprøver har over årene vist at egenskapene for sensitiv leire er ganske forskjellige fra de målt på prøver tatt opp med konvensjonelle stempelprøvetakere (Crawford 1963; Conlon 1966; LaRochelle og Lefebvre 1971, Karlsrud og Hernandez-Martinez 2013). Målt skjærstyrke og stivhet er generelt

høyere og sprøheten mye bedre definert enn ved standard stempelprøvetaking. Blokkprøvetaking er imidlertid kostbart, og kan bli teknisk problematisk eller finansielt uoverkommelig under kritiske dybder i bløtt leire. Den mest vanlig måten for å skaffe en prøve på er derfor ved å bore et hull og presse et rør ned i grunnen. Som forklart av Baligh et al. (1987), prøveforstyrelse kan resultere i den hypotetiske spenningsmønster presentert i Figur 3. Forstyrrelse kan forekomme i hver av fasene vist i denne figuren. Vanlige forstyrrelser forekommer som følge av: (i) forandringer i grunnforhold foran prøvetakeren under boreoperasjon; (ii) nedpressing av prøvetakeren og opptrekking av prøven til overflate; (iii) omfordeling av vanninnhold i prøven (se Figur 2); (iv) ekstrusjon av prøven fra tuben; (v) uttørring og/eller forandring i vanntrykk; og (vi) skjæring og andre momenter nødvendig i forbindelse med preparering av prøven for lab forsøk. Andre forstyrrelser kan også være betydelig i spesielle tilfeller. Eksempler inkluderer utvidelse av oppløste gasser når prøvene blir bragt til overflaten (offshore prøver); dynamiske effekter eller gjennom tøff behandling og transportering; temperaturforandringer i kjemiske eller biologiske og aktive bunnfall, etc.



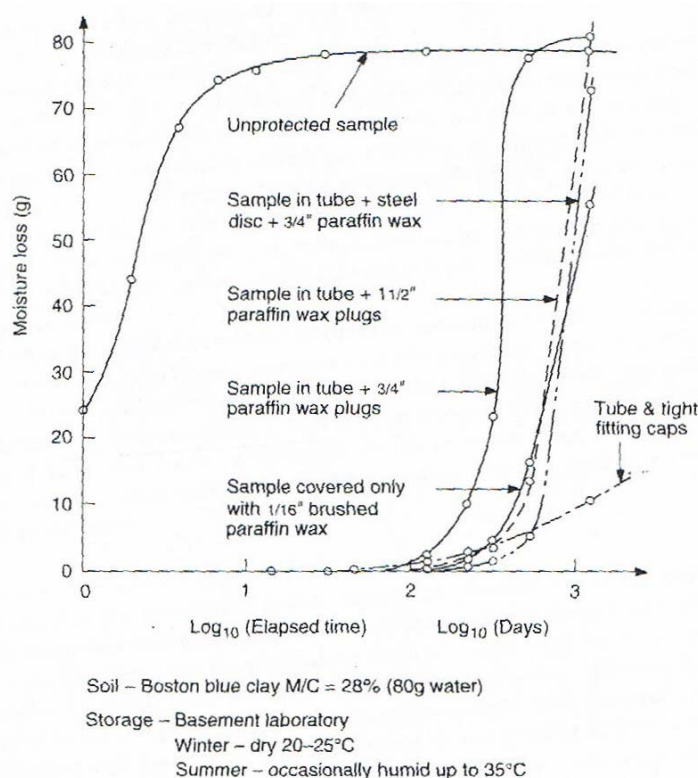
Figur 3: Hypotetisk spenningsbane under prøvetaking og prøveforberedelse for et element tatt midt i en normalkonsolidert prøve (Ladd and De Groot, 2003).

Hovedfokuset i denne studien er å evaluere effekten av lagringstid på prøve kvaliteten i bløtt og sensitiv leire. Som vi så ovenfor, er det imidlertid mange forskjellige kilder til prøveforstyrelse, og disse kan være svært vanskelig å skille fra hverandre når man ser på resultatet for en gitt prøve. Dette må tas i betraktning når man leser resten av rapporten. For videre dokumentasjon av prøveforstyrelse som følge av prøvetaking, refereres det til Lunne et al. (1997 og 2006).

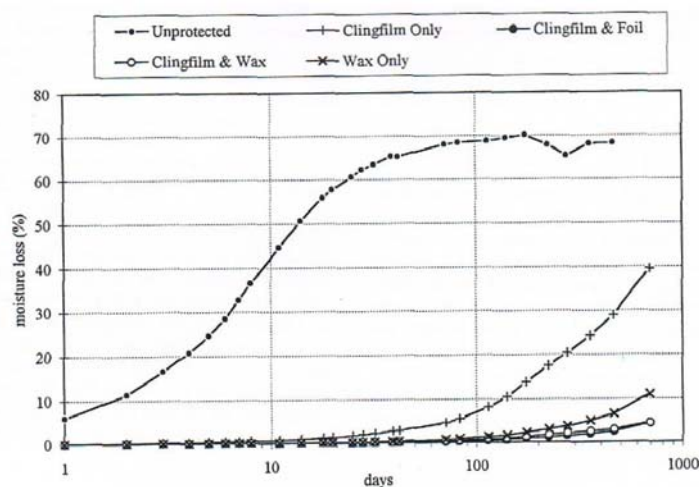
3 Effekten av lagringstid

3.1 Innvirkning på indeksegenskaper

Til tross for forhåndsregler knyttet til transport, forberedelse, beskjæring og håndtering, kan leireprøvens egenskaper også forandres ved andre fenomen, slik som vannutvandring innen prøven og fuktighetstap ved lagring. Hvorslev registrerte disse problemene allerede på slutten av 1940-tallet. Hvorslev (1949) viste betydningen av forseglingsteknikker for å minimere fuktighetstap ved langtidslagring av prøver (Figur 4). En lignende studie av Heymann (1998) av London leire er vist i Figur 5. Heymann og Clayton (1999) argumenterer for at selv et lite tap av vanninnhold ved lagring kan føre til betydningsfulle forandringer i prøvens effektive spenning.

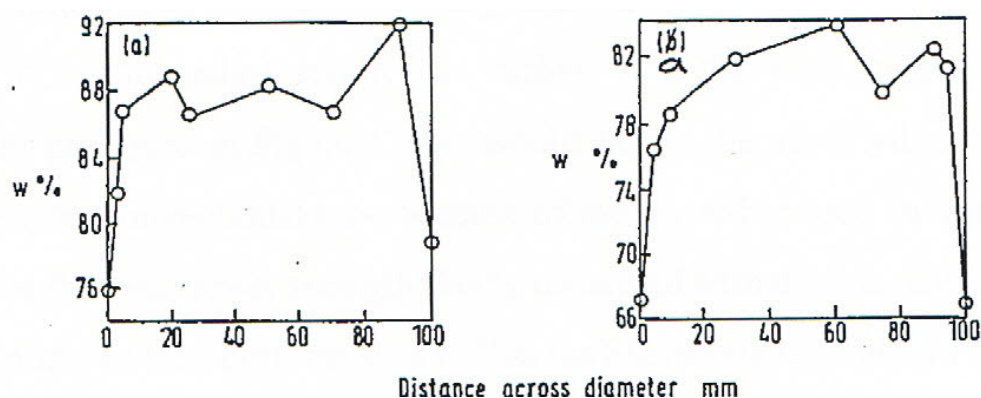


Figur 4: Fuktighetstap ved lagring og ulike forseglingsmetoder. Data fra Hvorslev (1949). Figur tatt fra Clayton et al. (1995).



Figur 5: Fuktighetstap med ulike forseglingsmetoder etter lagring av London-Clay, fra Heymann og Clayton (1999).

Mye arbeid har også blitt gjort for å forstå migrasjon av vann og poretrykk etter prøvetaking. Effekten er den motsatte for normalkonsolidert og over konsolidert leire. Like etter prøvetaking har det ytre jordlaget i normalkonsolidert leire høyere poretrykk enn i midten, dette grunnet høyere tøyning langs sylindren. Dette ble først oppdaget av Casagrande i 1936, og har videre blitt bekreftet av et flertall forskere (Schjetne 1971; Bjerrum, 1973; Siddique 1990). Schjetnes arbeid er særlig interessant da det involverer poretrykksmålinger via en sprøytenål i prøvesylindren. Bjerrum (1973) viste også at det ytre 5mm-laget av ekstrudert prøver fra Drammensleire har et vanninnhold som er 3-4 % lavere enn i midten av prøven. Eksempler på målinger gjort på prøver av bløtt leire er gitt i Figur 6. Dette bekrefter det generelle bildet som er foreslått i Figur 2.



Figur 6: Forandringer i vanninnhold tvers over en rørprøve av bløtt leire (Hight 2000)

Tabell 1: Effekt av lagringstid på indeksegenskaper til svensk leirer (Henriksson og Carlsten, 1994)

Sample no.	Material type	Storage time (days)	Density	Water content	Liquid limit	Sensitivity	S _u (cone)
1	Laminert clayey silt	414	Unchanged	Increase	Increase	Decrease	Increase
2	Laminert clayey silt	254	Unchanged	Increase	Increase	Increase	Increase
4	Laminert clayey silt	426	Unchanged	Increase / Decrease	Decrease	Decrease	Increase
3	Clay	455	Unchanged	Unchanged	Increase	Decrease	Increase
5A	Clay	120	Unchanged	Unchanged	Unchanged	Decrease	Unchanged
5B	Clay	120	Unchanged	Unchanged	Increase	Decrease	Increase
8	Clay	753	Decrease	Unchanged	Increase	Decrease	Unchanged

Det Svenske Geotekniske Instituttet (SGI) utførte i 1994 en studie for å evaluere effekten av lagringstid på egenskapene til svensk leirer (Henriksson og Carlsten 1994). Leirprøvene ble tatt opp med en 50 mm stempelprøvetaker. Prøvene ble testet umiddelbart etter prøvetaking, og etter en lagringstid varierende fra 120 og opp til 750 dager. Som vi ser i Tabell 1, inneholdt det testede materialet enten laminert leirig silt (prøve nr. 1, 2 og 4) eller leire (prøve nr. 3, 5A-B og 8). Forandring i indeksegenskaper i den svenske studien er vist i Tabell 1. Under lagringstiden observeres det at leirprøvene får en økt flytegrense (w_L). En slik økning i w_L leder til en nedgang i plastisitetsindeks (I_L). Leroueil et al. (1983) viser at det eksisterer samsvar mellom I_L og omrørtstyrke for leiren (s_{ur}), og kan forklares på følgende måte:

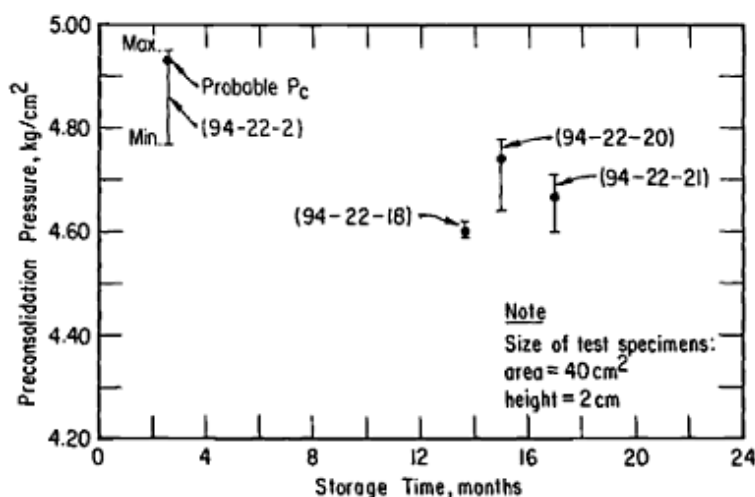
$$1) \quad s_{ur}(kPa) = \frac{1}{(I_L - 0.21)^2}$$

Det bør bemerkes at bestemmelse av udrenert skjærstyrke basert på den svenske konusmetoden er ment for leiremateriell. Siltinnholdet i prøvene 1, 2 og 4 (Tabell 1) leder til naturlige variasjoner i udrenert skjærstyrke og burde ikke brukes for å konkludere. Dessuten inneholder de laminerte prøvene lag av silt og leire som naturligvis vil lede migrasjon av vann i prøvene. Dette kan hjelpe til å forklare viktige forandringer i vanninnhold under lagringstiden. Merk at verken vanninnhold eller tetthet for rene leirprøver i Tabell 1 forandret seg over tid.

LaRochelle et al. (1986) beskriver en prosedyre for langvarig lagring av leirprøver, og gir anbefalinger for forseglings sammensetting, lagringstemperatur, fuktighet etc., og fant metoden svært effektivt for å kunne bevare leires indeksegenskaper over tid. Hight et al. (1992) brukte denne prosedyren i forbindelse langvarig lagring av Lavalprøver for leireprøver fra Bothkennar, og fant ingen betydelig forandringer fra initialt sug ($u_r = u_a - u_w$) i prøven. Lessard og Mitchell (1985) fant også denne prosedyren effektiv. Det må imidlertid bemerkes at disse tre eksemplene ble utført på prøver av høy kvalitet, hvor migrasjon av porevann under lagring forventes å være mindre vesentlig.

3.2 Innvirkning på mekaniske egenskaper

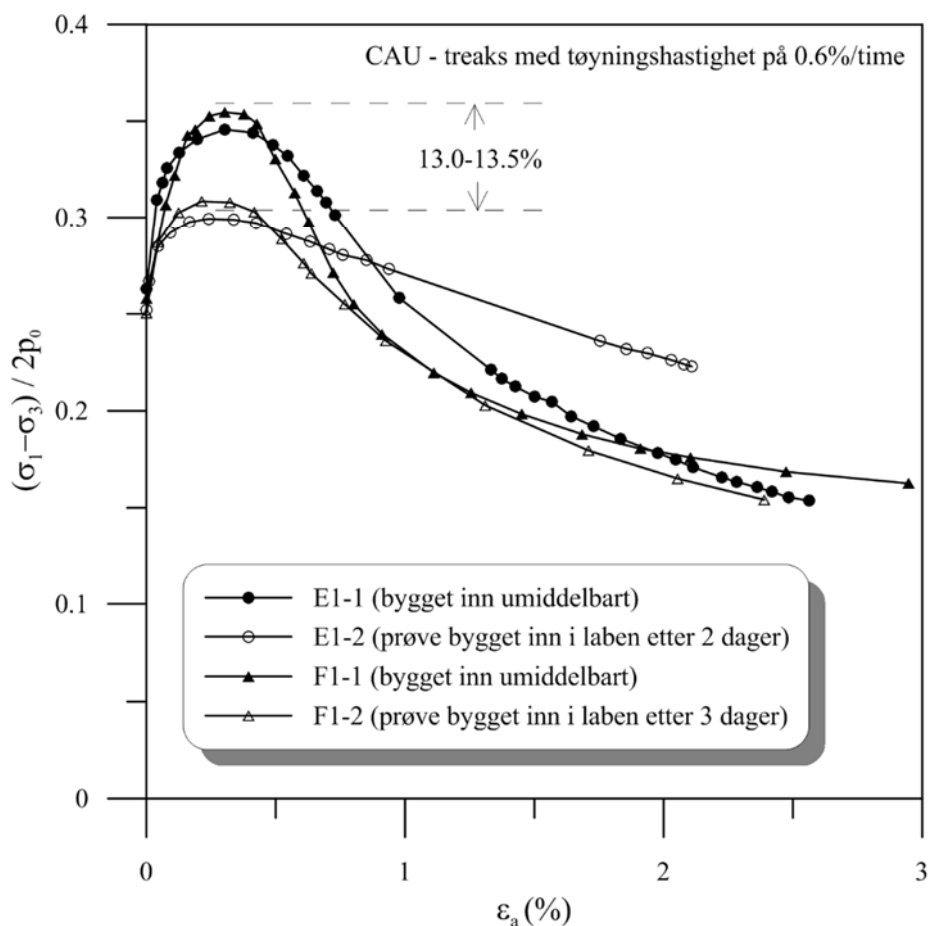
Det ble tidlig konstatert at lagringstidens lengde hadde en effekt på de mekaniske egenskapene for sensitiv og marin leire. Bozozuk (1971) analyserte resultatene fra konsolideringstester av en håndkuttet blokkprøve, lagret i et rom med en temperatur på 12 °C og relativ fuktighet fra 90 – 100 %, i et tidsrom på 1,5 år. Prøvene inneholdt sensitiv og overkonsolidert marin leire fra Ottawa, med en $w = 52\%$, $I_p = 23$, $S_t > 100$ og et leirinnhold på 64 %. Resultatene er vist i Figur 7, og viser at prekonsolideringstrykket, p'_c , sank med 4.8 % i prøver som hadde vært lagret mellom 2 og 17 måneder.



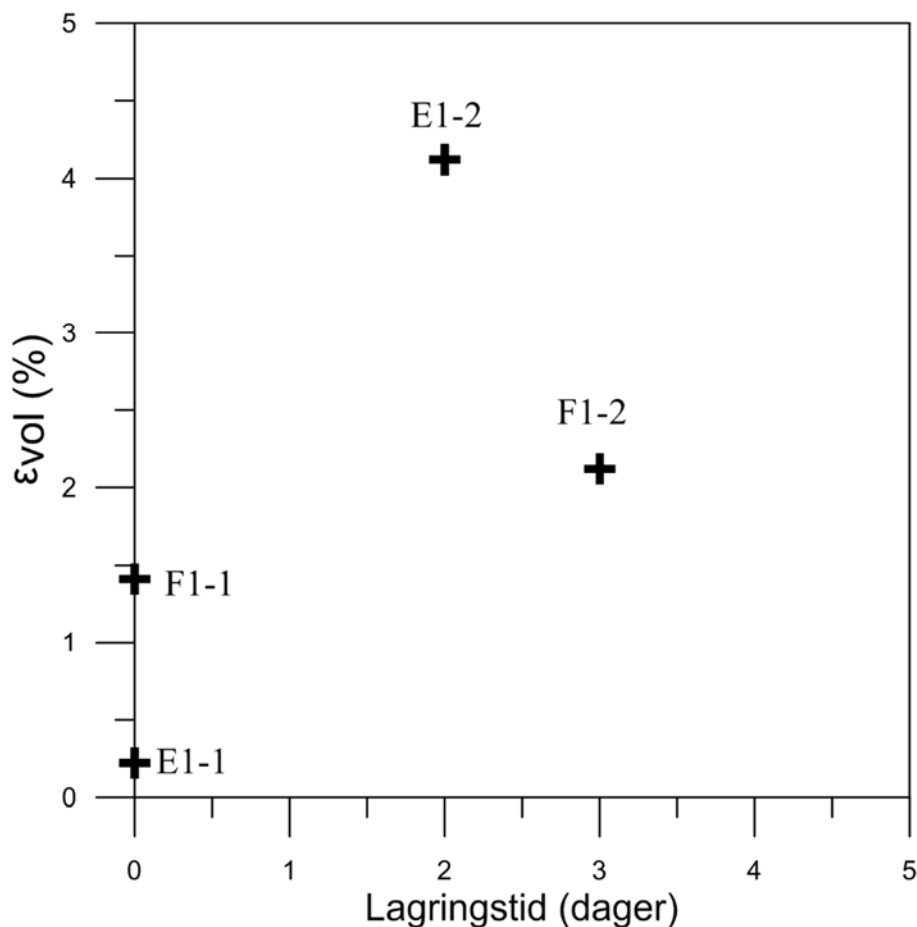
Figur 7: Effekt av lagringstid på målt prekonsolideringstrykk fra sensitiv og overkonsolidert marin leire fra Ottawa, Canasa (Bozozuk, 1971)

Bjerrum og hans kolleger studerte på begynnelsen av 1970-tallet effekten av lagringstid på geotekniske egenskaper for kvikkleire fra Ellingsrud (NGI 1971, Bjerrum 1973). I studien tok de med en treakscelle i felten, og fikset, monterte og konsoliderte kvikkleireprøver nær boreriggen. Prøvene ble samlet inn ved hjelp av en 95 mm stempelprøvetaker. Resultatene fra fire CAUC tester er vist i Figur 8. Prøvene E1-1 og F1-1 ble ekstrudert og bygget inn i treakscellen like etter prøvetakingen, mens prøvene E1-2 og F1-2 ble tatt opp av prøvesylinderen henholdsvis 2 og 3 dager etter. Alle prøvene ble konsolidert til deres *in situ* trykk. Resultatene viser at peak udrenert skjærstyrke ble redusert med opp til 13.5 % når prøvene ble testet 2-3 dager etter prøvetaking. I følge Bjerrum (1973) kan den innvendige svelling i sylinderen forklare vesentlig reduksjon i skjærstyrke i kvikkleireprøver over tid. Prøvene E1-2 og F1-2 svullet opp grunnet lagringstiden (E1-1 and F1-2) (Figur 8), og rekonsolidering til *in situ* spenning gjenopprettet ikke den originale strukturen.

Kvikkleire fra Ellingsrud:
 $w = 38 \%$, $w_L = 25\%$, $w_P = 22\%$
 $I_P = 3 \%$, $I_L = 5.3$, $S_t = 70$

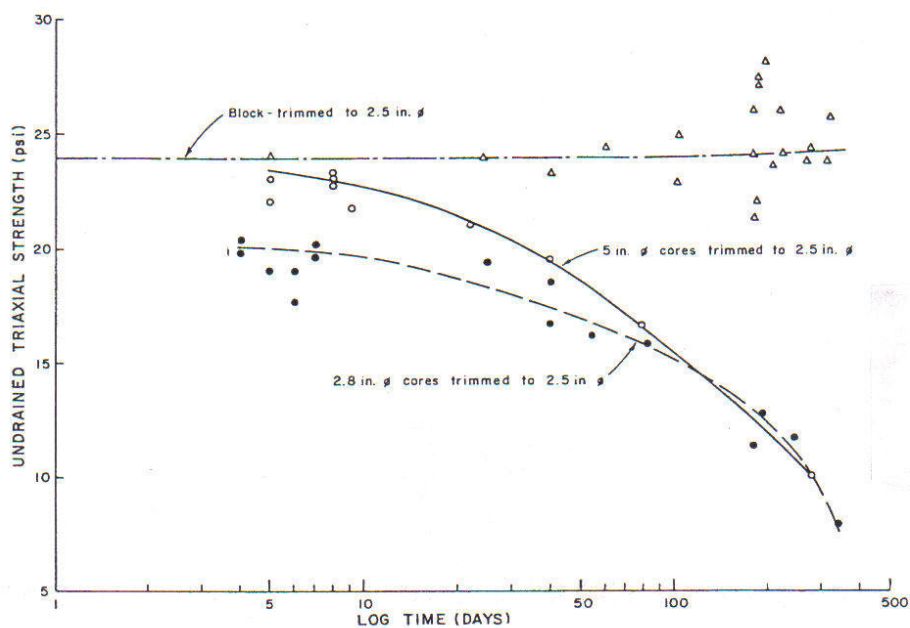


Figur 8: Resultater fra trecks forsøk på kvikkleireprøver fra Ellingsrud (95 mm). Prøvene E1-1 og F1-1 ble skjært og rekonsolidert rett etter prøvetaking i felt, mens, prøvene E1-2 og F1-2 ble testet henholdsvis to og tre dager etter prøvetakingen (data fra NGI 1971 og Bjerrum 1973).

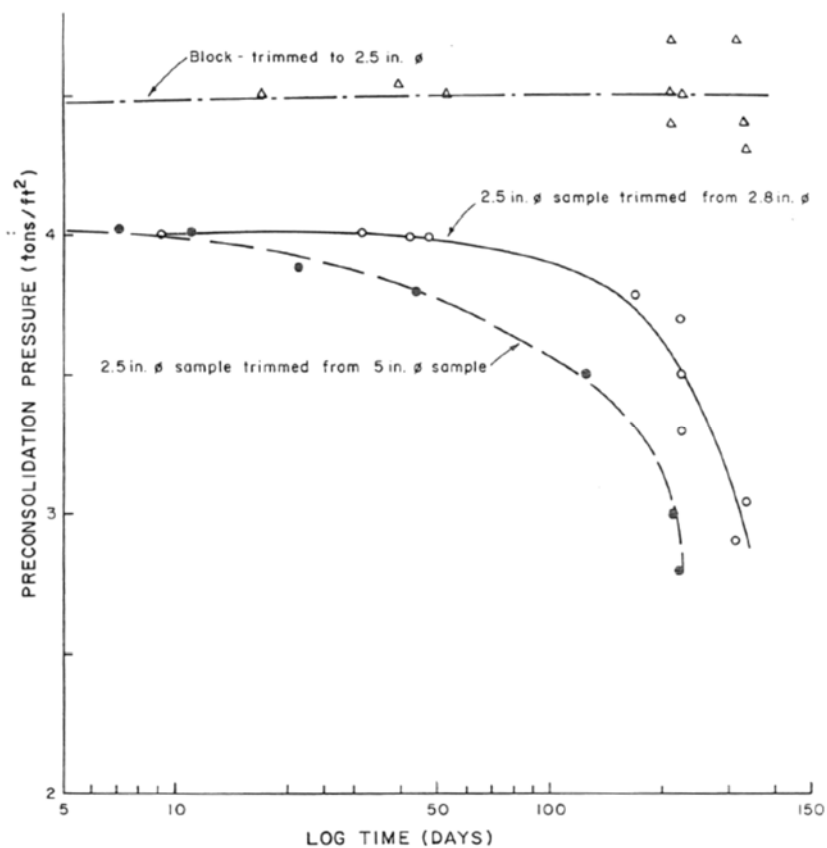


Figur 9: Volumetrisk tøying som følge av rekonsolidering til in situ spenning for prøvene E1-1, E1-2, F1-1, F1-2 fra Ellingsrud (se Fig. 8). Resultatene viser en økende volumetrisk tøying med lagringstid (data fra NGI 1971 og Bjerrum 1973).

Arman og McManis (1976) utførte en omfattende studie av effekten av langvarig lagring av tre typer prøver (305 mm dia. håndkuttete blokkprøver, 127 mm dia. prøver og 71 mm dia. prøver), av leire og siltig leire fra Louisiana. Alle prøvene ble ekstrudert, forseglest og lagret ved 22 °C og 100 % relativ fuktighet, men for forskjellige tider. Testene ble utført på prøver som hadde blitt trimmet til 63.5 mm. I løpet av de ti første dagene fant de ingen nedgang i s_u for noen av prøvene (Figur 10). Etter ti dager hadde s_u -verdiene for både 127 mm- og 71 mm-kjerner forverret seg med økende trend (Figur 10). Det samme skjedde ikke for blokkprøvene. Et lignende funn ble gjort for prekonsolideringstrykket p'_c (Figur 11). Studien av Arman og McManis (1976) viser tydelig effekten av initial prøve kvalitet ved forverring i udrenert skjærstyrke og prekonsolideringstrykk ved lagringstid.



Figur 10: Forverring i udrenert skjærstyrke (s_u) ved lagringstid (Arman og McManis, 1976).

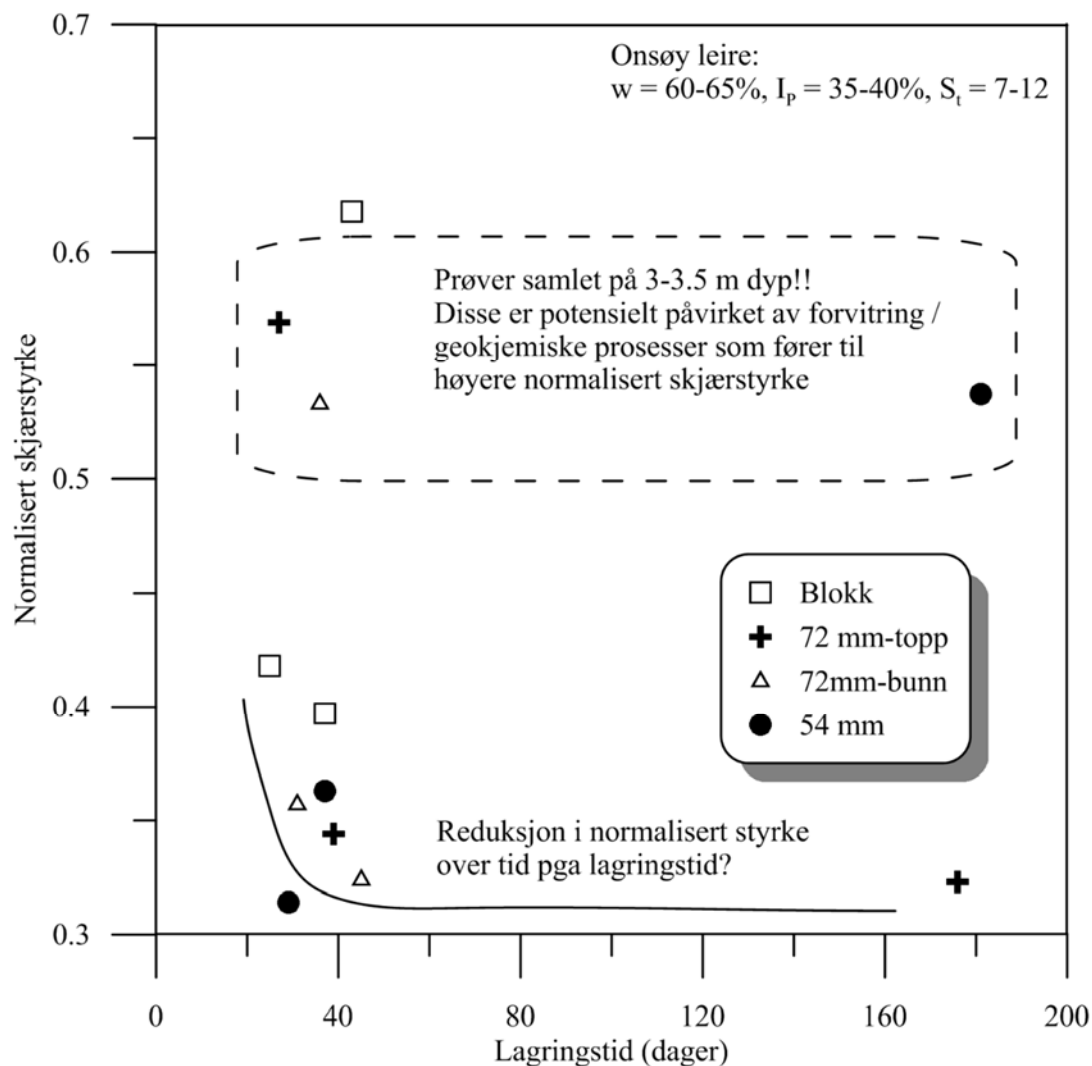


Figur 11: Forverring i prekonsolideringstrykk (p'_c) ved lagringstid (Arman og McManis, 1976)

La Rochelle et al. (1986) utførte tester av sensitiv Champlain-leire på ulike tidspunkt etter prøvetaking. Resultatene viste at rekonsolideringen av prøvene tilbake til *in situ* spenning gjenopprettet mye av spenningen som ble mistet grunnet prøveforstyrrelsene. Tester som ble utført på blokkprøver lagret i et fuktighetsrom i mange år, viste en nedgang i s_u , men ikke i p'_c .

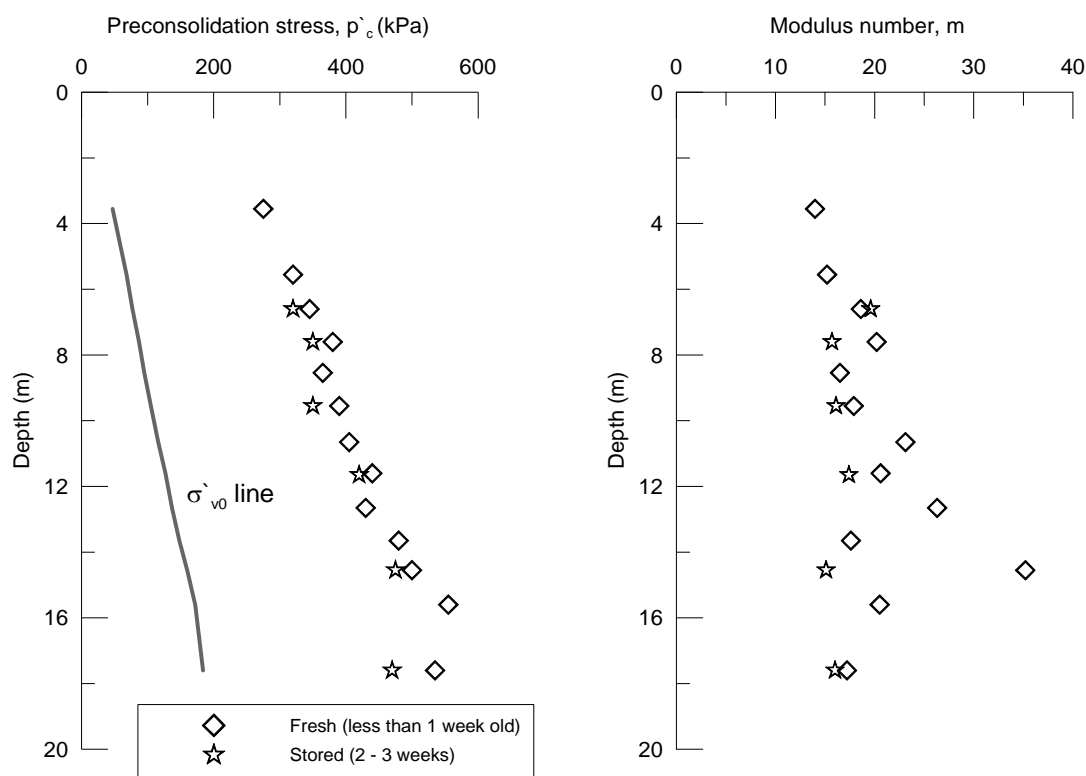
En lignende studie ble utført av Kirkpartick og Khan (1984) på laboratoriefremstilt normalkonsolidert, kaolin og illitt prøver. Lavere skjærstyrke, større tøyning til brudd, og ulike spenningstier til brudd ble målt i ukonsoliderte og udrenerte tester (UU), sammenlignet med anisotropiske konsoliderte og udrenerte forsøk (CAUC). Forskjellen mellom UU- og CAUC-forsøk økte ved økt lagringstid. Kirkpatrick et al. (1986), Graham et al. (1987), Graham og Lau (1988) og Graham et al. (1990) forlenget studien til henholdsvis overkonsolidert kaolin og illitt, undervannsprøver av illitt, undervannsprøver av grundite, og for illitt, og fant så å si de samme resultatene, og understreket viktigheten av anisotropisk konsolidering forut for skjæring. Et flertall andre studier har vist utilstrekkeligheten for UU-forsøk for å måle *in situ* styrke.

NGI har gjennom årenes løp foretatt et stort antall prøvekampanjer ved Onsøy i sørøst –Norge. Leiravsetningen er normalkonsolidert med noe forvitring og uttørring ved overflaten. I Figur 12 er den udrenerte skjærstyrken oppnådd fra CAUC-forsøk normalisert med hensyn til *in situ* vertikal effektivspenning for å evaluere effekten av lagringstid på prøver samlet fra varierende dybde. Figuren viser resultatene fra 54 mm-, 72 mm- og blokkprøver. Den normale styrken oppnådd fra blokkprøvene ble forverret med 5 % fra dag 25 til dag 37 etter prøvetaking. For 72 mm-prøvene er reduksjonen høyere og opp mot 10 % mellom dag 31 og 37 etter prøvetaking. Resultatene fra 54 mm-prøvene viser en omvendt tendens (dvs. forsterking av leiren over tid). Dette kan skyldes den initiale dårlig prøve kvalitet.



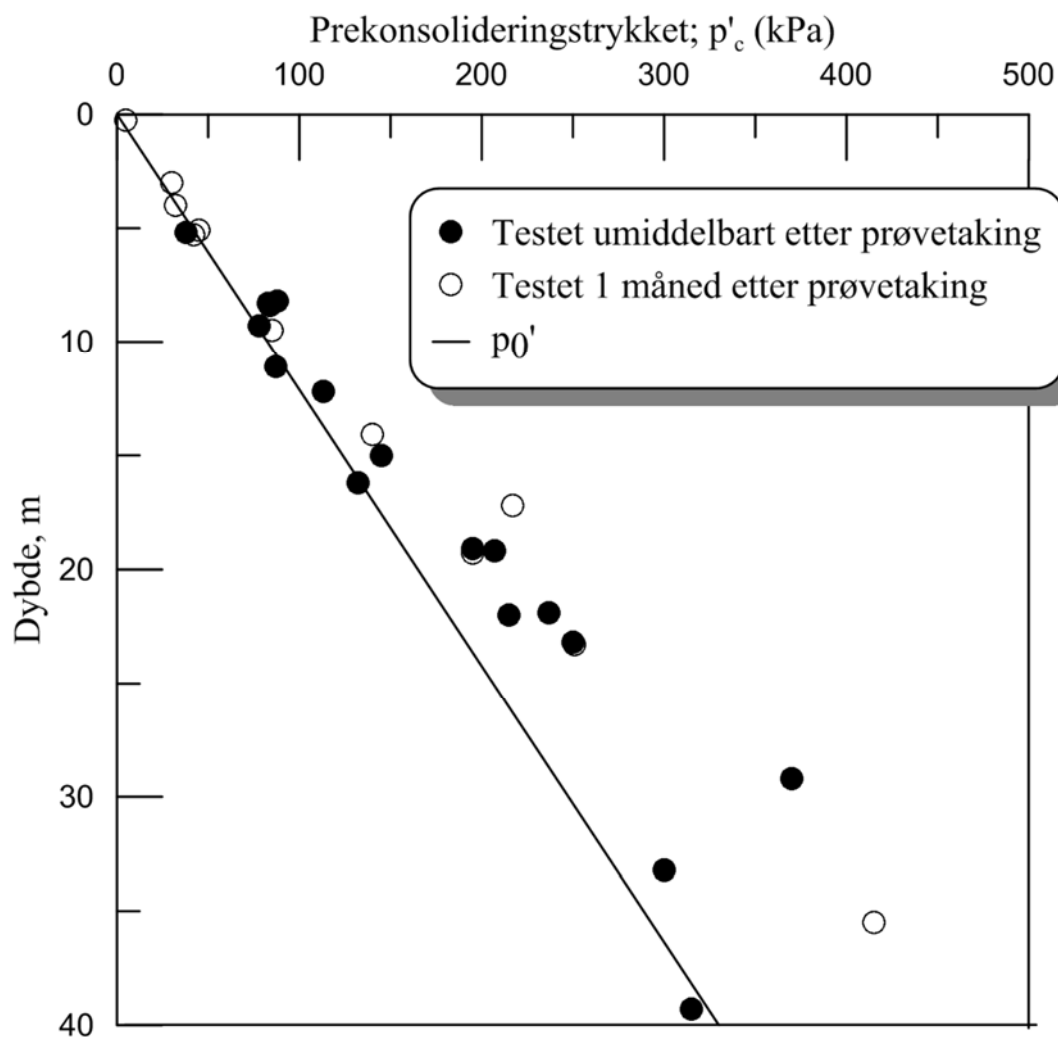
Figur 12: Effekt av lagringstid for normalisert skjærstyrke på Onsøy-leire (NGI-data).

Rømoen (2005) testet leirprøver (54 mm stålstempelprøver) fra Eberg i Trondheim like etter prøvetaking, og igjen to til fire uker senere (Figur 13). Eberg-leiren er litt overkonsolidert (OCR fra 1.3-2.7), med følgende indeksegenskaper: $w = 50-70\%$, $I_p = 10-20\%$, leirinnhold = 40-60 %, og $S_t = 7-10$. Effekten av lagringstid er, som vi ser i Figur 13, betydningsfull både for prekonsolideringstrykket p'_c og modultallet m .

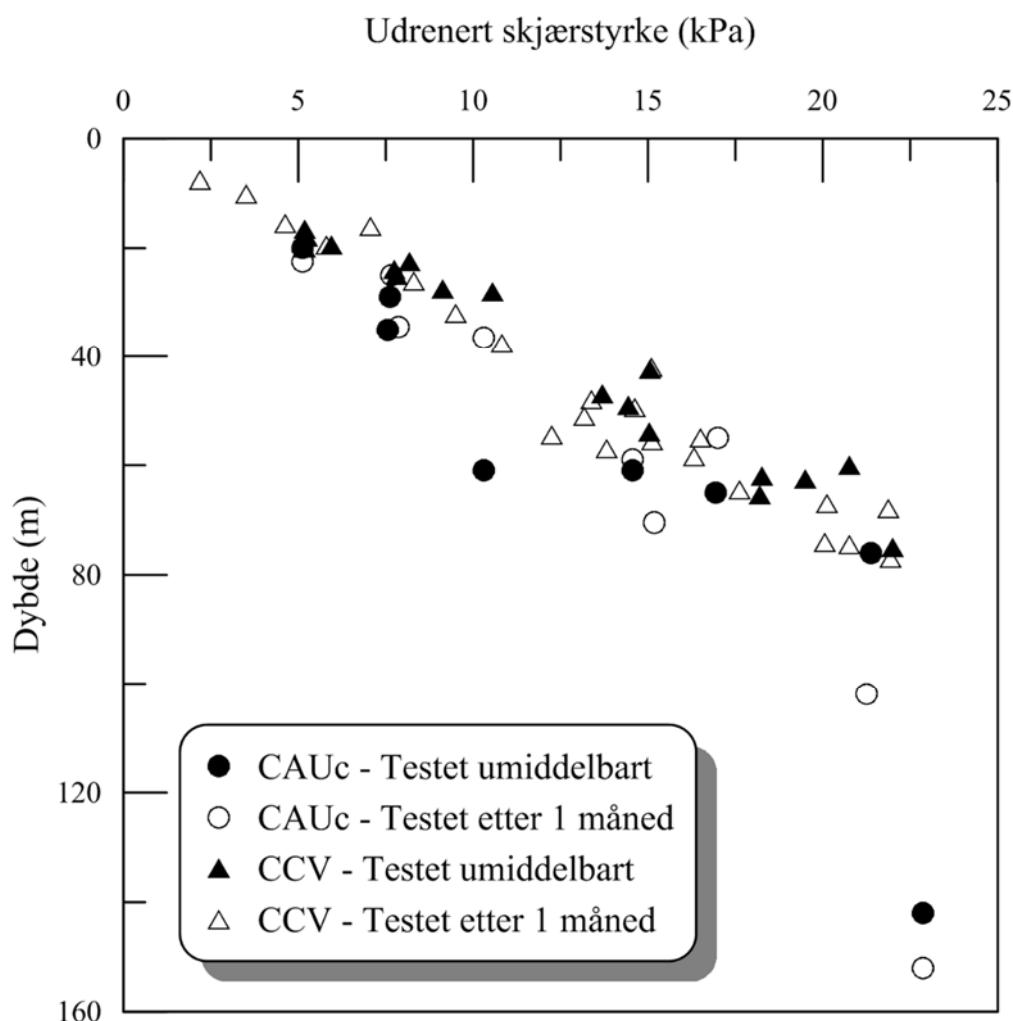


Figur 13: Effekt av lagringstid på CRS-parametre for Eberg-leire (Rømoen, 2005)

På 1980-tallet gjennomførte Norges Geotekniske Institutt et omfattende testprogram for å karakterisere grunnforholdene ved Troll-gassfeltet i Norskehavet, omtrent 65 km offshore fra den sørvestlige kysten av Norge (NGI 1984, NGI 1988, Lunne et al. 2007). Leiren ved Troll-gassfeltet er normalkonsolidert, med et vanninnhold nærmest likt dens flytegrense. Saltinnholdet i porevæsken er omtrent 32 g/L. I løpet av undersøkelsesprogrammet i 1987, ble flere prøver testet offshore like etter prøvetaking, mens noen ble sendt til NGIs laboratorium i Oslo. Disse prøvene ble testet 1 måned etter prøvetaking. Effekten av lagringstid for evaluering av p'_c og udrenert skjærstyrke (CAUc- og CCV-tester), vist i Figur 14 og 15, sees ikke særlig for denne leiren.

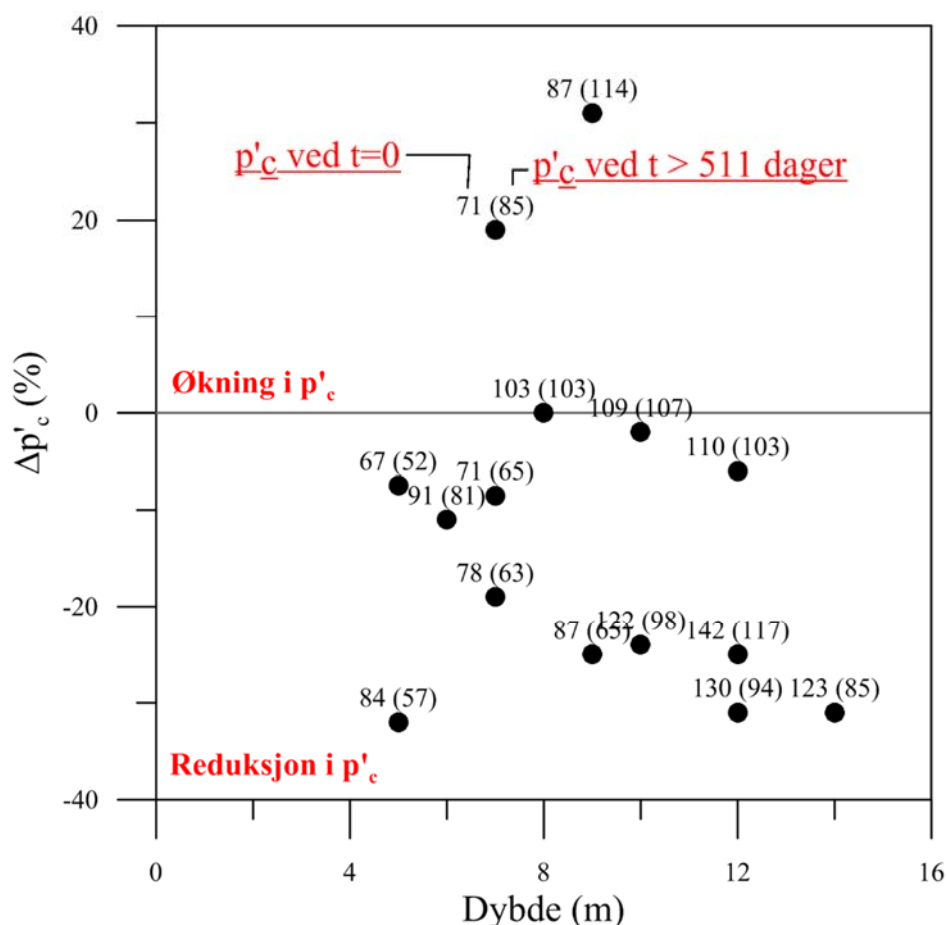


Figur 14: Prekonsolideringstrykk p'_c fra CRSc ødometertester på normalkonsolidert leire fra Troll-feltet i Norskehavet. De svarte sirklene representerer prøveresultatene like etter prøvetaking og de tomme sirklene er prøveresultater oppnådd 1 måned etter prøvetaking (kilde: NGI 1988).



Figur 15: Resultater fra udrenert skjærstyrke (CAUc- og CCV-forsøk) for normalkonsolidert leire fra Troll-feltet i Norskehavet. De svarte symbolene viser resultatene like etter prøvetaking og de tomme symbolene viser resultatene 1 måned etter prøvetaking (kilde: NGI 1988).

Som vist i kapittel 3.1, utførte SGI i 1994 en studie for å evaluere effekten av lagringstid på de mekaniske egenskapene for noen svenske leire (Henriksson og Carlsten, 1994). Prøver fra samme dybdeintervall ble testet like etter prøvetakingen i mars 1985, og gjennom et andre prøveprogram i mars 1987 (lagringstid på 18 måneder). Totalt 32 CRS-tester ble utført for å evaluere effekten av lagringstid på leirens kompressibilitet (Figur 16). Hvert punkt på figuren representerer forandring i effektivt prekonsolideringsstrykk ($\Delta p'_c$), målt i prosent, gjennom en lagringsperiode i forhold til prøvedybde. Dataen viser for det meste at p'_c synker med lagringstiden. Det er også en tendens til at prøvene som ble samlet på en større dybde er mer påvirket av lagringstiden, men resultatene er ufullstendige. Forfatterne poengterte naturlig variasjon innen sedimentegenskapene for å forklare de store avvik i resultatene, men også forskjeller innen laboratorieteknikker og vanskeligheter med å tolke ødometerresultatene.



Figur 16: Prosentvis forandring i effektivt prekonsolideringstrykk (p'_c) grunnet lagringstid i forhold til prøvedybde. Lagringstiden varierte mellom 511 og 543 dager for alle punktene, og (p'_c) ble estimert ut fra CRS-forsøk. Data fra Henriksson og Carlsten (1994). Se tekst for detaljer.

3.3 Innvirkning på porevannskjemi

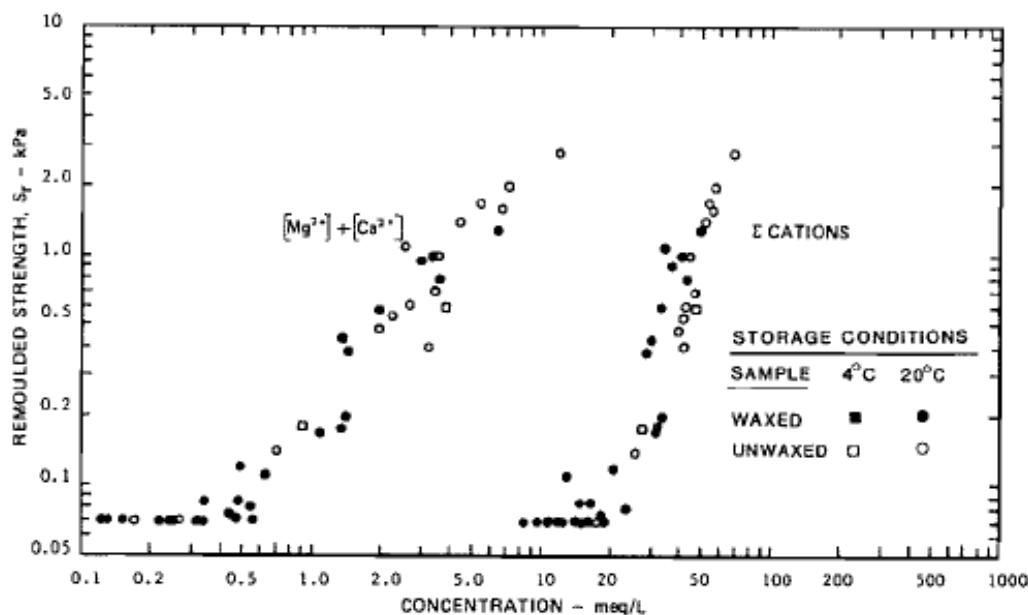
Tidligere studier har vist at dersom prøver ikke er ordentlig forseglet, kan noen aldrig inntreffe og forandre de fysiokjemiske og mekaniske egenskapene for leiren; selv om det ikke er noe særlig tap av vanninnhold over tid (Torrance 1976; Bozozuk 1976; La Rochelle *et al.* 1976; Lessard og Mitchell 1985). Det er også bevis for at selv ubetydelige mengder oksygen er nok til å starte den kjemiske prosessen som forårsaker aldning. For en lagret prøve inntreffer forandringer i porevannskjemien over tid. Grunnen til dette er relatert til faktorer slik som oksidasjon, kjemiske reaksjoner mellom leirprøven og forseglingsmaterialet, og smitte fra borevæsker (Torrance 1976). Leirer med et høyt organisk innhold og leirer med syre og/eller alkali er mer utsatt for kjemiske reaksjoner og kjemiske forandringer i løpet av lagringstiden (Lessard og Mitchell 1985). Det er ikke anbefalt å bruke aluminiumsfolie ved lagring av prøver, da aluminiumen kan komme inne i leiren, og forandre de kjemiske egenskapene.

Bjerrum (1954) oppdaget at det eksisterer et forhold mellom sensitivitet og saltholdighet for norsk marin leire; sensitiviteten øker når saltinnholdet minker. I disse materialene er det også funnet at relativt små forskjeller i konsentrasjoner av visse ioner, med lavt men relativt konstant porevannssaltholdighet, kan forklare forskjellene i egenskaper mellom leire som ellers er like.

Bjerrum og Rosenqvist (1956) observerte en økning i Attenberg-grenser for marin leire fra Åsrum, Norge, som et resultat av lagringstid. Plastisitetsindeksen for en prøve økte fra 21 % - 27 % i en periode på to år, i et rom på 18-20 °C, og en økning i kalium-ion-konsentrasjoner i porevannet, som ble tilskrevet forvitringen av leirminerale. Økningen av kalium-ion-konsentrasjoner tilsvarte 0.36 g/liter KCl av porevannet, noe som forklarer de økte Attenberg-grensene.

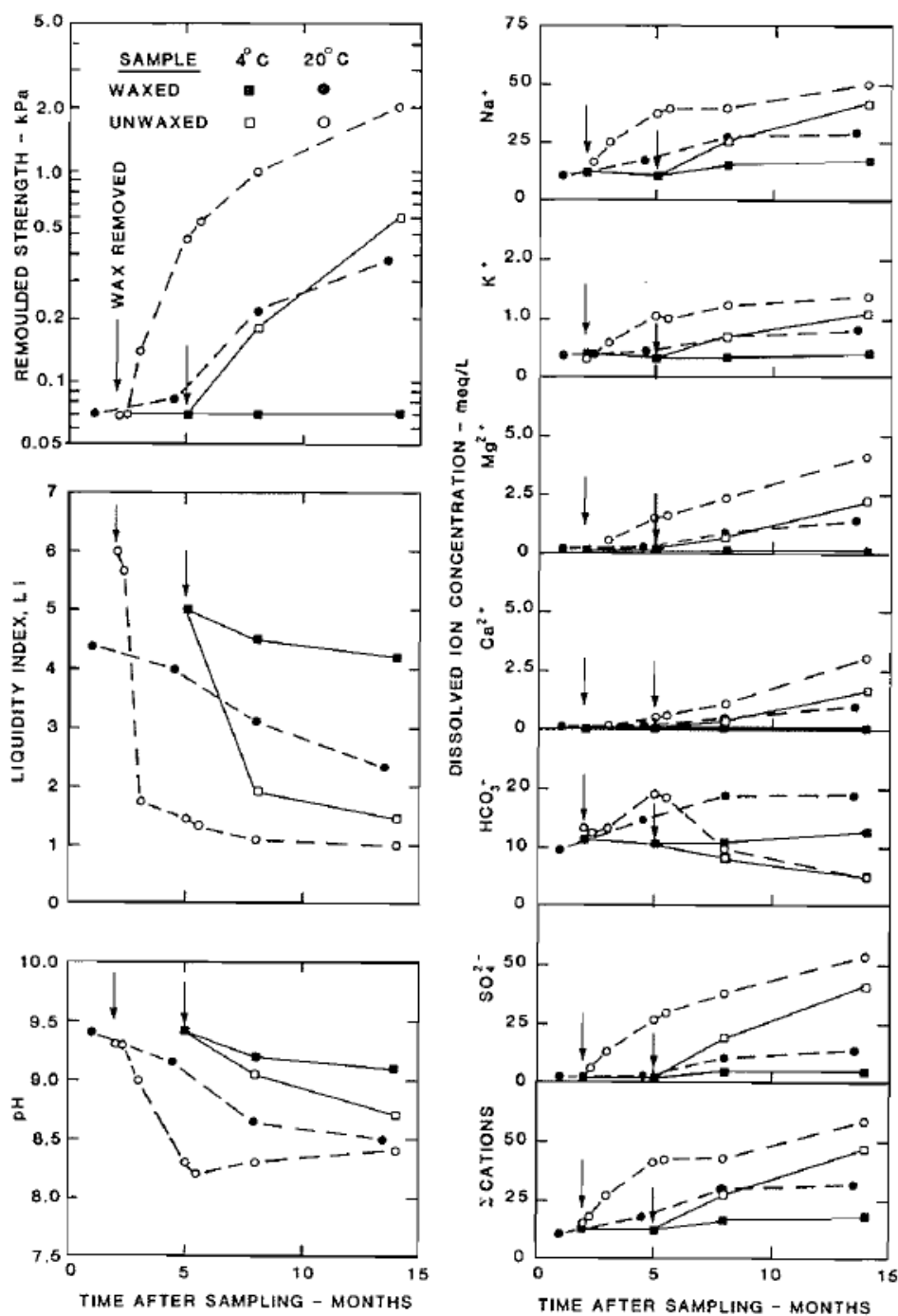
Söderblom (1969) viste at prøver av svensk leire fra Göta-elven ikke var kvikke mer etter å ha vært lagret i to – fire år. Lignende sensitivitetsreduksjon ble observert *in situ*, da en leire fra 1967 på en dybde fra 1 meter under en eksponert skredfot fra 1960-skredet i Veston, mistet sin "kvikke" tilstand i mellomtiden (Söderblom 1969). Kvantitative analyser med kromatografiske teknikker viste at kvikkleiren før lagring hadde et porevannsinhold bestående for det meste av Na^+ and SO_4^{2-} . Etter lagringstiden inneholdt porevannet en betydelig mengde Mg^{2+} og Ca^{2+} og en markert økning av SO_4^{2-} (Söderblom 1974). I følge Söderblom (1969) er "forandringene fra anaerob til aerob tilstand og forandringer i mikrobiell aktivitet, den viktigste faktoren i lagringsprosessen".

Torrance (1976) rapporterte effektene på porevannskjemien etter tre måneders lagringstid under varierende lagringsprosedyrer. Materialet bestod av normalkonsolidert Champlain-leire, med et lavt saltinnhold og en sensitivitet på 10-20. Uavhengig av lagringsmetoden, hadde saltinnholdet og andelen bivalent kationer (sodium, kalsium, magnesium og kalium) i porevannet økt over tid. De mest iøyenfallende forandringene ble observert for leiren som var lagret i plastikkbeholdere, uten voksforsigling. I følge Torrance er den økte andelen kalsium og magnesium i porevannet under lagring relatert til angrep på karbonat i selve prøven. Hovedkonklusjonen fra eksperimentene er at kjemiske forandringer øker konsentrasjonen av de fleste kationer i porevannet i løpet av lagringstiden, uavhengig av lagringsmetode. For å forhindre kjemisk og biologisk aktivitet i prøvene under lagringstiden, anbefaler Torrance (1976) en lagringstemperatur som er lavere enn den årlige felttemperaturen.



Figur 17: Forholdet mellom omrørt styrke og konsentrasjonen av bivalent kationer og bivalent plus monovalent kationer i prøver lagret under varierende tilstander (fra Lessard og Mitchell 1985).

For bedre å kunne forstå de geotekniske og geokjemiske forandringene som oppstår i kvikkleire under lagring, utførte Lessard og Mitchell (1986) et omfattende testprogram på leire fra Champlain-sjøen ved La Baie i Quebec. Etter å ha målt egenskapene for materialet umiddelbart etter prøvetaking, ble prøvene lagret og testet over en periode på 1 år, da for å evaluere effekten ved ulike lagringstilstander. Kvikkleireprøver som var lagret i laboratoriet viste tegn til aldring uansett lagringsprosedyre. Udrenert skjærstyrke og flytegrense økte med tiden (Figur 17), mens sensitivitet, likviditetsindeks og pH minket. Vanninnholdet, plastisitetsgrensen, og uforstyrret styrke forble så å si uforandret. Porevannskonsentrasjonen av kalsium, magnesium og sulfat minket flere ganger (Figur 18). Lessard og Mitchell (1986) tilskrev for det meste aldringsfenomenet oksidasjon av jernsulfid, noe som resulterer i formasjonen av jernhydroksid og svovelsyre. Produksjonen av syre forårsaker oppløsning av kalsiumkarbonat, noe som øker konsentrasjonen av bivalent kation i leiren, og videre reduserer interpartikulær repulsjon og øker omrørt skjærstyrke. Oksidasjon av organisk materie resulterer i formasjonen av karbonsyre, og bidrar til aldring på grunn av dens effekt på oppløselighet av kalsiumkarbonat.



Figur 18: Effekten av tid for egenskaper av forseglet prøver (med og uten voks) lagret i luft, ved 4°C og 20°C. Pilene indikerer når voksen var fjernet fra prøvene (fra Lessard og Mitchell 1985).

3.4 Oppsummering – kilde og konsekvenser av lagringstid

Hovedfokuset i denne rapporten har vært å oppsummere tilgjengelig litteratur og nyere forskning på effekt av lagringstid på jordparametere. Litteraturen som er presentert i dette kapitlet viser at effekten av lagringstid kan påvirke de mekaniske egenskapene for leirprøver på forskjellige måter. En oppsummering av konklusjonene av de ulike studiene er gitt i Tabell 2 og 3. Effektene av lagringstiden kan tillegges følgende prosesser:

- Migrasjon av porevæsker (forandringer i vanninnhold gjennom prøven) og assosiert endringer i spenningsfordeling i prøvene.
- Tørke og fuktighetstap
- Kjemiske effekter
- Temperatur- og fuktighetsvariasjoner

Påvirkningen av disse prosessene synes å forhøyes av flere ulike faktorer, slik som for eksempel prøve kvalitet (prøvetype, etc.), ekstrusjonseffekter, forseglingsteknikker og leirtype (plastisitet, lagdeling, etc.). Effekten av lagringstid for blokkprøver av høy kvalitet synes for eksempel å være mindre betydningsfulle enn for prøver på 54 og 72 mm, da omfordelingen av porevann under lagring er forventet å være mindre viktig i blokkprøvene. En sammenligning av resultater fra Onsøy og Ellingsrud viser også at plastisk ikke-sensitiv leire er mindre utsatt for forstyrrelser ved lagring enn mager sensitiv leire.

Resultatene som er presentert i denne rapporten viser at effekten av lagringstid for leirens mekaniske egenskaper kan være nokså viktige i de tidlige stadiene av lagringsperioden (ca. de første ti dagene), særlig for prøver som er samlet med en stempelprøvetaker (54-72 mm). Det er derfor viktig å utføre testene så fort som mulig etter prøvetaking.

Tabell 2: Oppsummering av konklusjoner fra de ulike studiene som er presentert i litteraturen i kapittel 3

Området	Prøvetaker	Effekt av lagringstid	Referanse
Eberg leire (Trondheim)	54 mm	<ul style="list-style-type: none"> Viktig effect på både p'_c og m 	Rømoen (2005)
Onsøy	54, 72 mm & Blokk	<ul style="list-style-type: none"> <u>Blokk</u>: 5 % reduksjon i s_u/p'_c fra 25 to 37 dager etter prøvetaking <u>74 mm</u>: 10 % reduksjon i s_u/p'_c fra 31 to 39 dager etter prøvetaking <u>74 mm</u>: Ingen forandringer i s_u/p'_c etter 39 dager 	NGI data
Troll East	70 mm?	<ul style="list-style-type: none"> Ingen vesentlig forandringer i jordparametere etter 1 måned 	NGI data (1984)
Ellingsrud	95 mm	<ul style="list-style-type: none"> 15 % reduksjon i s_u/p'_c etter 3 dager 	Bjerrum (1973)
Louisiana	305, 127, 71 mm	<ul style="list-style-type: none"> Opptil 10 dager → ingen effekt på p'_c og s_u Etter 10 dager → Resultatene viser forverring av s_u og p'_c til økende tempo. <p>N.B: gjelder ikke blokk prøver!</p>	Arman & Mcmanis (1976)
Champlain sea clay (Québec)	73 mm (NGI prøvetakerem) + Laval blokk prøver	<ul style="list-style-type: none"> <u>73 mm</u>: Bløtt leire → 15 % reduksjon i s_u noen dager etter prøvetaking (UU tests) <u>Blokk prøver</u> → reduksjon av peak styrke (10-20%) etter lengere lagringstid Ingen vesentlig endringer på p'_c for blokk prøver 	La Rochelle et al. (1976)
Champlain Sea clay (Ottawa)	54, 124 mm	<ul style="list-style-type: none"> 4.8% reduksjon i p'_c for prøver lagret mellom 2 og 17 måneder 	Bozozuk (1971)
Bothkennar	38, 100 mm, Laval blokk prøver	<ul style="list-style-type: none"> Under kort lagringstid ble det observert en reduksjon i p'_i av ca. 20 % Større p'_i forskjeller i 38 mm prøver enn i 100 mm prøver. <p>p'_i : initial effektive spenning målt i treaks apparatur med å påføre et celle trykket p_i og ved å registrere poretrykket når det kommer til balanse (u_i).</p>	Hight et al. (1992)
Champlain sea clay (LaBaie, Quebec)	76 mm	<ul style="list-style-type: none"> Udrenert skjærstyrke og flytegrense økte med tiden, mens sensitivitet, likviditetsindeks og pH minket. Vanninnholdet, plastisitetsgrensen, og uforstyrret styrke forble så å si uforandret. 	Lessard & Mitchell (1985)

Tabell 3: Oppsummering av leiregenskaper for de ulike beliggenhetene referert til i kapittel 3

Området	Sensitivitet [-]	Atterbergsgrenser		OCR [-]	p _c ' [kPa]	s _u [kPa]	Referanse	
		Plastisitet-indeks [%]	Flyteindeksen [%]					
Eberg clay (Trondheim)	4-12	6.6-10.4	0.2-1.4	2.9-4.5	300-500	50-80	Rømoen (2005)	
Onsøy clay	-	36-41	1.1	1.3-2	40-70	16-25	NGI data	
Troll East clay	0-25 m	5	32-47	-	1.3-2.2	~100	NGI data (1984)	
	25-52	2	Middels	-	1.3-1.8	~300		
	>52	-	-	-	2-6	-		400-1000
Ellingsrud clay	6-140	3-5	2.2-4.8	-	-	18-19	Bjerrum (1973)	
Louisiana clays: Stiff, soft, organic and silty clay	-	-	-	-	-	-	Arman & Mcmanis (1976)	
Bothkennar (homogenous clay)	-	25-55	~0.7-1.0	Normalt til litt overkonsolidert		< 40 kPa	Nash et al. (1992)	
Champlain clay	Saint-Alban	14-22	15-28	2-2.4	18-45*		La Rochelle et al. (1976)	
	Saint-Louis	50	23	1.8	102*	164		43
	Saint-Jean-Vianney	>500	11	2.2	640*	900		240
	Ottawa	17	22-23	35-50	-	44-62	15	Bozozuk (1971)
	LaBaie	>500	Lav	>3			50-70	Lessard & Mitchell (1985)

* p_c-p₀

4 Effekten av lagringstid og vurdering av prøve kvalitet

Som nevnt ovenfor er de mest betydelige effektene av prøveforstyrrelse for bløtte og sensitive leirer er i) en reduksjon i prekonsolideringstrykk p'_c og ii) dårlige vurderinger av skjærstyrke, enten høy eller lav, avhengig av prøvens konsolideringsmetode og spenningshistorie. Dersom prøveforstyrrelsen er betydelig, kan ingen av disse effektene være tilstrekkelig eller nøyaktig korrigert. Dette kan lede til en potensiell og betydelig feil i geotekniskprosjektering. Vurdering av prøve kvalitet er derfor en viktig del av geoteknikken som er nødvendig for å sørge for tillit til laboratoriebestemt leiregenskaper.

Metoden brukt i Norge for å vurdere prøve kvaliteten er basert på arbeidet fra Andresen og Kolstad (1979) og Lunne et al. (1997). Metoden baserer seg på volumendringene som prøven gjennomgår under rekonsolideringen til *in situ* effektivt spenning. I Tabell 4 er prøve kvaliteten assosiert til forandringer i porettall under konsolideringsfasen ($\Delta e/e_0$); hvor Δe betegner forandringer i porettall fra begynnelsen av konsolideringsprosessen frem til *in situ* spenning er nådd (p_0'), mens e_0 er den initiale porettall ved begynnelsen av konsolideringsprosessen.

Tabell 4: Vurdering av prøve kvalitet basert på $\Delta e/e_0$ ratio (Lunne et al. 1997)

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Very good to excellent	Good to fair	Poor	Very poor
1-2	<0.04	0.04-0.07	0.07-0.14	>0.14
2-4	<0.03	0.03-0.05	0.05-0.10	>0.10
4-6	<0.02	0.02-0.035	0.035-0.07	>0.07
Quality	1	2	3	4

I ødometer ($\varepsilon_{vol} = \varepsilon_a$) er volumetriske belastninger lik aksiale belastninger og man kan finne $\Delta e/e_0$ ved bruk av følgende likninger:

$$1) \quad \Delta e = \varepsilon_{vol}(1 + e_0) = \varepsilon_a(1 + e_0)$$

$$2) \quad e_0 = G_s \cdot w_i$$

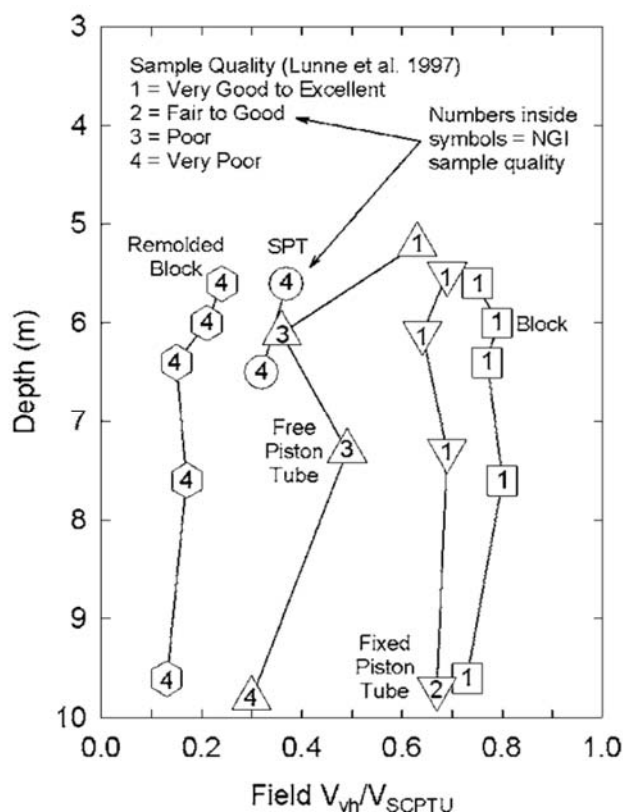
Hvor G_s er partikkeltetthet, vanligvis i rekkevidden 2.65-2.75 og w_i er vanninnholdet ved begynnelsen av testen.

En vurdering av prøve kvalitet kan også gjøres gjennom målinger av skjærbølge hastighet *in situ* og av prøver i laboratoriet. Skjærbølge hastighet, V_s , eller G_{max} i en gitt prøve avhenger av spenningstilstand og historie, porettall og aldringseffekter. Ved å sørge for at sammenlikninger er gjort ved same spenningstilstand, en reduksjon i V_s vil angi prøveforstyrrelse. Et eksempel som illustrerer forskjellene i prøve kvalitet for de ulike prøvene av Boston Blue-Clay, er gitt i Figur 19.

Tabell 5: Estimat av prøve kvalitet basert på målinger av skjærbølggehastighet utført in situ og i laboratoriet (etter Landon et al. 2007). Disse anbefalingene ble formulert ut fra resultater skaffet fra Boston Blue-Clay.

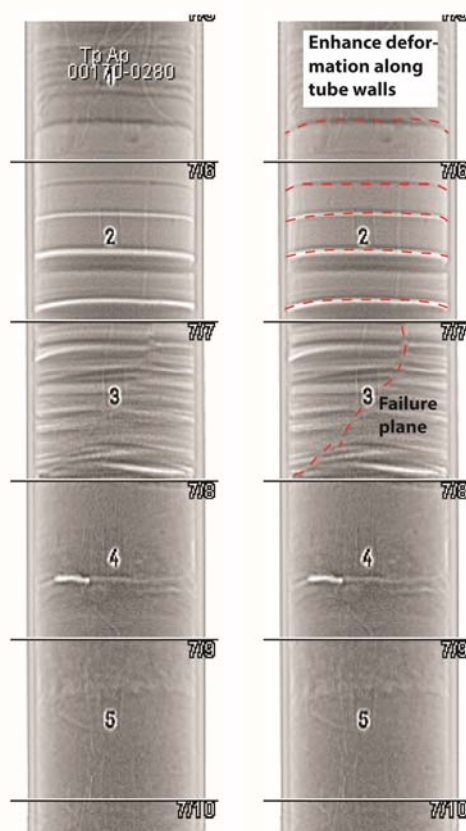
Quality class			
1-2		3	4
Very good to excellent	Good to fair	Poor	Very poor
$V_{vh}/V_{SCPTU} \geq 0.60$		$0.35 \leq V_{vh}/V_{SCPTU} < 0.60$	$V_{vh}/V_{SCPTU} < 0.35$

Dersom prøver ikke er ordentlig forseglet under lagring, kan aldringseffekter oppstå og forandre de fysiokjemiske og mekaniske egenskapene for leiren, selv om vanninnholdet ikke forandres særlig over tid, som vist i kapittel 3 (Torrance 1976; Bozozuk 1976; LaRochelle et al. 1976; Lessard og Mitchell 1985). Disse studiene har bekreftet viktigheten, men også vanskelighetene, ved å forhindre effektene av aldring under lagring av leirprøver. Det er viktig å merke seg at slike fysiokjemiske effekter ikke er ansett i den norske prøve kvalitetsmetoden for øyeblikket. Ved viktige geotekniske prosjekter er det anbefalt å måle leirens pH-verdi ved prøvetaking eller når de ankommer laboratoriet, og igjen sjekke det når testene utføres. pH-verdien er veldig ømfintlig overfor oksidasjon i de tidlige aldringsstadiene. Målingene er enkle og gjentagbare dersom de samme metodene brukes ved alle testene. Forandringer i leirens porevannskjemi kan også vurderes til å beregne prøve kvaliteten dersom prøvene er planlagt lagret over en lengre periode.



Figur 19: Forhold mellom skjærbølg hastighet målt in situ og i laboratorie og sammenlikning med den norske prøve kvalitets vurderingsmetode (fra Landon et al. 2007)

Betydningen av lagringstid for prøve kvalitet er påvirket av mikrostrukturen i leire og lagdeling. I lagdelte eller laminerte leirer, vil det være en uoverensstemmelse mellom sugen som kan opprettholdes i prøven etter prøvetaking (pga fjerning av total spenning). Når ilagt sug overstiger det et silt/sand lag kan tåle, laget vil dreneres. Porevannet vil finne veien til den omkringliggende leire som vil svulle. Den grove struktur i prøven kan analyseres gjennom røntgen og CT-skann fotografier, i stadiene etterfulgt prøvetakingen og etter ekstrusjon prosessen. Slike teknikker er nyttige for når man skal velge prøver som skal testes i laboratoriet og for å bestemme prøveforstyrrelsene fra prøvetaking og fra ekstrusjonsprosesser, og for å kartlegge mulige lagdeling og/eller uregelmessigheter i prøvene (Figur 20). Resultater fra røntgenanalyser og CT-skann fotografiering burde brukes for å velge hvilke prøver som bør prioriteres å brukes i laboratorieprogrammet, dersom dette er nødvendig. Slike teknikker bør inngå i testprogrammet av prøver innenfor kritiske prosjekter eller prosjekter innenfor skråningsstabilitet.



Figur 20: Eksempel på røntgenanalyse forut for ekstrusjon stadiet for prøve kvalitetsvurdering på leire fra Finneidfjord. Bildet viser deformasjon av lagene langs sylinderveggen, og et bruddplan i de løse sandige lagene i prøvens midtseksjon.

5 Forslag til laboratorieprogram

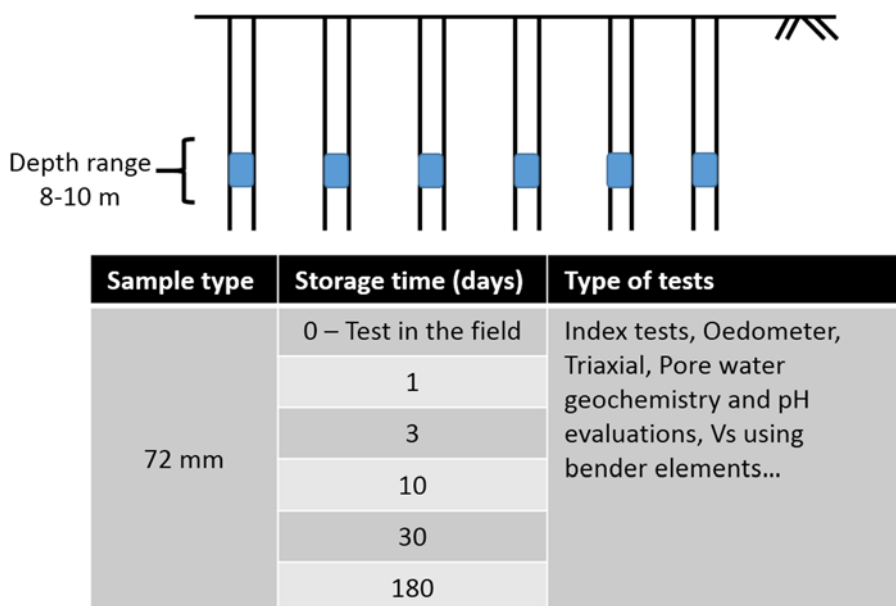
Resultatene som er presentert ovenfor viser at det er et behov for å kvantifisere viktigheten av lagringstiden for leirens mekaniske egenskaper og for å vurdere tiden en leirprøve kan lagres før de utledede mekaniske egenskapene ikke er representative for den originale prøven. Slike konklusjoner og anbefalinger kan likevel ikke trekkes fra litteraturstudier. Grunnen til dette er at resultatene i kapittel 3 er skaffet fra studier hvor det har blitt brukt ulike prøvemetoder og prosedyrer, forseglingsteknikker, laboratorieprosedyrer (ødometer- og treakstester), ekstrusjons metoder, type leirer, samt prøvedybder. Man bør ha en viss kontroll over parameter og teknikker for å kunne vurdere effekten av lagringstid på en korrekt og fornuftig måte.

For mer presise retningslinjer som omhandler effekten av lagringstid på prøve-kvalitet, er det nødvendig med et laboratorieprogram omkring dette temaet. Avhengig av tilgjengelig finansiering, bør programmet fokusere på to eller tre beliggenheter (test sites) for å kunne vurdere hvordan leirens egenskaper (styrke, sensitivitet, plastisitet, ORC, etc.) kan påvirkes av lagringstiden. Valget av beliggenheter burde

styres av tilgjengelig data og kunnskap omkring leireforholdene (Onsøy eller Ellingsrud) og/eller hvor geotekniske forskningsprogram allerede er planlagt (veiprosjekt). Dette vil minimalisere kostnadene for et slikt forskningsprosjekt. Vi anbefaler å samle inn minimum 6 prøver (72 mm) for hver beliggenhet, med et dybdeintervall på 8-10 meter under terrenget. Slike dybder er representative for de fleste geotekniske problemer (fundamentering og skråningsstabilitet), og under dybder som er utsatt for forvitningsprosesser. Hovedgrunnen til å velge 72 mm-prøver ligger i 1) den tilbyr en balanse mellom god datakvalitet og prosjektøkonomi, 2) det er for øyeblikket en av de mest vanlige prøvetakingsverktøyene innen industrien. Resultatene vil derfor ha en direkte praktisk betydning. Blokkprøver bør også samles for å sørge for en bedre kontroll over leirens geotekniske egenskaper i utgangspunktet. CPTU-data vil være en ressurs.

Programmet bør i laboratoriet involvere ulike tester, inkludert indekstester, ødometertester (CRS), treakstester (CAUC) og porevannsanalyser (geokjemi og pH). En generell oversikt over laboratorieprogrammet er vist i Figur 21. Testene bør utføres oftere i de tidlige stadiene av programmet for å kunne følge med på forandringer innen de mekaniske egenskapene på en korrekt måte. For å kunne vurdere prøve kvaliteten, er det anbefalt å utføre en CT-skann av hver prøve forutfor testingen. Prøve kvalitetsoverslag kan også utføres ved å samle SCPTU-data i felten og måle S-bølgehastighet i laboratoriet ved bruk av "bender elementer" i treakscellene eller i ødometer. Dette kan hjelpe til med kvantitative vurderinger av prøve kvalitetsforringelse med tiden, som vist i Figur 19.

Problemer forbundet med lagring av prøver er også ofte satt i forbindelse med det faktum at prøvene over tid setter seg i sylinderrørene. Det hadde derfor vært interessant å studere effekten av lagring på prøver ekstrudert fra sylinderen like etter prøvetaking.



Figur 21: Potensielt laboratorieprogram for å vurdere effekten av lagringstid på prøvekvallitet. En slik program bør utføres på minimum to beliggenheter for å vurdere hvordan leirens egenskaper (styrke, sensitivitet, plastisitet, OCR, etc.) kan påvirke effekten av lagringstid på prøvekvallitet.

6 Konklusjon

Litteraturen presentert i denne rapporten viser at lagring av leirprøver over tid kan ha en effekt på leirens mekaniske egenskaper. De mest betydningsfulle kan være:

- En nedgang i prøvens stivhet
- En nedgang i peak skjærstyrke, prekonsolideringstrykk (p'_c), omrørt skjærstyrke og sensitivitet
- En nedgang i kompresjonsindeksen

Hovedgrunnen til forandringer i de mekaniske egenskapene observert i løpet av lagringstiden er:

- Utvandring/migrasjon av porevæsker (forandringer i vanninnhold gjennom prøven) og forandringer i spenningsfordeling
- Tørke og fuktighetstap
- Kjemiske effekter og pH-forandringer (grunnet oksydasjon)
- Temperatur- og fuktighetsforandringer

Resultatene som er presentert i denne rapporten viser at effekten av lagringstid for leirens mekaniske egenskaper kan være nokså viktig i de tidlige stadiene av lagringsperioden (ca. de første ti dagene), særlig for prøver samlet med en stempelprøvetaker (54-72 mm). Testresultatene har vist at relativt små forskjeller i porevannskjemien oppstår raskt, og dette kan føre til forandringer i for eksempel leirens

udrenerte skjærstyrke. Det er derfor en klok praksis å utføre laboratoriet undersøkelserne så fort som mulig etter prøvetaking.

Beregning av prøve kvalitet er en grunnleggende del av geoteknisk prosjektering. Fysiokjemiske effekter som møtes på under lagringstiden er imidlertid for tiden ikke tatt hensyn til ved den norske metoden for vurdering av prøve kvalitet. Ved viktige og større geotekniske prosjekter er det anbefalt å måle leirens pH ved prøveopptaking eller når den ankommer laboratoriet, og igjen å sjekke den ved testing. Dette vil sikre kvalitetskontroll av data og at resulterende leireegenskaper er representative for de i felt.

Grunnet den begrensede kapasiteten ved geotekniske laboratorier, blir prøver sjelden testet like etter prøveopptaking, og ventetiden kan variere fra dager til flere måneder. Som vist i denne rapporten, er konsekvensene av slike forsinkelser at leirens mekaniske egenskaper forandres. Det er derfor nødvendig å i) kvantifisere lagringstidens innflytelse på leirens mekaniske egenskaper, og ii) evaluere tiden en prøve kan være lagret før de mekaniske egenskapene ikke er representative for den opprinnelige prøven. For å utvikle slike retningslinjer, ble et laboratorieprogram foreslått i kapittel 5. Formålet med et slikt program er å sørge for et forhold for å kunne evaluere prøve kvalitetsforverring med tiden, for leirer med ulik konsistens (ulik plastisitet og sensitivitet). For å sikre gode resultater, må flere prøver samles ved å bruke de samme verktøyene og prosedyrene, de samme forseglingsteknikkene, ekstrusjonsmetode, og prøveforberedelsesmetode. Slike resultater og retningslinjer med henhold til effekten av lagringstid er av øverste betydning for å sikre trygg prosjektering og stabilitet i områder som inneholder sensitiv og kvikkleire.

7 References

- Andresen, A., Kolstad, P. 1979. The NGI 54 mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials. *Proc. Int. Symposium on Soil Sampling*, Singapore 1979, pp.13-21.
- Arman, A. and McManis, K.L. 1976. Effects of storage and extrusion on sample properties. *Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*, ASTM, STP 599, pp 66 - 87.
- Atkinson, J. H., Allman, M.A., Boese, R. J. 1992. Influence of laboratory sample preparation procedures on the strength and stiffness of intact Bothkennar soil recovered using the Laval sampler. *Géotechnique*, 42(2), 349–354.
- Baligh, M. M., Azzouz, A.S., Chin, C. T. 1987. Disturbances due to “ideal” tube sampling. *Journal of geotechnical engineering*, 113(7), 739-757.
- Bjerrum, L., 1954. *Geotechnical properties of Norwegian marine clays*. *Géotechnique*, Vol. 4, No. 2, p. 49-69. Also publ. as: Norwegian Geotechnical Institute. Publication 4.
- Bjerrum, L. 1973. Problems of soil mechanics and construction on soft clays. State-of-the-art report to session IV, 8th International conference on soil mechanics

- and foundation engineering, Moscow. Proceedings, Vol. 3, pp. 111-159. Also publ. in: Norwegian Geotechnical Institute, Oslo. Publication, 100, 1974.
- Bjerrum, L., Rosenqvist, T.H., 1956. Some Experiments with artificially sedimented clays. *Géotechnique*, 6, pp. 124-136.
- Bozozuk, M. 1971. Effects of sampling, size and storage on test results for marine clays. *Sampling of Soil and Rock. ASTM STP 483*, pp 121 - 131.
- Budhu, M., and Wu, C. S. 1992. Numerical analysis of sampling disturbances in clay soils. *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 16, 467-492.
- Clayton, C. R. I., Hight, D. W., Hopper, R. J. (1992). Progressive destructuring of Bothkennar clay: Implications for sampling and reconsolidation procedures. *Géotechnique*, 42(2): 219-239.
- Clayton, C.R.I., Matthews, M.C. and Simons, N.E., 1995. Site Investigation 2nd. Edition Blackwell Science, Oxford, U.K.
- Clayton, C. R. I., Siddique, A., Hopper, R. J. (1998). Effects of sampler design on tube sampling disturbance-numerical and analytical investigations. *Géotechnique*, 48(6), 847-867.
- Crawford, C.B. 1963. Cohesion in an undisturbed sensitive clay. *GCotechnique*, 13(2), pp. 132-146.
- Conlon, R.J. 1966. Landslide on the Toulmoustou river, Quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(3), pp. 113-144.
- Graham, J., Kwok, C.K. and Ambrosie, R.W. (1987). Stress release, undrained storage, and reconsolidation in simulated underwater clay. *Can Geo. Jnl.*, 24, pp 279 - 288.
- Graham, J. and Lau, S.L-K. (1988). Influence of stress release disturbance, storage, and reconsolidation procedure on the shear behaviour of reconstituted underwater clay". *Géotechnique*, 38, No. 2, pp 279 - 300.
- Graham, J., Jamieson, M.R., Ho, D.Y.F. and Azizi, F. (1990). Influence of storage and reconsolidation procedures on clay properties. *Geotechnical Testing Jnl.*, Vol. 13, No. 4, December, pp 280 - 290.
- Henriksson, M., Carlsten, P., 1994. Lagringstidens inverkan på prøver tagna med standardkolvprotagare. *Varia 430*. Statens geotekniska institut.
- Heymann, G., 1998. The stiffness of soil and weak rock at very small strains, PhD Thesis, University of Surrey, U.K.
- Heymann, G. and Clayton, C.R.I., 1999. Blokk sampling of soil: some practical considerations. In: Wardle, Blight and Fourie (Editors), *Geotechnics for Developing Africa*. Balkema, Rotterdam, pp. 331 - 339.
- Hight, D.W., 2000. Sampling effects in soft clay: an update, 4th. International Geotechnical Conference, Cairo, Egypt.
- Hight, D. W. (1986). Laboratory testing: assessing BS 5930. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications*, 2(1), 43-52.

- Hight, D. W., Leroueil, S. (2003). Characterisation of soils for engineering purposes. *Characterisation and engineering properties of natural soils, 1*, 255-362.
- Hight, D.W., Boese, R., Butcher, A.P., Clayton, C.R.I. and Smith, P.R. (1992). Disturbance of Bothkennar clay prior to laboratory testing. *Géotechnique*, 42, No. 2, pp 199 - 217.
- Hvorslev, M. J. 1949. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes.” Report on a research project of ASCE, U.S. Army Engineer Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Karlsrud, K. 1991. Sammenstilling av noen erfaringer med prøvetaking og effekt av prøveforstyrrelse i norske marine leirer. NGI rapport 521500-6.
- Karlsrud, K., Hernandez-Martinez, F.G. (2013) Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high quality Blokk samples. Submitted for publication *Canadian Geotechnical Journal*
- Kirkpatrick, W.M. and Khan, A.J. (1984). The reaction of clays to sampling stress relief. *Géotechnique*, 34, No. 1, pp 29 - 42.
- Kirkpatrick, W.M., Khan, A.J. and Mirza, A.A. (1986). The effects of stress relief on some overconsolidated clays. *Géotechnique*, 36, No. 4, pp 511 - 525.
- Ladd, C.C., Lambe, T. W. 1963. The strength of undisturbed clay determined from undrained tests. *Symp. on Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM, STP No. 361, 342–371.
- Ladd, C.C., Foott, R. 1974. New design procedure for stability of soft clays. *J. Geotech. Eng.*, 100(7), 763–786.
- Ladd, C. C., and DeGroot, D. J. _2003_. “Recommended practice for soft ground site characterization: Arthur Casagrande lecture.” *Proc., 12th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Boston, 3–57.
- Landon, M.M., DeGroot, D.J., Sheahan, T.C. (2007). Nondestructive sample quality assessment of a soft clay using shear wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(4), 424-432.
- LaRochelle, R., Lefebvre, G., 1971. Sampling disturbance in Champlain clays. *In* sampling of soil and rock, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 483, pp. 143-163.
- LaRochelle, P. L., Sarrailh, J., Tavenas, F., Roy, M., Leroueil, S. 1981. Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 18(1), 52-66.
- La Rochelle, P., Leroueil, S. and Tavenas, F., 1986. A technique for long term storage of clay samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(4): 602 - 605.
- Lefebvre, G., Poulin, C. 1979. A new method of sampling in sensitive clay. Technical Note, *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), pp. 226-233.
- Leroueil, S., Tavenas, F., Le Bihan, J.P., 1983. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 681-705.

- Lessard, G. and Mitchell, J.K., 1985. The causes and effects of aging in quick clays." *Canadian geotechnical journal* 22(3): 335-346.
- Lunne, T., Berre, T., and Strandvik, S. 1997. Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. In Proceedings of the Conference on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, Brazil, 25–27 June 1997. Edited by M. Almeida. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. pp. 81–102.
- Lunne, T., Berre, T., Andersen, K.H., Strandvik, S., and Sjørusen, M. 2006. Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(7): 726-750. doi:10.1139/t06-040
- Lunne, T., Long, M., and Uzielli, M. 2007. Characterization and engineering properties of Troll clay. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, 29 November – 1 December 2006. Edited by T.S. Tan, K.K. Phoon, D.W. Hight, and S. Leroueil. National University of Singapore, Singapore. Vol. 3, pp. 1939–1972.
- Moum, J., Löken, T., Torrance, J.K., 1971. A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway. *Géotechnique* 21(4): 329-340.
- Moum, J., Löken, T., Torrance, J.K., 1972. Discussion: A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway. *Géotechnique* 22(3): 542-544.
- Nash, D. F. T., Powell, J. J. M., Lloyd, I. M. 1992. Initial investigations of the soft clay test site at Bothkennar. *Géotechnique*, 42(2), 163-181.
- Noorany, I., and Poormand, I. 1973. Effect of sampling on compressibility of soft clay. *J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 99(2): 1184–1188.
- Noorany, I., and Seed, H. B. 1965. In-situ strength characteristics of soft clays. *J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 91(2), 49–80.
- NGI 1971. Resultater av triaksialforsøk med 95 mm prøver av kvikkleire fra Ellingsrud. NGI-rapport 50306.
- NGI 1984. 1984 Soil investigation program Troll East. Rapport nr. 84210
- NGI 1988. 1987 Soil Investigation Troll Field, Blokk 31/6. Laboratory report. Report nr. 882504-01. pp. 105.
- Rømoen, M. 2005 Project assignment – Evaluation of ground conditions and stability of the Berg area in Trondheim, NTNU
- Siddique, A., 1990. A numerical and experimental study of sample disturbance, Ph.D thesis, University of Surrey, U.K.
- Siddique, A., Clayton, C. R. I., Hopper, R. J. 1999. The effects of varying centerline tube sampling disturbance on the behavior of reconstituted clay. *Geotech. Test. J.*, 22(3), 245–256.

- Schjetne, K., 1971. The measurement of pore pressure during sampling, Proceedings of the Speciality Session on Quality in Soil Sampling, 4th. Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, pp. 12 - 16.
- Skempton, A. W., Sowa, V. A. 1963. The behavior of saturated clays during sampling and testing. *Géotechnique*, 23(4), 269–290.
- SGI 1994. Lagringstidens inverkan på prover tagna med standardkolvprovtagare. Statens geotekniska institut. SGI varia 430. ISSN 1100-6692. 13 pp.
- Söderblom, R. 1969. Salt in Swedish clays and its importance for quick-clay formation. Results from some field and laboratory studies. Swedish Geotechnical Institute, Proceedings, No. 22, 63 p.
- Söderblom, R. 1974. Aspects on some problems of geotechnical chemistry, Part 111. Swedish Geotechnical Institute, Proceedings, No. 55, pp. 452-468.
- Torrance, J.K. 1976. Pore water extraction and the effect of sample storage on the pore water chemistry of Leda clay. Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication, No. 599, pp. 147-157.

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



Dokumentinformasjon/Document information					
Dokumenttittel/Document title Effekten av lagringstid på prøve kvalitet				Dokumentnr./Document No. 20130672	
Dokumenttype/Type of document Rapport/Report		Distribusjon/Distribution Fri/Unlimited		Dato/Date 1. desember 2013	
				Rev.nr.&dato/Rev.No.&date 0	
Oppdragsgiver/Client NIFS					
Emneord/Keywords Leire, prøve kvalitet, prøveforstyrrelse, lagringstid, laboratorium					
Stedfesting/Geographical information					
Land, fylke/Country, County				Havområde/Offshore area	
Kommune/Municipality				Felt navn/Field name	
Sted/Location				Sted/Location	
Kartblad/Map				Felt, blokknr./Field, Blokk No.	
UTM-koordinater/UTM-coordinates					
Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev./Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll/ Self review av/by:	Sidemanns- kontroll/ Colleague review av/by:	Uavhengig kontroll/ Independent review av/by:	Tverrfaglig kontroll/ Inter- disciplinary review av/by:
0	Originaldokument	JSL	KK		
Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release		Dato/Date 1. desember 2013		Sign. Prosjektleder/Project Manager Jean-Sebastien L'Heureux	

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen geofagene. Vi utvikler optimale løsninger for samfunnet, og tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg.

Vi arbeider i følgende markeder: olje, gass og energi, bygg, anlegg og samferdsel, naturskade og miljøteknologi. NGI er en privat stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskap i Houston, Texas, USA.

NGI ble utnevnt til "Senter for fremragende forskning" (SFF) i 2002.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting in the geosciences. NGI develops optimum solutions for society, and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the oil, gas and energy, building and construction, transportation, natural hazards and environment sectors. NGI is a private foundation with office and laboratory in Oslo, branch office in Trondheim and daughter company in Houston, Texas, USA.

NGI was awarded Centre of Excellence status in 2002.

www.ngi.no



Hovedkontor/Main office:
PO Box 3930 Ullevål Stadion
NO-0806 Oslo
Norway

Besøksadresse/Street address:
Sognsveien 72, NO-0855 Oslo

Avd Trondheim/Trondheim office:
PO Box 1230 Pirsenteret
NO-7462 Trondheim
Norway

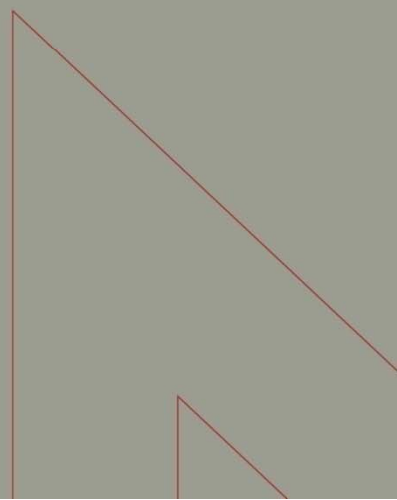
Besøksadresse/Street address:
Pirsenteret, Havnegata 9, NO-7010 Trondheim

T: (+47) 22 02 30 00
F: (+47) 22 23 04 48

ngi@ngi.no
www.ngi.no

Kontonr 5096 05 01281 /IBAN NO26 5096 0501 281
Org. nr./Company No.: 958 254 318 MVA

BSI EN ISO 9001
Sertifisert av/Certified by BSI, Reg. No. FS 32989





Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

