



Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

State-of-the-art: Blokkprøver

41
2013



R
A
P
P
O
R
T

Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

State-of-the-art: Blokkprøver

Rapport nr. 41/2013

State-of-the-art :Blokkprøver

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

Utarbeidet av: Norges geotekniske institutt (NGI)

Forfatter: Kjell Karlsrud, Reidar Otter, Vidar Gjelsvik

Dato: 20.12.2012

Opplag: P.O.D.

ISBN: 978-82-410-0910-5

Sammendrag: Etatene Statens vegvesen (SVV), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) har, gjennom etatsatsningsprosjektet Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS) et delprosjekt (DP6) som omhandler kvikkleire. Fra NGI er det bestilt en rapport med hensikt å oppsummere NGIs erfaring med blokkprøvetaking og labundersøkelser på blokkprøver.

Emneord: blokkprøvetaking, labundersøkelser

Forord

NIFS-prosjektet er et felles satsningsområde mellom Jernbaneverket, Norges vassdrags- og energidirektorat og Statens vegvesen. Prosjektperioden er definert som 2012 – 2015. Planlagt budsjett på 42 millioner i perioden. Stort fokus på intern kompetanse og faglig utvikling bidrar i tillegg med anslagsvis 30 årsverk fra etatene i samme periode. Prosjektet er allerede i leveransefasen, 7 delprosjekter er etablert, og opp i mot 100 medarbeidere i de tre etatene er involvert i større eller mindre grad.

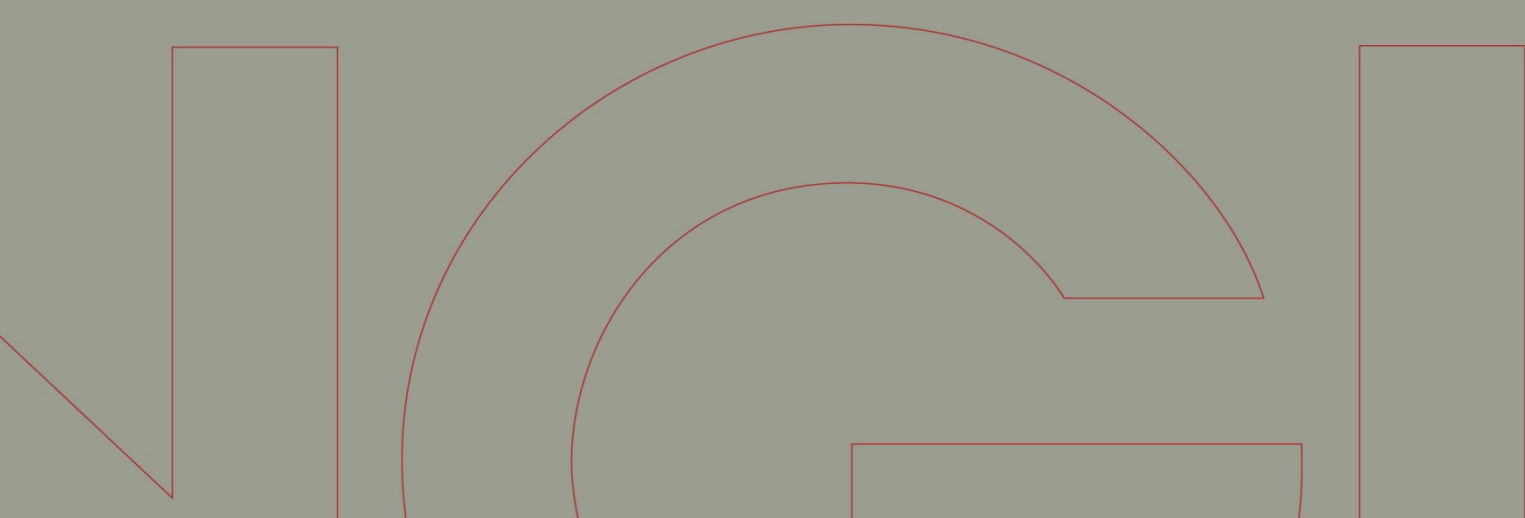


Rapport / Report

NIFS-N5-Blokkprøver

State of the art, blokkprøver

20120866-01-R
1. desember 2012
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-N5-Blokkprøver
Dokumenttittel: State of the art - blokkprøver
Dokumentnr.: 20120866-01-R
Dato: 1. desember 2012
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: SVV/NVE/JBV
Kontaktperson: Vikas Thakur
Kontraktreferanse: NIFS avrop N.6.4.1

For NGI

Prosjektleder: Vidar Gjelsvik
Utarbeidet av: Kjell Karlsrud, Reidar Otter, Vidar Gjelsvik
Oversettelse av: Tone Solem, Vidar Gjelsvik
Kontrollert av: Toralv Berre, Kjell Karlsrud

Sammendrag

Denne rapporten er laget på oppdrag for SVV, JBV og NVE innen etatsprosjektet NIFS. Bakgrunnen for prosjektet er bl.a. at både Statens Vegvesen og NTNU har anskaffet og tatt i bruk blokkprøvetakeren. I den sammenheng har man sett behov for en rapport som oppsummerer NGIs erfaring med denne fra prøvetaking til håndtering av prøver i felt og lab, samt resultater fra laboratorieundersøkelser. Rapporten er todelt. Del 1 (kap. 3 – 5) inneholder en detaljert beskrivelse av prøvetakingsutstyret, prosedyrer for bruk i felt, håndtering av prøver i felt og lab. (inkl. transport), samt lagring og oppdeling av prøver. Del 2 inneholder et sammendrag av resultater fra ødometerforsøk og udrenerte skjærforsøk på blokkprøver og presenterer korrelasjoner med tanke på rutineparametre. Denne delen av rapporten utgjør i det alt vesentligste en oversettelse av artikkelen ”Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high quality block samples” av Kjell Karlsrud og Francisco Gabriel Hernandez-Martinez, sendt inn til Canadian Geotechnical Journal for publisering.

Observasjonene fra laboratorieforsøk kan oppsummeres som følger:

De fleste blokkprøvene kan klassifiseres som god til meget god, men også noen i god til ganske god. Prøver med dårlig kvalitet er ikke benyttet i korrelasjonsstudiene.

Sensitivitet og vanninnhold er funnet å være de beste korrelasjonsparameterne. I_p er ikke tillagt spesielt stor vekt som korrelasjonsparameter da den er påvirket av sensitiviteten. Av praktiske hensyn er det valgt å gruppere sensitiviteten i hhv. $St > 15$ og $St < 15$. OCR benyttes også som korrelasjonsparameter.

Janbus modulkonsept er benyttet for å definere volumetrisk kompressibilitet. Det er en tydelig korrelasjon mellom initiell rebelastningsmodul, M_0 , vanninnhold og p_c' . Modultallet, m med tilhørende referansespenning, p_r' er også nært knyttet til vanninnholdet. Overraskende nok ser kompressibilitet ut til å være uavhengig av sensitivitet.

Gjennomsnittlig permeabilitet er $k_0 = 1,77 \cdot 10^{-9}$ m/s, men viser overraskende stor variasjon med standardavvik på ca. 60 %. Permeabilitet synes uavhengig av vanninnhold, men avtar noe med økt leirinnhold.

Normalisert udrenert skjærfasthet ser ut til å øke noe med økt vanninnhold i leiren, men dette kan ikke forklare variasjonen i målte verdier. Sensitiviteten ser ut til å ha liten innvirkning på udrenert skjærfasthet. Den relativt store variasjonen antas å kunne forklares ved ulik mineralogi, geokjemi og mulige sementerings effekter. Anisotropiforholdene ligger i området $c_{uE}/c_{uC} = 0,23 - 0,53$ og $c_{uD}/c_{uC} = 0,56 - 0,82$. Disse forholdene viser en klar tendens til å øke med økende vanninnhold, og er i mindre grad avhengig av OCR. I tillegg ser anisotropiforholdene ut til å avta med økt sensitivitet, noe som kan forklares ved en mer utpreget struktorkollaps ved spenningsrotasjonen på passive-/DSS-forsøk.

Effektive skjærspenningsparametre er for enkelhets skyld tolket med null attraksjon, da det generelle grunnlaget for å bestemme attraksjonen har vært for dårlig. Med denne forutsetningen ligger målt friksjonsvinkel i området $\phi = 28^\circ - 35^\circ$. Det er en svakt økende tendens med økt vanninnhold. Det er målt enkelte ekstreme verdier, opp til $\phi = 55^\circ$, som antagelig kan forklares ved en betydelig attraksjon eller sementerings effekt.

Skjærtøyning ved brudd viser stor variasjon fra små verdier på rundt 0,4 % for CAUC-forsøk, til 15 % for CAUE-forsøk. Bruddtøyningen i CAUC-forsøk viser en klart økende trend for økt OCR, og redusert for økt sensitivitet. For CAUE-forsøk er variasjonen meget stor, men ligger typisk i området 2 – 5 ganger bruddtøyning i CAUC-forsøk, med DSS-forsøk et sted i mellom.

Normalisert udrenert skjærmodul $G50/v_0'$ ligger i området 50 – 200. Tendensen er at $G50/v_0'$ øker med økt sensitivitet, og er relativt uavhengig av OCR og vanninnhold.

Sammendrag (forts.)



Dokumentnr.: 20120866-01-R

Dato: 2012-12-01

Rev. nr.: 0

Side: 5

Bruk av blokkprøvetaker kan gi muligheter for å dokumentere høyere skjærfasthet enn ved bruk 54 mm prøvetaker, og derav gi potensielle besparelser ved optimalisert prosjektering. Det er imidlertid enkelte aspekter som da er viktig å ta hensyn til ved valg av designfasthet og materialfaktor, som for eksempel progressiv bruddutvikling, tøyingskompatibilitet og tidseffekter med mer. Likevel vil effekt av prøveforstyrrelse kunne utgjøre en vesentlig gevinst, avhengig av prosjektet. Det er av Berre m.fl. (2007) foreslått en metode for korrigering av forstyrrede prøver for å kunne vurdere potensialet for endrede parametre ved blokkprøvetaking. Det er imidlertid ikke anbefalt å benytte en slik korrigering for designformål direkte.



1	Innledning	7
2	Historikk	7
3	Bruk av blokkprøvetaker	8
3.1	Utstyr	9
4	Blokkprøvetaker i kasse med:	12
4.1	Forberedende arbeider	13
4.2	Prøvetaking	14
4.3	Pakking og håndtering av prøver i felt	18
4.4	Frakt av prøver	21
4.5	Avslutning i felt. Sikring av borhullet	21
4.6	Bemanning	21
4.7	Tidsforbruk i felt	21
4.8	Fysiske begrensninger	22
4.9	Behov for videre utviklinger av prøvetakeren	22
5	Laboratorieundersøkelser	22
5.1	Oppbevaring av prøver	22
5.2	Håndtering av blokkprøve i laboratorium	22
5.3	Lagring	22
5.4	Utpakking	22
5.5	Fjerning av forstyrret materiale i toppen av prøven	23
5.6	Utskjæring av prøvens hoveddel	24
5.7	Oppdeling av prøven i segmenter	25
5.8	Forsegling og lagring	27
5.9	Merking av prøve	27
5.10	Utnyttelse av prøven, antall tester.	27
6	Resultater fra laboratorieundersøkelser	28
6.1	Generelt	28
6.2	Prøvekvalitet	28
6.3	Forsøkssteder	34
6.4	Kvalitet av blokkprøvene	36
6.5	Indeksparametre benyttet i korrelasjoner	40
6.6	Laboratorieresultater	41
6.7	Mulig korreksjon av 54 mm prøver	77
7	Sluttkommentar	78
8	Referanser	80

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Denne rapporten er laget på oppdrag for SVV, JBV og NVE innen etatsprosjektet NIFS. Bakgrunnen for prosjektet er bl.a. at både Statens Vegvesen og NTNU har anskaffet og tatt i bruk blokkprøvetakeren. I den sammenheng har man sett behov for en rapport som oppsummerer NGIs erfaring med denne fra prøvetaking til håndtering av prøver i felt og lab, samt resultater fra laboratorieundersøkelser. Rapporten er todelt. Del 1 (kap. 3 – 5) inneholder en detaljert beskrivelse av prøvetakingsutstyret, prosedyrer for bruk i felt, håndtering av prøver i felt og lab. (inkl. transport), samt lagring og oppdeling av prøver. Del 2 inneholder et sammendrag av resultater fra ødometerforsøk og udrenerte skjærforsøk på blokkprøver og presenterer korrelasjoner med hensyn på rutineparametre. NGI har i løpet av de seneste årene laget en meget omfattende intern rapport som oppsummerer resultater fra alle blokkprøver som er tatt av NGI i årenes løp. I 2010 holdt Kjell Karlsrud fra NGI Laurits Bjerrums minneforedrag basert på dette materialet. Siden vi anså at dette var en oppsummering av state of the art for blokkprøverresultater i Norge, utgjør det alt vesentligste av del 2 av denne rapporten en oversettelse til norsk av Bjerrum-artikkelen som er levert til publisering hos Canadian Geotechnical Journal.

2 Historikk

Bruk av stempelprøvetaker har vært den tradisjonelle prøvetakingsmetoden i Norge siden 1950-årene. Erfaringer med bruk av 54 mm stempelprøvetaker ved NGI har vært at den ikke kan produsere tilnærmet uforstyrrede og gode prøver når prøvetakeren går lenger enn ca. 10-20 m ned i leirer med medium til høy plastisitet, og nesten aldri i siltige leirer som vi finner i Norge. Leirer med høy sensitivitet og lav plastisitet er de vanskeligste.

Sent i 1960-årene introduserte NGI en 95 mm stempelprøvetaker med tynnvegget prøvesylinder og skarp egg. Den ga betydelig bedre prøve kvalitet enn den tradisjonelle 54 mm prøvetakeren. Det ble også vist at dersom 95 mm prøver ble skjøvet ut og bygget inn i en triakscelle kort tid etter prøvetaking (inntil 1-2 timer), ble kvaliteten forhøyet, særlig i de mest magre og sensitive leirene. Grunnen til dette er at kort oppbevaringstid reduserer muligheten for prøven kan rekonsolidere og feste seg til innsiden av sylinderen.

NGI ble i 1976 involvert i et prosjekt i James Bay, Canada, hvor dammer og demninger ble bygget på myk og delvis høysensitive leirer. I denne forbindelse ble NGI presentert for laboratorieprøver tatt med en spesiell blokkprøvetaker som nylig var blitt utviklet ved Universitet i Sherbrooke (Lefebvre og Poulin, 1979). Disse prøvene var etter NGIs mening helt spesielle med hensyn til de svært små bruddtøyninger og utpreget sprø bruddmekanisme ved udrenert skjær i triaks, samt utpreget volumetrisk kollaps ved ødometerforsøk i det spenningene ble økt ut over tilsynelatende forkonsolideringstrykk. (Eide og Andersen, 1977, Karlsrud m.fl., 1984). Noen år senere kontaktet derfor NGI Guy Lefebvre ved Universitetet i Sherbrooke, som ble invitert til Norge for å teste blokkprøvetakeren sin ved norske

feltområder. De tre stedene som ble utprøvd var kvikkleireavsetninger ved Ellingsrud og Emmerstad, og en sensitiv, men ikke kvikk leire fra Onsøy ved Fredrikstad, steder hvor NGI tidligere hadde brukt 54 og 95 mm prøvetakere og hadde testfyllinger.

Resultatene fra NGIs ødometer-, DSS- og triakstester på disse blokkprøvene var imponerende med tanke på prøve kvalitet og testresultater (Lacasse m.fl., 1985), og overbeviste NGI om at dette var et svært nyttig verktøy for fremtidige prosjekter. Betydningen av å skaffe gode prøver ble særlig viktig i 1990, da NGI ble involvert i prosjektering av jernbanen til den nye flyplassen ved Gardermoen, som gjennom nesten 40 km med marine leiresedimenter involverte mange skjæringer og fyllinger. NGI kontaktet derfor nok en gang Guy Lefebvre med ønsket om å kjøpe, og derved fritt kunne bruke, hans blokkprøvetaker på dette og fremtidige prosjekter. En avtale ble inngått i 1992. NGI fikk da lisens til å operere, i tillegg til å kunne produsere og selge prøvetakeren, om dette var ønskelig.

NGI har siden dette og frem til 2010 brukt blokkprøvetakeren på 22 forskjellige steder i Norge, i tillegg til ett feltområde i Storbritannia. Mesteparten av bruken har vært i tilknytning til kommersielle prosjekter, men noen har også vært rene FoU - prosjekter. Laboratorietester på blokkprøver NGI har mottatt og testet over årenes løp, har for det meste bestått av kontinuerlige eller trinnvise ødometerforsøk, aktive og passive triaksforsøk og DSS- (Direkte Simpel Skjær) forsøk. Data fra blokkprøveforsøkene viser for det meste at de testede prøvene har vært av høy kvalitet (NGI, 2012). Det var derfor meget ønskelig å etablere en database med nøkkelresultater fra blokkprøveforsøk.

3 Bruk av blokkprøvetaker

Blokkprøvetakingen deles i to operasjoner, a) boring av et stabilt og rent borhull ned til dyp for prøvetaking, b) dernest selve prøvetakingen vha blokkprøvetakeren.

En ”blokkprøve” er en sylindrisk leirprøve med diameter ca. 27 cm og høyde 35-40 cm. Prøven skjæres ut ved rotasjonsboring med en spesiell prøvetaker. Foringsrør brukes ikke i prøvetakeren. Langs prøvetakerens periferi står det tre skjær og tre vanddyser. Ved meget langsom rotasjon og liten mating, skaves leire opp og blandes med vann fra dysene til en slurry som føres med vannstrømmen opp i den sirkelformede ca. 5 cm brede slissen som dannes omkring prøven. Ved maks dybde for prøveskjæringen, ca 37 cm, avsluttes matingen og tre fjærbelastede ”kuttekniver” løses ut vha av et fallodd som fires ned langs borstrengen. Rotasjonen fortsetter nå ved konstant dybde og knivene skjærer prøven løs i underkant slik at den blir stående inne i prøvetakeren mens den hviler på de tre knivbladene. Prøven er nå fri og kan løftes opp av hullet og monteres på en sokkel for innpakking og transport.

3.1 Utstyr

- Boreriggens spesifikasjoner mht styrke, dimensjoner av borstenger, med mer, behøver ikke å være strengt definert, men noen tekniske egenskaper bør tilfredsstilles.
- NGIs rigg har følgende spesifikasjoner: Type GM 100 GT, vekt ca 5000 kg matelengde 2,3 m, matekraft 40 kN, løftkraft max 70 kN, dreimoment 1500 kN. (NGI har også benyttet underleverandørers fjellborerigger med langt større borekapasitet enn den riggen NGI benytter i dag).



Bilde 1 NGIs borerigg

- Boreriggen må være stødig, dvs. at borstrengen ikke må glippe eller hoppe under arbeidet, samt kunne holde stabil langsom rotasjon og mating. En øvet borer og medhjelper som forstår den spesielle forsiktigheten som kreves ved blokkprøvetaking betyr mye.
- Boreriggens styrke og størrelse er ikke det viktigste, fordi det brukes små krefter under selve boringen og det skal neppe bores til større dyp enn ca 20 m. Imidlertid bør riggen kunne løfte prøvetakeren ut av borhullet og opp over selve prøven slik at prøven kan trekkes vekk under prøvetakeren. Dette krever en tilpasset utforming på riggen slik at borstreng og tårn kan løftes minst 60 cm, gjerne 100 cm, over bakkenivå. Dersom ikke riggen er tilpasset spesielt, må selve riggen stå på et stabilt og hevet underlag. Bildet

over viser NGI's rigg plassert på en stålrampe som imidlertid krever egen transport.

- Andre tilpasninger av utstyret til borryggen bør foregå i forkant av feltarbeidet. NGI har pleid å sende utstyr i god tid til borentreprenøren slik at overganger og justeringer kan lages på verksted og ikke improviseres i felt.
- Dagens versjon av blokkprøvetakeren er en modifisert utgave av den originale Sherbrooke prøvetakeren. NGIs nylagede prøvetaker (av 2011) er nå forsterket og utløsermekanismen er endret.



Bilde 2 Modifisert utgave av Sherbrookee-prøvetakeren

- Borstengene er hule med koniske API gjenger. Diameter ca 46 mm.
- Jordskrue, med diameter 45 cm og skruehøyde ca 50 cm, brukes til å bore ut masse ned til ønsket prøvedyp. Skruen har ca 3 cm høye karmen og mothaker som hindrer leiren i å gli av.

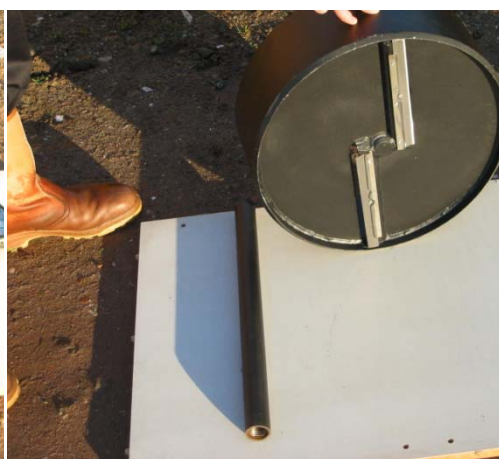


Bilde 3 Jordskrue

- Flatbunnehøvel er en sylinder ca. 20 cm høy, helst med innover skråstilt øvre kant og med to radielle slisser i bunnen der det er montert skjær. Høvelen brukes til å rense hullet for omrørt leire eller borkaks rett før ny blokkprøve skal tas.



Bilde 4 Flatbunnehøvel



Bilde 5 Flatbunnehøvel, med skjær

- Prøvetakeren, jordskruen og flatbunnehøvelen har alle en total lengde på 1 meter, slik at de inngår som metersenheter i borstrengen.

- Foringsrør er ofte påkrevet der det er grove fyllmasser eller grusige og sandige materialer i jordprofilen.
- Tilgang på vann: Blokkprøven skjæres ut ved at utskåret leire rundt prøven blandes med vann til en slurry. Dette krever et visst vanntrykk og mengde vann. Hullet skal også til enhver tid holdes vannfylt for å stabilisere veggene og til en viss grad kompensere for vekt av utboret masse. Maks oppnådd boredyp har vært 22 m på Lierstranda, Drammen, da kun med vannfylt hull.
- Oppslemmet leirig masse som strømmer ut av borhullet må samles opp dersom det ikke kan renne fritt ut i terrenget. I byområder må en utfellingscontainer for leirslam brukes.
- Boremud; bentonitt, har ikke vært brukt av NGI i de senere år for å stabilisere borhullet. Det har vært ansett som arbeidskrevende mht utstyr og vellykket innblanding. Videre kan utslippet av bentonittblandet vann gi inntrykk av forurensning.

Pakkliste for blokkprøvetaking, forslag fra NGI. Listen inneholder ikke utstyr som til vanlig følger borryggen.

- Arbeidsplan med boranvisning, kart og profiler
- Tidligere rapporter med relevant informasjon
- Liste med telefonnummer over kontaktpersoner/oppdragsgiver/leverandører av utstyr
- Påvisningsrapporter fra diverse tekniske etater. Grave-/boretillatelse
- Adgangstillatelser/sikkerhetskurs
- Behov for brakke/midlertidig lager med varme eller kjøling?
- Arbeidstøy, personlig verneutstyr, Viktigste: Regntøy og gummistøvler

4 **Blokkprøvetaker i kasse med:**

- Presenning med tau som værskydd
- Fall-lodd
- Borstangsforlenger inntil 1 m lengde
- Oppspenningsverktøy
- Borstenger
- Topp borstang med roterende slangetilkobling
- Slange fra vanntilførsel til topp borstang med roterende kobling
- Flatbunnshøvel
- Jordskrue, diameter ca 45 cm
- Plate til å legge over hullet når prøvetakeren skal settes ned, minimum lengde og bredde 75 x 80 cm, tykkelse 1-1,5 cm, (vannfast forskalingsplate kan brukes.)
- Foringsrør, stål, plast, diameter ca 50 cm
- Brannstender, tilkobling i brannkummer
- Slanger med dimensjon og overganger som kan tilpasses vanntilgangen på stedet. Minimum er 3/4 ” hageslanger med overganger og tilkoblinger.

- Prøvesokkel, rikelig antall. Diameter mot bunn av prøvetakeren 27 cm. Se bilde 10.
- Plastkiler som understøttelse av prøven mot sokkel dersom leire rives unna og prøven blir stående skjevt.
- Plastspann, 50 liter, med tettende lokk. Diam i bunn 35-40 cm, høyde 53 cm
- Bobleplast på stor rull til støtte og fylling rundt prøven i spannet
- Løfteinnretning som passer inn i sokkelen og som kan løfte prøven ned i spannet
- Plastfolie i store prof.-forpakning
- Aluminiumsfolie, prof.-forpakning, bred og tykk kvalitet.
- Glassfiberstrie, veggtafétkvalitet
- Bred pakketape
- Merkelapper / borkort
- Vannfast tusj
- Skolekritt for merking på borstenger
- Verktøykasse med minimum innhold:
- Fastnøkler, 13 mm, lang type passende til blokkprøvetakeren
- Skiftenøkler
- Skrutrekkere
- Hammer
- Sparkelspader, ulik bredde
- Tommestokker i plast, flere!
- Plantespader
- Kniv
- Sprayolje
- Elektrikertape
- Målebånd på snelle med lodd i enden for dybdemåling i brønnen
- Europaller til arbeidsplattform, 6-8 stk
- Spade
- Sperrebukker, sperrebånd
- Visp til oppslemming, alternativ til boring, se bilde 6.
- Sugepumpe med slanger, se bilde 7
- Papirtørkerull
- Plastbøtte
- Oppvaskkost
-

4.1 Forberedende arbeider

Resultater fra tidligere utførte grunnundersøkelser ligger til grunn for valgt borested. Disse resultatene må gis den som leder arbeidet i felt, slik at begrunnede forandringer i boreprogrammet kan foretas.

Vanlig forarbeid for feltundersøkelser. Kort kan nevnes:

- Kontakt med den som disponerer grunnen, gravetillatelse
- ”Påvisning” fra ulike tekniske etater, offentlige som private

Befaring med hensyn til adkomst og oppstillingsplass. Vurder om marktrykk fra riggen kan påvirke prøvetakingen. NGI har noen ganger brukt skytematter som underlag for riggen og den oppstillingsrampen som NGI for tiden bruker for at bor-riggen skal få tilstrekkelig arbeidshøyde. Unødvendig kjøring ved borstedet må unngås.

Tilgang på vann. Utenfor tilgang til offentlig vann har NGI pumpet fra bekker eller fått vann tilkjørt i tankbil på 5-6 m³ evt. i 1 m³ plasttanker. Offentlig vann fra brannkummer gir rikelig mengde og trykk slik at vannet kan kobles direkte til borstengene, mens husholdningsvann/hageslangetilkoblinger oftest gir for lite vann. En minimums løsning har vært å bruke en mellomagringstank på min 1 m³ og riggens vannpumpe som trykk giver. En full tank med 1 m³ vann holder vanligvis til utskjæring av en prøve.

Utfellingscontainer for leirslam som følger borevannet må brukes i bystrøk. Utfellingen i en container er sjelden fullt ut tilstrekkelig og avløp for borevannet må vurderes. ”Sølevann” kan fort bli oppfattet som forurensning. En oppsamlingsgrop eller kum kan lages som første utfellingstrinn og slamvann kan pumpes derfra til en utfellingscontainer.

Trengs foringsrør for å unngå at grove, sandige eller siltige masser faller inn eller vaskes ut i hullet? NGI har brukt stålrør, ca. 50 cm i diameter, som har vært drevet ned kun vha riggens vekt og sveiset sammen i løpende lengder. Oftest har det vært brukt 2-3 cm tykke glatte plastrør på 3 - 5 meters lengde. Kan foringsrøret ikke drives ned, kan et kort rør graves ned og masse tilbakefylles rundt røret. Grove masser, som vil vaskes ut på større dyp, krever tung borrygg som kan rotasjonsbore foringsrør.

Lager for prøver og utstyr kan trenge dersom det er lang transport til laboratoriet. Prøvene må lagres uten frost. Frost ødelegger strukturen i leira. Varme tørker ut. Trengs anleggsbrakke som lager, skifte- og tørkerom?

4.2 Prøvetaking

Ut boring av et stabilt og rent borhull kan gjøres på tre måter, som forklart under punktene A, B, og C nedenfor, etter at et eventuelt foringsrør er satt på plass:

Foringsrøret settes enklest ned ved bruk av jordskruen. Massen tas ut nesten til rørets maksdyp og røret drives til slutt ned vha riggens tyngde. Dette gir god tetning. Sett gjerne flatbunnshøvelen ned i bunn av hullet og bruk denne til å fange opp stein som faller ned under nedpressingen. Stein i hullet kan gnage i stykker prøvene under skjæring.

- A) Bruk jordskruen, diameter ca 45 cm, og løft massen ut i lengder på ca. 50 cm. Hold hullet vannfylt, men bruk ikke spylevannet fram til skruens spiss under nedskruingen, da dette kan redusere friksjonen mellom massen og skruen slik at massen glir av. Spylevannet settes først på når skruen skal løftes opp. Dette reduserer sjangsen for sug under prøven, og bidrar til løft. Før prøvetaking må hullet loddes opp og renses for slam som uvegerlig faller ned. Bruk flatbunnehøvelen til dette. Se om "Måling av dybder" under.
- B) Ta prøve på prøve kontinuerlig med blokkprøvetakeren og rens opp av og til med flatbunnehøvelen hvis nødvendig for å unngå opphopning av omrørt masse. Dette kan gi et stort utvalg av prøver hvis de lagres midlertidig
- C) Oppslemming av leirmassen kan gjøres med en "visp" som roteres raskt. En slange fra sugepumpe kan senkes til overkant av "vispen" og oppslemmet masse pumpes ut. Metoden krever at det bores med meget liten mating slik at oppslemming til pumpbar suspensjon er vellykket. Vanntilgangen må være tilstrekkelig slik at hullet hele tiden kan holdes vannfylt. Oppslemmet leire bidrar til å stabilisere hullet. Metoden har vært prøvd med blandet resultat. Forutsetning er at leiren lar seg suspendere lett og at vanntilgang og utstyret ellers er tilpasset.



Bilde 6 "Visp" for omrøring av leire i borhullet



Bilde 7 Sugepumpe til pumping av dispergert leire

Metodene A) og B) har vært brukt om hverandre. Metoden med kontinuerlig prøvetaking kan synes raskere hvis man ikke bruker tid på å mellomlagre prøver til senere utvelgelse. Begge metodene løfter masse greit ut etappevis og begge krever bruk av flatbunnshøvel til rensing før prøvetaking.

Kontroll på dybder er helt vesentlig og bør foregå på følgende måte:

Definer et praktisk nullnivå for alle målinger. Korrigjer om nødvendig i forhold til terreng senere. Hold nøyaktig dybdemål på borstengene og det verktøyet på borstrengen som brukes. Sett nummer (for eksempel med vanlig skolekritt) på borstengene etter hvert som de skyves ned. (Feilmåling her utløser mer ekstra arbeid enn under vanlig prøvetaking!) Bruk så loddsnor og lodd dypet til bunnen. **Forskjell i dyp målt på borstrengen og loddedybden viser hvor mye omrørt masse som må forseres før man kommer ned i uforstyrret jord. Man bør fjerne mesteparten av denne omrørte massen med flatbunnshøvelen.**

Behov for rensing av hullet før prøvetaking ansees som helt nødvendig. Det sikrer vellykket transport av oppslemmet materiale ut av det ringformede skjæret som dannes under utskjæringen av prøven. Videre vil bunnslam kunne presse mot prøven inne i prøvetakeren, samt legge til unødvendig ekstra vekt oppe på prøven når den skal løftes opp.

Rensning med flatbunnshøvel. Høvelen tar opp løst slam og nedfall fra borhullsveggene gjennom slissene i bunnen der det er montert skjær. Innholdet hentes opp etappevis ca. 20 cm pr gang. Høvelen må ikke brukes som boreredskap fordi bunnflaten gir vridning og trykk mot bunn av hullet noe som kan forstyrre prøven som skal tas like under. Videre kan bunnen av høvelen suge seg fast og gi så stor dreiemotstand at stengene knekker i gjengepartiet.

Klargjøring av prøvetakeren. Prøvetakeren kommer i en kasse som inneholder prøvetakeren, en borstangsforlengelse, som gjør at enheten måler nøyaktig 1 m, samt et utløserlodd som kan falle langs borstrengen. (I tillegg følger et oppspenningsverktøy som kan erstattes av lange 13 mm. fastnøkler.)

Oppspenning. Oppspenning kan gjøres enten mens enheten er løs eller festet til borstrengen. Tre låsemekanismer på toppen av enheten skal holde knivene, som brukes til å kutte prøve løs fra bunnen av hullet i ”åpen” oppspent posisjon. Knivene står da vendt langs periferien av den sirkelformede slissen som skaves ut. Start med å sette knivene i ”åpen” posisjon langs periferien og lås dem med de vertikale stengene som passer ned i hullet på knivene. Bruk en lang fastnøkkel til å spenne opp torsjonsfjærene ca 2 – 2,5 hakk på kranshjulet. Momentet på knivenes torsjonsfjærer er målt til ca 23 – 28 Nm. Dette spennet anses som passende kraft til å skjære av prøven i bunn etter utskaving til riktig dybde. **Test at oppspenningen og utløsermekanismen virker.**

Sjekk at vannspylingen gjennom prøvetakerens tre dyser er sterk. Strålen bør være kraftig og rettet nedad. Stråle som spylar innover ødelegger prøven.



Husk at hullet må være vannfylt hele tiden. Senk prøvetakeren mens man spylar gjennom dysene. Disse kan lett tette seg under nedsenkingen hvis prøvetakeren tar inn i borhullveggen.

Justering av borhastighet og mating bør utføres ca 10 – 20 cm over prøvetakingsdypet. Borriggen må gå uten rykk og hopp. Den som kjenner leirtypen på stedet bør vurdere borehastighet, men et godt utgangspunkt for skjæringen er: **30 sek pr. omdreining av prøvetakeren og 1 cm mating pr omdreining, altså 2 cm ned pr minutt.** En absolutt maks prøvehøyde er 40 cm, dvs. at det tar opp til 20 min å skjære ut en prøve.

Når rotasjon og mating er justert, merk av skjæredyp på borstrengen, og start. Maksimal prøvehøyde er 40 cm. Bruker man 37 cm er det plass til litt slam uten at det presser mot prøven.

Bløt, sensitiv leire. Dersom leiren er bløt og sensitiv kan selve vekten av prøven bli så stor at prøven siger. Den kan anta kjegleform mot bunnen og bæreflaten mot knivene kan bli for liten totalvekten tatt i betraktning. Løsningen kan være å skjære ut en mindre prøvehøyde, si 25 cm. Bedre med god kvalitet på få prøver, enn mange dårlige prøver.

Skjæringen foregår ved at tre skråttstilte skjær i forkant av dysene skaver leiren opp, samtidig som vann fra dysene blander leiren til en slurry som vaskes opp og ut av den ringformede åpningen rundt prøven. Stein og skjell i leira kan gnage på prøvesidene og gi en trådsnelleformet prøve av dårlig kvalitet.

Ved ferdig utskåret dybde: Stans boringen. Fest utløserloddet rundt borstrengen og senk det sakte ned til prøvetakeren, løft opp en favn og slipp fritt 2-3 ganger slik at man er trygg på at knivene er frigjort (Husk at mekanismen kan bankes i filler ved for ivrig bruk av falloddet).

Avskjæring av prøven i bunn skjer nå ved samme rotasjonshastighet som før, men ved fast dybde. Etter utløsning presser torsjonsfjærene knivene innover under rotasjonen og kutter prøven fri fra bunnen. Avskjæringstid: 3-5 min avhengig av leirens styrke. Spylingen kan stanses under avkuttingen hvis det er fare for utvasking av sandlag. Etter 3-5 minutter dreies prøven langsomt opp og ut av borhullets nedre del, mens spylingen settes på igjen for å hindre sug. Vel ute av den smale delen av hullet, ca. 60 cm, kan prøven heises raskt opp. Legg dekkeplaten over hullet og hold sokkelen på plass under prøvetakeren. Senk prøven og sokkelen ned på platen uten at det blir press mot platen. Frigjør låsemekanismen slik at knivene kan dreies ut uten at de river med seg biter av prøvens bunn. Støtt med hendene der knivene dreies ut. Om leire rives ut, lapp etterpå med uforstyrret leire hvis mulig, slik at prøven står rett eller aller helst, sett inn plastkiler som må foreligge i ulike størrelser. Toppen og sidene av prøven renses umiddelbart for løst slam og overflødig vann.



Bilde 8 Blokkprøvetakeren i bruk

Løft prøvetakeren opp over prøven uten at den skraper og drar i prøven. Trekk sokkelen unna og flytt prøven til et sted der innpakking kan forgå. To mann bør bære. Prøven veier 35-40 kg og den må ikke presses eller skli på sokkelen. Husk å rense prøvetakeren etter bruk og kontrollere at spyledysene er åpne. Å stake ut tørket leire fra innsiden av prøvetakeren koster tid. Dusj mekanismen med sprayolje.

Sikring av borhullet må gjøres etter avsluttet arbeid hver dag. Hullet fremstår som en liten dam, men er en livsfarlig vannfylt sjakt. Legg en dekkende plate over og lås denne med borrygen.

4.3 Pakking og håndtering av prøver i felt

Prøven står nå på en "treetasjes" sokkel med diameter 27 cm som er tilpasset bunn av prøvetakeren. Sokkelen er laget av to lag ca 2 cm tykke plastplater med 4 stk avstandsstykker imellom slik at sokkelen med prøven kan løftes både for hånd og med en løfteinnretning. Prøven står direkte på øvre plastplate slik at prøven ikke kan avgi vann. En sokkel av tre trekker vann ut av prøven.



Bilde 9 Perfekt blokkprøve



Bilde 10 Prøvesokkel som passer i spannet

Prøven innpakkes først i plastfolie på en slik måte at folien tetter og fester til sokkelen samtidig som den strammer. Minst 5 – 10 runder som dekker hele prøven, også toppen. Dernest et par runder aluminiumsfolie av tykk type før flere runder med plastfolie. Mer avstivning av prøven kan fås ved å legge glassfiberstrie (vegg-tapét) inn mellom folielagene. Strien klippes til og bløtes i vann. Bred pakketape kan også brukes.

Prøvens dybde angis mest nøyaktig ut fra avsluttet skjæredyp. Man regner derfra og oppover.

Lag merkelapp som legges under plastfolien, og **borkort** som også har beskrivelse av prøve kvalitet. Den som har tatt prøven bør formidle hvilke prøver som det er verdt å satse på i laboratoriet.

Voksing av prøven har vært brukt, men det krever mye ekstra arbeid. Parafinvoks må blandes med bivoks for å få seighet. Det tetter, men avstiver dårlig. Blir voksen for sprø, sprekker den og faller av. Utstyr for smelting, pass av dette og påføring av voks i lag med malerkost ansees av undertegnede ikke å svare seg i forhold til bruk av folie som er raskt, renslig og tetter og avstiver utmerket.

Etter innpakking, Bilde 11, løftes prøven med en løfteinnretning, Bilde 12, over i et **50 liter plastspann**. **Løfteinnretningen er påkrevet** fordi hender og armer får ikke plass nede i spannet ved siden av prøven når man senker prøven. Løfteinnretningen kan utformes forskjellig, men den må løfte stabilt, dvs en "krok" inn for hver 90'ende grad. Løftekrokene dreies inn og får tak inne i åpningen mellom sokkelens topp- og bunnplate. To mann løfter og tredje mann støtter prøven. Hulrommet omkring prøven fylles med bobleplast som legges ned i strimler og pakkes rundt som transportstøtte. Fuktet papir legges under lokket for å hindre uttørking. Fest lokket godt før prøven løftes. Lokket stiver av spannet. Prøven er nå klar til transport eller lagring. Må prøven lagres i felt, må den ikke kunne fryse.



Bilde 11 Innpakking av prøve



Bilde 12 Løfteinnretning med svingbare armer

4.4 *Frakt av prøver*

Transporten må være silkemyk. Forsering av grøfter, fartsdumper og rundkjøringer bør tilpasses. Forsendelse med speditører er risikabelt. Man har aldri kontroll med håndtering og lagring selv om man merker og anviser aldri så godt.

4.5 *Avslutning i felt. Sikring av borhullet*

Avslutning av boring krever at området ”rengjøres” for leire og at hullet sikres ved at det fylles. Velger man å fylle med sand eller grus kan man få et ”**vertikaldren**”. Fyllmasser kan enkelt leveres i storsekk som løftes i kran og punkteres over hullet. Betong kan pumpes til borstedet. Fyll fra bunnen. Regn minimum 1 m³ fyllmasse pr. 4 dybdemeter borhull med diameter 0,5 m. Større forbruk kan tyde på at hullet utvider seg noe som kan medføre ulemper. **Tilbakefylling av oppgravet leirmasse** vil som regel henge seg fast i veggene uten at massen når til bunns. Etter noen uker /måneder vil massene sige og hullet står igjen åpent. Man **skal ikke** anta at hullet vil ”klappe sammen” av seg selv. Det kan fortsatt stå åpent året etter og er da usikret.

4.6 *Bemanning*

Tre mann på jobben er ideelt, en maskinkjører, en som står for prøvetaking og pakking, samt en tredje mann som hjelper til på maskin og med håndtering av prøvene. To mann kan klare jobben, men det går vesentlig langsommere.

4.7 *Tidsforbruk i felt*

Nøkternt vurdert bør første arbeidsdag gå med til transport, oppstilling og boring til første prøvetakingsdyp. Trengs foringsrør brukes ekstra tid. To borhull til 12-15 m med 3-4 prøver i hvert kan ta 3 dager pluss en dag til opprydning og avslutning med

transport. Kort sagt: En uke på en standardjobb uten komplikasjoner. Maks produksjon har vært ca. 25 blokkprøver på 6 lange dager.

4.8 Fysiske begrensninger

Boringen må utføres absolutt vertikalt. Det er ingen avstivning av borstrengen under ”klemma” på riggen. Boring i skråninger begrenser seg til muligheten til oppretting av tårnet til vertikal posisjon.

Boring fra flåte har vært forsøkt. Det er svært vanskelig å holde posisjonen fast nok selv uten vind og strøm. Tidevann kompliserer ytterligere. ”Jack up” plattform bør være løsningen.

4.9 Behov for videre utviklinger av prøvetakeren

NGIs nye versjon kan forbedres særlig mht oppspenningsmekanismen, (des. 2012.)

5 Laboratorieundersøkelser

5.1 Oppbevaring av prøver

På NGI lagres prøvene i klimarom, ca 6 gr. C og 90 % fuktighet. Prøver i klimarom som er godt innpakket og lagret i plastspann med tettsittende lokk og med fuktig papir nede i spannet, antas å holde opp til ett år. Det vil være ønskelig å sammenligne prøver testet umiddelbart etter opptak mot lagrede prøver, men det er foreløpig ikke gjort.

5.2 Håndtering av blokkprøve i laboratorium

Instruksen beskriver hvorledes prøven «åpnes», deles og lagres forut for de enkelte laboratorieforsøkene. Billedserien viser hvorledes arbeidet skal utføres, men enkelte praktiske tilpasninger må alltid gjøres som følge av prøvens beskaffenhet. To personer må arbeide sammen.

5.3 Lagring

Blokkprøver, som i tidligere år ankom NGI, sto på en sokkel og var pakket i flere lag plastfolie, aluminiumsfolie, tape og i blant også parafinvoks blandet med bivoks. Fra 2009 er alle blokkprøvene satt ned i 50 liters plastspann i tillegg til at de er pakket, transportert og lagret som beskrevet tidligere. Prøven skal før og etter åpning og oppdeling lagres i kjølerom. Etter oppdeling er prøvedelene pakket som den opprinnelige prøven.

5.4 Utpakking

Voks og folier snittes horisontalt av prøven ca. 5-6 cm fra toppen. Ta ikke bort mer voks og folie enn strengt nødvendig fordi dette støtter prøven. De øverste og

nederste 5-6 cm av prøven regnes som forstyrret og benyttes ikke til annet enn klassifikasjonsforsøk (Bilde 13 - 14).



Bilde 13



Bilde 14

5.5 Fjerning av forstyrret materiale i toppen av prøven

NGIs ”oppdelingsbord”, spesielt beregnet til åpning og deling av blokkprøver, benyttes i det videre arbeid. ”Bordet” plasseres over prøven, og plasseres tett inntil den siden av prøven som det skal skjæres, og senere skyves mot. ”Bordet” låses i denne posisjonen med en snekkerklemme i bakkant av ”bordet”. Skjæreplanet tilpasses ønsket høyde, og et løst brett, som den avskårede prøven kan skyves/dreies bort på, legges i sporet. Juster slik at det ikke blir høydeforskjell i forhold til skjæreplanet. Alle flatene som prøven skal forskyves langs, smøres inn med rikelige mengder silikonolje (Bilde 15).



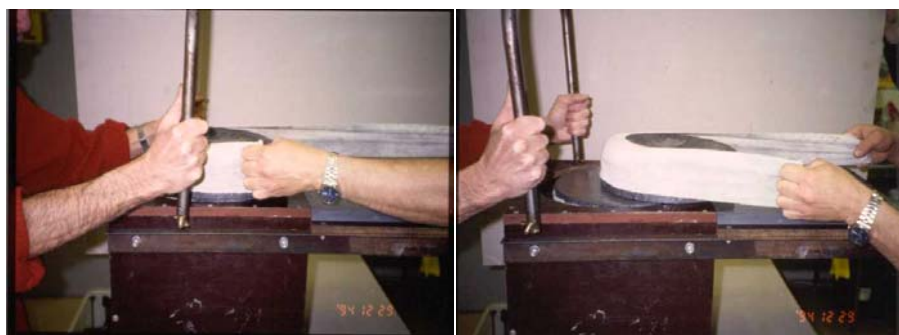
Bilde 15

Hvis det blir lengre opphold i prosedyren, dekk til prøveflatene med plastfolie for å hindre uttørring. Tidligere ble det praktisert å legge en pianotråd rundt prøven som da avskjæres ved «stranglering» (Bilde 16). Denne praksisen er stort sett forlatt. Man skjærer i stedet med en stor trådsag mot den siden som har støtte fra ”oppdelingsbordet”.



Bilde 16

Deretter brukes den store trådsagen som føres fram og tilbake langs avskjæringsplanet, samtidig som man med et sterkt, bredt papirbånd lagt rundt nederst på prøven, trekker og samtidig roterer den avskårede prøven over på det løse brettet. (Papirbånd kan lages av sterkt tørkepapir uten skjøter fra dispenser.) Bruk ikke hendene på prøven, og bruk mye silikonolje (Bilde 17 - 18).



Bilde 17

Bilde 18

5.6 Utskjæring av prøvens hoveddel

Fjern voks og folier ned til det nivå hvor prøven skal kuttes og tilpass prøvens høyde inne i rammen ved å bygge opp under prøven på en stabil måte (Bilde 19).



Bilde 19

Prøven kuttes på samme måte som i over enten, ved «strangulering» eller ved å skjære med trådsaga mot den siden som har støtte mot ”oppdelingsbordet”. Prøven trekkes over til brettet på en silikonoljefilm samtidig som det roteres litt ved bruk av et sterkt, bredt papirbånd nederst på prøven og samtidig kutting fram og tilbake med trådsaga som tidligere forklart. (bilde 20 - 21).



Bilde 20

Bilde 21

5.7 Oppdeling av prøven i segmenter

Den videre oppdelingen er avhengig av de planlagte forsøk. Kontakt prosjektleder for å få detaljer om prøvehøyder og diametre slik at man kan bestemme antall segmenter som prøven skal deles opp i. (I de fleste tilfelle vil man kassere minst 5 cm av prøven i topp og bunn pga. forstyrrelse. Det gir ca. 13-25 cm «god» prøve som først deles i segmenter før disse deles i høyden. Prøven bør deles i denne rekkefølgen fordi det kan være svært vanskelig å skjære tynne skiver (mindre enn 10 cm) av hovedprøven uten å deformere den.) Trekk den avskårede hovedprøven over på et Brett med kryssspor i bunn som trådsagen kan føres ned i. Trekk prøven ved å dreie med et sterkt papirbånd som forklart over. Bruk silikonolje på brettet. Når prøven er på brettet med kryssspor i bunn, monter vertikale støtteskiner ved hjelp av tvinger (Bilde 22).



Bilde 22

Skinnene monteres midt på brettet og brukes som støtte når man fører trådsagen ned (Bilde 23).



Bilde 23

Prøven deles oftest i 4 segmenter. To mann må arbeide sammen, den ene fører trådsagen opp og ned langs skinnene, mens den andre forsiktig, men bestemt tar tak i prøvedelene og prøver og føre dem fra hverandre ved å trekke og forskyve parallelt (Bilde 24).



Bilde 24

La prøvedelene stå parallelt med ca. 1 cm avstand dersom man ønsker oppdeling i 4 segmenter. Flytt i så fall støtteskinnene 90° slik at prøven kan deles på nytt. Bruk samme teknikk. Skill de enkelte segmentene ved å trekke med klede. Bruk ikke hendene.

5.8 *Forsegling og lagring*

Prøver som ikke skal testes umiddelbart må forsegles. Bruk plastfolie innerst, dernest aluminiumsfolie og så parafinvoks med iblandet bivoks. Prøvene lagres i kjølerom med høy fuktighet. Hvis prøvene lagres i plastspann med tett lokk og fuktig papir (som ikke må komme i direkte kontakt med prøven) på innsiden av bøtta, kan man nøye seg med å tette med parafinvoks nederst på prøven eller med silikonfett og ekstra lag med plastfolie (Gladpack). Ved langtidslagring har det vært prøvd å sprøyte nitrogen inn i spannet før lokket settes på, eller fylle alle hulrom inne i spannet med bobleplast. Effekten av slike tiltak er ikke undersøkt.

5.9 *Merking av prøve*

Lag en skisse av oppdelingen i prøveåpningsarket og merk de enkelte prøvedelene med prosjektnr., boring, prøvenr., delprøvenr og eventuelt testnr.

5.10 *Utnyttelse av prøven, antall tester.*

Alle typer tester som krever høy prøve kvalitet kan utføres: ødometer, triaksialforsøk i ulike varianter og direkte enkel skjær (DSS).

Full høyde på blokkprøven, ca 37 cm, tillater at det skjæres ut opp til to, ca 13 cm høye etasjer, i midten av prøven for oppdeling til tester. Sjekk om merkelapp og borkort for prøven sier noe om det er spesielle hensyn som må tas under oppdelingen, for eksempel lagdeling, stein i prøven, sprekker og ikke minst; vurdering av prøve kvalitet. Regn minimum 5 cm fra topp og bunn av prøven som forstyrret, og del prøven som anvist i kapittelet over. Ulik oppdelingsgeometri kan velges og tilpasses prøveprogrammet. Forslag til tester og prøvemål er vist i Tabell 1. **For parameterstudier kan et stort antall parallellprøver oppnås.**

Tabell 1 Forslag til tester og prøvemål

	Prøvehøyde (mm)	Diameter (mm)	Areal (cm ²)
Triaksial test	108	54	23
	144	72	40
	160	80	50
	200	100	78,5
Ødometer	20	50,6	20
	20	66,5	35
	20	80	50
Skjær(DSS)	16	66,5	35
	16	50,6	20
	16	80	50
	16	11,5	103

6 Resultater fra laboratorieundersøkelser

6.1 Generelt

Dette kapittelet består i det alt vesentligste av en oversettelse til norsk av artikkelen ”Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high quality block samples” av Kjell Karlsrud og Francisco Gabriel Hernandez-Martinez. Dette utgjør artikkelen fra Laurits Bjerrums minneforedrag nr. 23, holdt av Kjell Karlsrud 26. november 2010, og som er sendt til Canadian Geotechnical Journal for publisering.

6.2 Prøvekvalitet

Forstyrrelser i forbindelse med prøvetaking er ikke kun forårsaket av prøvetakingen i seg selv, men også av uunngåelige endringer i effektivspenninger og forstyrrelser på grunn av trimming og håndtering av prøver som skal analyseres (for eksempel Berre m.fl., 1969; La Rochelle og Lefebvre, 1970; Lunne m.fl., 1998; Ladd og DeGroot, 2003). Fra en leirprøve fjernes fra dens in-situ tilstand og monteres i et testapparat vil den gjennomgå endringer i spenninger, vanninnhold og struktur, normalt definert som ”prøveforstyrrelser”. Prøveforstyrrelser har en vesentlig effekt på spennings-/ tøyningsoppførselen og fastheten av jorden sammenlignet med dens in-situ egenskaper, som diskutert tidlig av Hvorslev (1949) og Bjerrum (1954). Studier relatert til effekten av prøveforstyrrelser av udrenerte egenskaper fortsatte utover 1960-årene (Skempton og Sowa, 1963; Ladd og Lambe, 1963; og Noorany og Seed, 1965), og har vært et aktuelt tema i årenes løp. Berre m.fl. (1969) sammenlignet resultater av ødometerforsøk av norske bløte marine leirer tatt med hhv. NGIs nye 95 mm prøvetaker og NGIs 54 mm stempelprøvetaker. De konkluderte med at forkonsolideringsspenningen fra ødometerforsøk fra 95 mm og 54 mm prøver ikke var særlig forskjellige, bortsett fra at spredningen av resultater var høyere for 54 mm prøvene.

Lignede resultater ble rapportert av La Rochelle og Lefebvre (1970). De sammenlignet udrenert styrke og modul fra enaksiale trykktester på leire tatt med blokkprøver og med NGIs 54 mm prøvetaker. Resultatene viste at både fasthet og stivhet fra 54 mm prøver var omtrent halvparten sammenlignet med blokkprøver. Fra tester av bløt marin leire i Ottawa-regionen, fant Bozosuk (1970) ut at prekonsolideringsspenningen fra 124 mm stempelprøvetaker (ved bruk av Osterberg-prøvetaker) var omtrent 40 % høyere enn ved 54 mm prøver. Udrenert fasthet fra CAUC tester var imidlertid overraskende like, selv om aksial tøyning ved brudd var mindre for 124 mm prøver.

I 1970 ble det utført en studie av en serie 95 mm prøver ved NGI med tanke på hvilke poretrykk som genereres i prøven i løpet av og etter at prøvesylinderen ble presset ned i jorden (Schjetne, 1971). Disse viste betydelige poreovertrykk ved nedpressing, og kun et lite negativt poretrykk i det prøven ble trukket opp, som dissiperte raskt. Schjetne konkluderte at en sone nærmest sylinderveggen blir betydelig forstyrret og får volumendringer og økt fasthet dersom prøvene lagres en

viss tid forut for testingen. Han anbefalte derfor at prøvene bør lagres i så kort tid som mulig før testing.

For å følge opp hans arbeid, tok NGI i 1970 en serie 95 mm prøver i et kvikkleireområde ved Ellingsrud i Oslo. Prøvene ble tatt i en dybde på omtrent 9 og 13 m. To prøver fra hver dybde ble bygget inn i en triaksialcelle på stedet umiddelbart etter at prøvene ble tatt. I tillegg ble to prøver fra hver dybde fraktet til NGIs laboratorium, skjøvet ut og testet 2-3 dager etter prøvetakingen. Bjerrum (1973) presenterte to sammenlignbare tester fra omtrent ni meters dybde; alle resultatene er utfyllende rapportert i NGI (1982). Resultatene bekreftet at lagring av prøver har en stor effekt på udrenert fasthet. Dette viste seg også ved mindre volumendringer under konsolidering til in-situ spenninger før udrenert skjær for prøvene som ble bygget inn på prøvestedet (1.3 %), sammenlignet med de som ble pakket inn 2 – 3 dager senere (2 – 4 %). Prøvene som ble tatt på 13 meters dybde ble imidlertid ikke vellykket, da alle prøvene (både de som ble pakket inn på området og senere i laboratoriet) gikk til brudd ved konsolidering til in-situ effektivspenninger. Dette viser at selv 95 mm prøver har sine begrensninger i kvikkleirer.

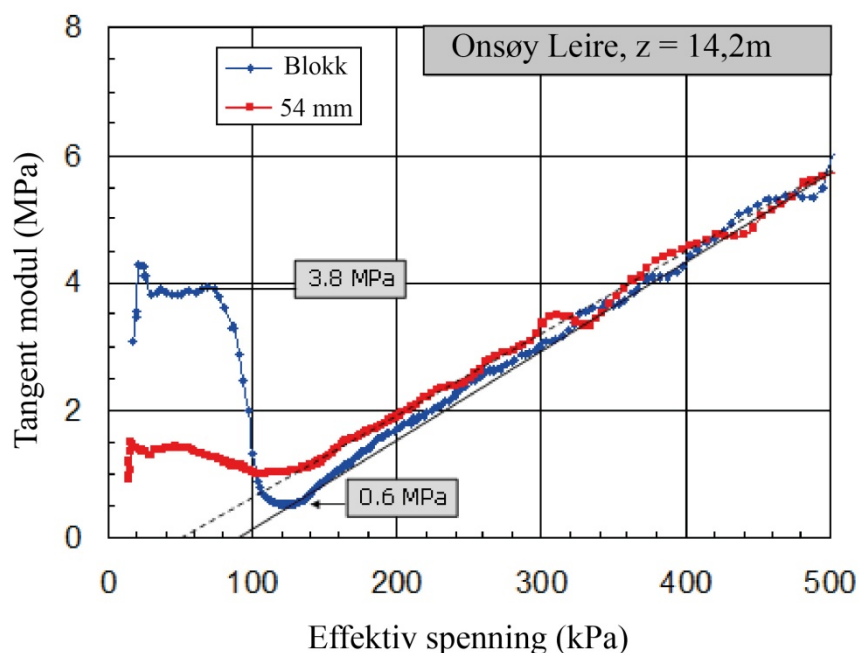
Lefebvre og Poulin (1979) viste at kvaliteten på prøvene øker med diameteren på prøveutstyret som blir brukt. Studiene deres viser imidlertid også at selv prøvetakere med stor diameter som var tilgjengelige på slutten av 70-årene, ødela strukturen på leirene i Øst-Canada. For å oppnå prøver av høy kvalitet, utviklet derfor Lefebvre og Poulin noe de kalte for "Sherbrooke blokkprøvetaker". Tester og sammenligninger gjort av Lefebvre og Poulin (1979) indikerte at blokkprøvetakeren produserte prøver av veldig høy kvalitet. NGI ble introdusert for blokkprøvetakeren i forbindelse med designkriterier for dammer på bløt og sensitiv leire i Quebec i Canada. Blokkprøver ble sendt til NGI i 1977 for testing. Selv om prøvene inneholdt sensitiv leire, var resultatene meget gode. Dette viste seg ved lave bruddtøyninger i triaksial- og DSS-tester, og i tillegg meget tydelig overgang til økte volumendringer ved spenninger over prekonsolideringsspenningen i ødometerterter (Karlsrud m.fl., 1984). På grunnlag av disse overlegne prøveresultatene, ønsket NGI å bruke blokkprøvetakeren i norsk leire. I 1982 ble derfor prøvetakeren lånt fra Universitetet i Sherbrooke og brukt ved tre ulike områder i Norge. Resultatene og erfaringene fra disse feltarbeidene er oppsummert av Lacasse m.fl. (1985), og sammenlignet med kvaliteten på prøver tatt opp med stempelprøvetakeren på 95 mm. De konkluderte med at kvaliteten på blokkprøver avhenger av type jord. For mager kvikkleire, resulterte blokkprøvene i 30 % høyere skjærspenning ved brudd, og fire ganger høyere E-modul enn prøver på 95 mm, men for ikke-kvikke leirer viste blokkprøver og 95 mm-prøver mer sammenlignbar fasthet og stivhet. Berre (1986, 1987) sammenlignet også massive stempelprøver med blokkprøver tatt med Sherbrooke-prøvetakeren. Han konkluderte med at muligheten for å oppnå prøver med høy kvalitet ved blokkprøvetaking er betydelig høyere sammenlignet med sylindprøver.

Da NGI ble engasjert i forbindelse med ny jernbane til Gardermoen flyplass i 1990, ble det tatt et strategisk valg med å foreslå bruk av blokkprøver i kombinasjon med CPTU-tester for å finne skjærfasthetsparametre for design av skjæringer og

fyllinger. Dette ble akseptert og var i så måte starten på NGIs kommersielle bruk av blokkprøvetakeren (Karlsrud m.fl., 1996; Hermann og Jensen, 2000). I denne sammenheng kjøpte NGI en prøvetaker fra Universitetet i Sherbrooke, og fikk de kommersielle rettighetene til å fabrikere og selge prøvetakere til andre interessenter. Så langt har NGI tatt blokkprøver ved 23 ulike områder til dybder på maksimum 22 meter. Noen generelle erfaringer og observasjoner kan oppsummeres som følger:

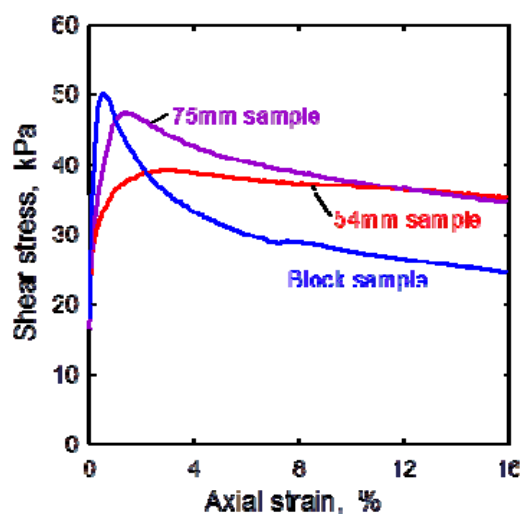
- i) CRS ødometertester og CAUC triaksialtester viser blokkprøvers overlegenhet sammenlignet med ordinære stempelprøver på 54 mm.
- ii) Prøvekvaliteten reduseres normalt ved avtagende plastisitet, økt prøvedybde og sensitivitet (Karlsrud, 1991; Lunne m.fl., 1997; Karlsrud m.fl., 2005).
- iii) Effekten av prøveforstyrrelser er særlig dramatisk for leirer med lav plastisitet (Lunne m.fl., 1997).

Lunne m.fl. (2006) og Lunne og Long (2006) har studert og sammenlignet virkningen av prøveforstyrrelser observert på blokkprøver, sammenlignet med stempelprøver på 54 mm og 75 mm, ved bruk av blokkprøver fra 12 av områdene nevnt i dette studiet. Dette bekrefter at blokkprøver generelt viser overlegen kvalitet sammenlignet med stempelprøver på 54 mm, med stempelprøver på 75 mm et sted midt mellom disse to. Som eksempel på dette viser Figur 1 en direkte sammenligning mellom tangent modul vs. aksial spenning fra CRS ødometertester på blokkprøve og stempelprøve på 54 mm skaffet ved Onsøy.



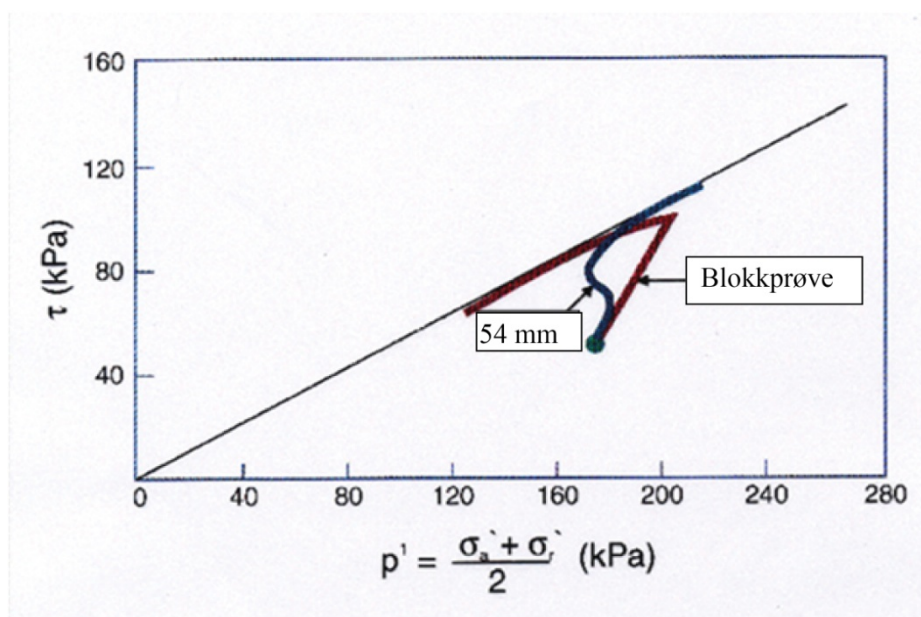
Figur 1 Eksempel på resultater fra ødometertester vs. testresultater fra blokkprøver på 54 mm (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Den typiske virkningen på prøveforstyrrelser illustrert her er: i) En betydelig reduksjon i initiell tangentmodul, M_o , ved opplasting til prekonsolideringsspenningen, ii) En økning i minimum tangentmodul før modulen igjen øker (over p_c'), iii) En økning i tangentmodul når spenningsnivået øker inn i jomfruspenningsområdet. Grunnen til at forstyrrede 54 mm prøver får økt minimumsstivhet ved p_c' sammenlignet med blokkprøver, ligger i den relativt store volumendringen prøven har fått frem til dette punkt. Denne volumendringen gir en tettere lagring og følgelig høyere stivhet. Figur 2 viser en lignende sammenligning av prøveforstyrrelser på resultater av CAUC triaksialforsøk på Onsøy leire.



Figur 2 Eksempel på resultater fra triakstester på blokkprøver vs. prøver på 75 mm og 54 mm, Onsøy (Lunne m.fl., 1997)

For denne typen leire er prøveforstyrrelsene som følger: i) betydelig reduksjon av maks udrenert fasthet, ii) en betydelig økning av aksial tøyning ved brudd, og iii) en økning av skjærspenninger ved store tøyninger. Forklaringen på at skjærspenninger ved tøyninger ut over tøyning ved maks peak er større for 54 mm enn ved blokkprøver er, som for CRS-resultatene, en større volumendring frem til in-situ konsolideringsspenninger for prøver på 54 mm, noe som gir en tettere lagring. For magre siltige leirer vil prøveforstyrrelser forandre oppførselen dramatisk, fra en kontraktant og sprø bruddoppførsel ved god prøve kvalitet, til dilatant og seig bruddoppførsel ved dårlig prøve kvalitet. Et typisk eksempel på dette er vist i Figur 3.



Figur 3 Sammenligning av spenningssti for prøver med god og dårlig prøve-kvalitet ved CAUC triaksforsøk på mager NC-leire (etter Karlsruud og Hernandez-Martinez, 2013)

Innvirkningen av prøve-kvaliteten på udrenert fasthet er vanligvis mindre utpreget i passive treaksforsøk (CAUE) og DSS-tester, enn i aktive treaksforsøk (CAUC). Grunnen til dette er at spenningsrotasjonen som oppstår under slike forsøk synes å gradvis ødelegge den originale leirstrukturen. Tabell 2 gir en kvalitativ indikasjon på den relative effekten på fasthet for forskjellige bruddretninger for 54 mm stempelprøver, sammenlignet med blokkprøver av høy kvalitet.

Tabell 2 Relativ effekt på fasthet for forskjellige bruddretninger for 54 mm stempelprøver (etter Karlsruud og Hernandez-Martinez, 2013)

Type forsøk	% høyere fasthet av blokkprøve sammenlignet med prøver fra 54 mm
CAUC – Aktiv treaks	10-50
CAUE – Passiv treaks	0-10
DSS – Direkte simpel skjær	5-20

Kvaliteten på stempelprøver på 54 mm reduseres generelt med: i) økt prøvedybde, ii) økt sensitivitet, og iii) redusert vanninnhold eller plastisitetsindeks.

Andre faktorer som har betydning for kvaliteten på stempelprøver, er: detaljerte prosedyrer ved prøvetaking i felt; tykkelse og form på prøvesylindrenes egg; materialet i prøvesylindrene; transport, behandling og lagringstid av sylindrene; trimming og behandling ved preparering av prøver i laboratoriet. For videre disku-

sjon angående virkningen av prøveforstyrrelser, refereres det til Lunne m.fl. (2003 og 2006), Lunne og Long (2006), og Berre m.fl.. (2007).

6.3 Forsøkssteder

NGI har fra 1984 til 2012 tatt blokkprøver ved 23 forskjellige steder (NGI, 2012). Seksten av disse finnes innen områder med marin leire i Sør-Norge, ca. 50 km nord og 100 km sør for Oslo. Fem av områdene nord for Oslo var del av prosjektet som omhandlet ny jernbanelinje til Gardermoen flyplass i 1990-årene. Seks feltområder er lokalisert i Trøndelag nær Trondheim. Ett feltområde er lokalisert utenfor Norge ved Bothkennar vest for Edinburgh. Syv av de 23 feltområdene er referanseområder brukt av NGI til andre formål. Dette inkluderer feltområder ved Daneviksgate og Lierstranda nær Drammen, de tre feltområdene ved Onsøy nær Fredrikstad, og områdene ved Ellingsrud og Emmerstad. Området ved Bothkennar er også et forsøksområde opprettet av "Building Research Establishment" i Storbritannia. En komplett utgave av Geotechnique (VOL. XLII, Number 2, June 1992) beskriver dette feltområdet. Noen rutinedata for hvert enkelt forsøksfelt er gitt i Tabell 3.

Bestemmelsen av in-situ vertikal effektiv spenning ble i de fleste tilfeller basert på uavhengig stempelprøvetaking for å få en kontinuerlig fordeling av jordens egenvekt, kombinert med in-situ målinger av poretrykk, eller minimum observert grunnvannsnivå. Det bør nevnes at in-situ poretrykksfordeling i noen tilfeller har avveket betydelig fra hydrostatisk. Således er derfor effektivspenningene i disse tilfellene annerledes enn normalt.

Tabell 3 Typiske rutinedata fra forsøksstedene

Sted	Beskrivelse	Dybde (m)	Romvekt, γ	w (%)	I_p	I_L	S_t	OCR
Leirsund	Leire	7,5 – 16	18,7 – 19,3	31 – 34	12 – 15	-	7 - 10	3 - 6
Åråsen-Arteid bru	leire	7 – 12	18,2 – 19,1	31 – 39	17 – 18		5	2 - 4,5
Åråsen-Arteid bru	Kvikkleire	15	18,2	39	9		240	1,6
Hvalsdalen	Forvitret leire	4	18,9	35	14		13	6,5
Åråsen	leire	7 – 14	18,5	37 – 38	12		20	4,4 - 5
Eidsvoll	leire	5,5 – 15	19,1 – 19,4	28 – 32	13 - 19	0,4 - 0,6	2 - 5	1,9 - 2,4
Eidsvoll	leire	10-13	19,6 – 20,1	24 - 28	13 - 14	0,5	2 - 4	4,4 - 5
Glava (Stjørdal)	leire	5,6	19,2	31	17	0,7	7	4,4
Lierstranda	leire	6 – 22	18,0 – 19,0	33 – 42	14 - 20	0,9 - 1,4	7 - 14	1,0 - 2,4
Bothkennar	leire	6,5 – 8	15,2 – 16,0	50 – 59	-	-	-	1,9 - 2,0
Emmerstad	Kvikkleire	3,5 – 6	-	42 – 57	-	-	-	2,5 - 5,3
Ellingsrud	Kvikkleire	8 – 12	-	35 – 39	5,5 - 6,4	2,3 - 3,1		1,4 - 1,8
Onsøy	leire	6 – 14	16,0 – 16,1	62 – 70	36 - 42	0,8 - 1,1	5	1,4 - 1,7
Nykirke	kvikkleire	6 – 10	18,3 – 19,8	25 – 37	4 - 9	-	-	3,6 - 4,9
Kvenild	kvikkleire	7 – 8	17,5 – 18,9	33 – 46	-	-	-	1,1 - 3,9
Klett - Bårdshaug	kvikkleire	7 - 15	19,5 – 19,8	26 – 31	6 - 7	-	55-160	4,5 - 6,2
Klett - Bårdshaug	Leire/kvikkleire	17	19,0 – 19,3	34	8 - 13	-	10 - 77	1,8 - 1,9
Kløfta - Nybakk	leire	6 – 12	18,2 – 19,1	32 – 39	12 - 18		7 - 8	1,6 - 2,6
Kløfta - Nybakk	kvikkleire	18	18,7 – 18,8	37	8		135	1,3
Onsøy	leire	5 – 19	15,6 – 16,3	60 – 70	-	-	4-11	1,4 - 1,6
Møllenberg	Leire/siltig leire	19-20	19,2 – 19,8	27 – 33	10 - 14	0,7 - 0,9	6 - 11	1,5 - 2,0
Møllenberg	kvikkleire	18-19	17,8 – 19,1	32 - 43	7 - 8	2-3	200	1,2 - 1,5

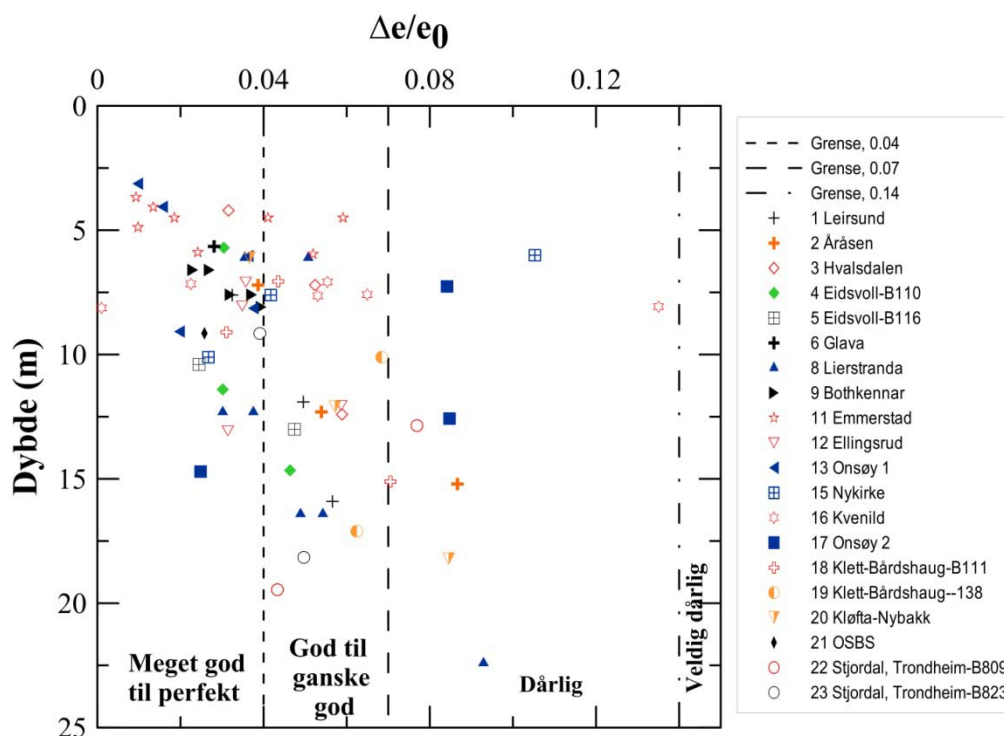
6.4 Kvalitet av blokkprøvene

Lunne m.fl. (1997) har foreslått et kriterium for vurdering av prøveforstyrrelse, definert som normalisert endring av porevolum, $\Delta e/e_0$, når et testobjekt er konsolidert til antatt in-situ effektivt spenningsnivå, se Tabell 4.

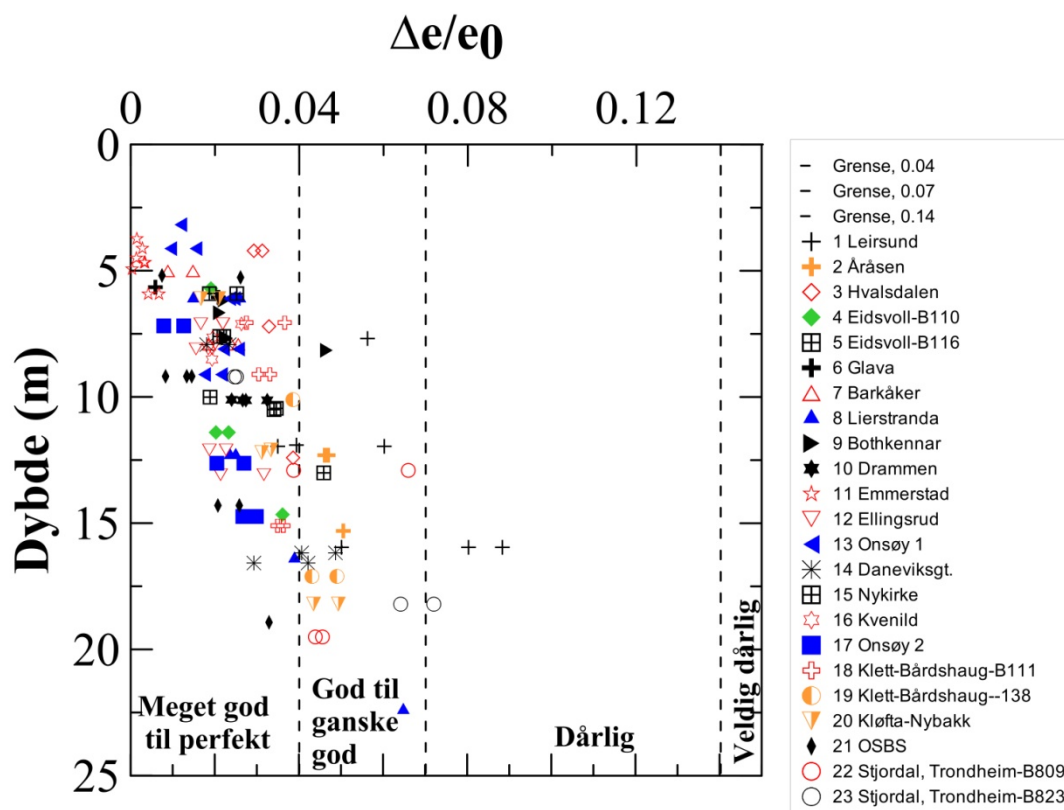
Tabell 4 Prøvekvalitet basert på normalisert endring av porevolum og modulverdier fra ødometerforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Prøvekvalitet	$\Delta e/e_0$	M_0 / M_L
Meget god til perfekt	0-0.04	>2
God til Ganske god	0.04-0.07	1.5-2
Dårlig	0.07-0.14	1-1.5
Meget dårlig	>0.14	<1

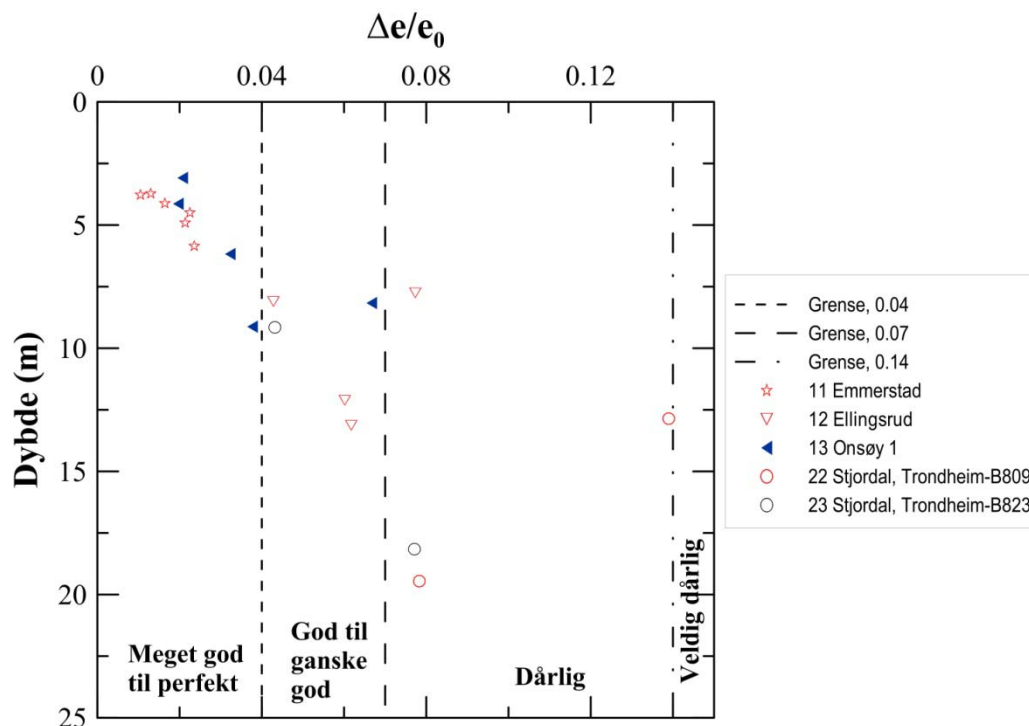
Disse $\Delta e/e_0$ -verdiene er vist i Figur 7, 8 og 9 for henholdsvis ødometertester, triaksialtester og DSS-tester.



Figur 4 Kvalitet av blokkprøver i følge Lunne m.fl. (1997), basert på voluminnhold observert på blokkprøver i ødometerforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

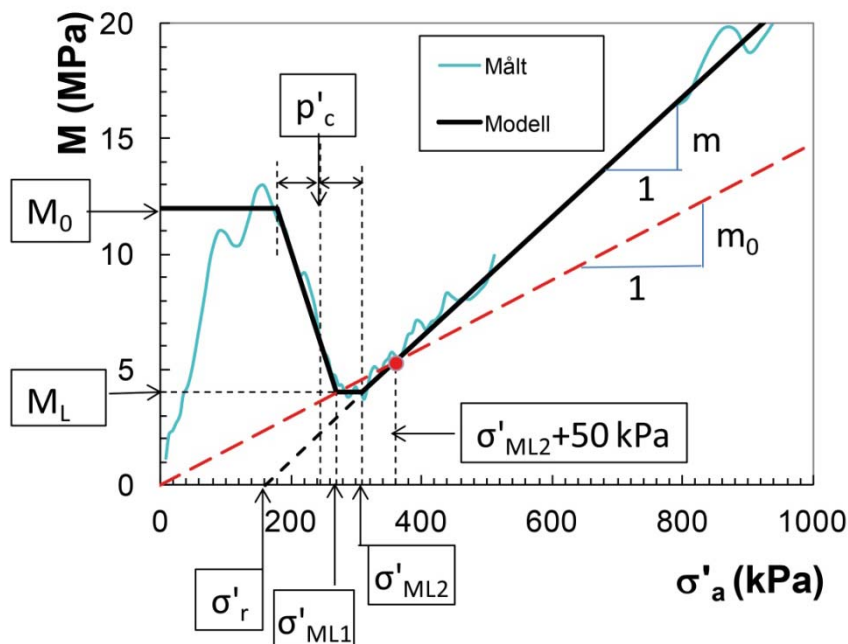


Figur 5 Kvalitet av blokkprøver i følge Lunne m.fl. (1997), basert på voluminnhold observert på blokkprøver i triaksialforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

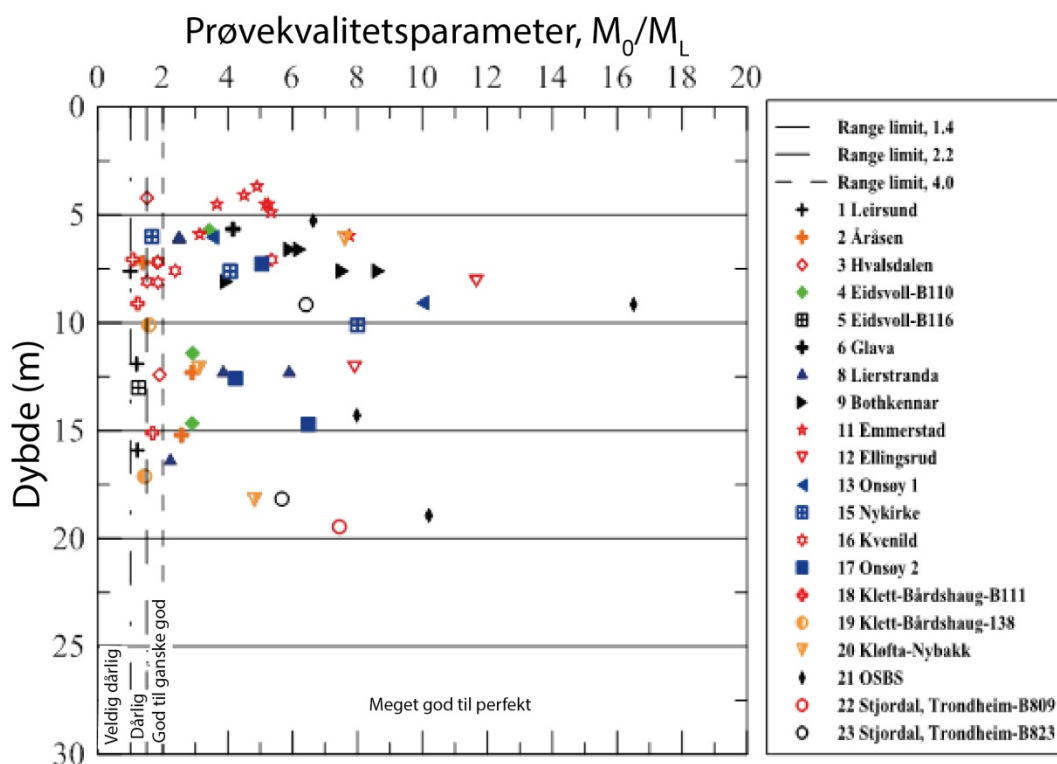


Figur 6 Kvalitet av blokkprøver i følge Lunne m.fl. (1997), basert på voluminnhold observert på blokkprøver i DSS-forsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Dataene indikerer at kvaliteten på blokkprøver generelt reduseres ved økt prøvedybde. Siden avlastningen øker ved økt prøvedybde vil volumendringene ved konsolidering til in-situ spenninger også øke. Volumendringer pga. slik avlastning antas å ha mindre effekt på prøve kvalitet enn fysiske prøveforstyrrelser. Ødometerkurvens form er en annen indikator på prøve kvalitet. En nøkkelparameter kan i så måte være forholdet mellom maksimal modul, M_0 , og minste modul, M_L , som definert i Figur 10. Forslag til definisjon iht. dette kriteriet er gitt i Tabell 4. Figur 11 viser verdier av forholdet M_0/M_L , plottet mot dybden for alle blokkprøver. Begge kriteriene i Tabell 4 har blitt vektlagt ved fastsetting av prøve kvaliteten. I behandlingen av materialet og korrelasjonene presentert senere, har alle resultater på prøver klassifisert som veldig dårlige eller dårlige blitt ekskludert.



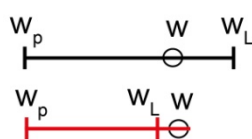
Figur 7 Definisjon av moduler fra ødometerforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)



Figur 8 Forhold mellom maksimum og minimum ødometermodul mot prøve- dybde på blokkprøver (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

6.5 Indeksparametre benyttet i korrelasjoner

Plastisitetsindeksen, I_p har i Norge ofte blitt benyttet som korrelasjonsparameter for fasthet, kompressibilitet og andre egenskaper for leire, for eksempel Bjerrum (1969 og 1973). En svakhet ved å bruke I_p , er at den er influert av leirens sensitivitet. Som illustrert i Figur 12, vil en utvasket marin leire med høy sensitivitet ha en flytegrense, w_L , som er merkbart lavere enn for andre identiske ikke-utvaskede leirer med normal sensitivitet.



$$\text{Plastisitetsindeksen } I_p = w_L - w_p$$

$$\text{Flyteindeksen } I_L = (w - w_p) / (w_L - w_p)$$

$$I_L = 0,65-0,85 \text{ for NC leire med lav } S_t$$

$$I_L \text{ blir mindre med OCR}$$

$$I_L \geq 1 \text{ for kvikkleire}$$

Figur 9 Innflytelse av høy sensitivitet på Atterbergs grenser. Svart representerer ikke-utvasket leire, rød en utvasket leire med høy sensitivitet (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Vanninnhold, i kombinasjon med spenningshistorie, er derfor antatt å gi et bedre bilde av struktur og grunnleggende egenskaper for leire enn plastisitetsindeksen, som avhenger mye av sensitiviteten. Dette er også fordi, som vist senere, at sensitiviteten overraskende nok har liten innflytelse på de egenskaper som er inkludert i denne studien. Når det kommer til udrenert fasthet og stivhet, er in-situ effektivspenninger, overkonsolideringsforhold og vanninnhold benyttet som korrelasjonsparametere.

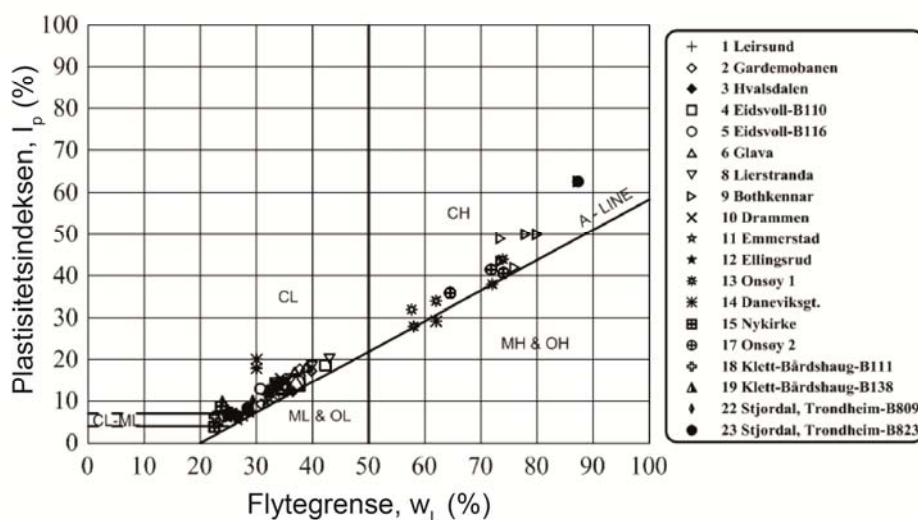
Som vist i Figur 12, er flyteindeksen I_L for leire alltid høyere enn 1.0 for utvaskede og høyt sensitive leirer. For en ikke-utvasket lite sensitiv leire, vil flytetallet normalt ligge i området $I_L = 0.8-1.0$ for normalkonsolidert leire. Den reduseres ved økt overkonsolideringsgrad. For leirer med veldig høye OCR vil plastisitetstgrensen nærme seg flytegrensen, og I_L vil være tilnærmet null. Flyteindeksen var også, lik plastisitetstallet, til å begynne med vurdert som en korrelasjonsparameter, men i forhold til bruk av vanninnhold så den ikke ut til å være bedre egnet eller kunne forklare variasjoner i målte grunnleggende parametre. I noen sammenhenger har leireinnhold μ (evt. finstoffinnhold i prosent av partikler mindre enn 0,002 mm) også blitt vurdert som korrelasjonsparameter. Men, som vist senere, er det en nær sammenheng mellom finstoffinnhold og vanninnhold for normalkonsoliderte leirer.

6.6 Laboratorieresultater

6.6.1 Generelt

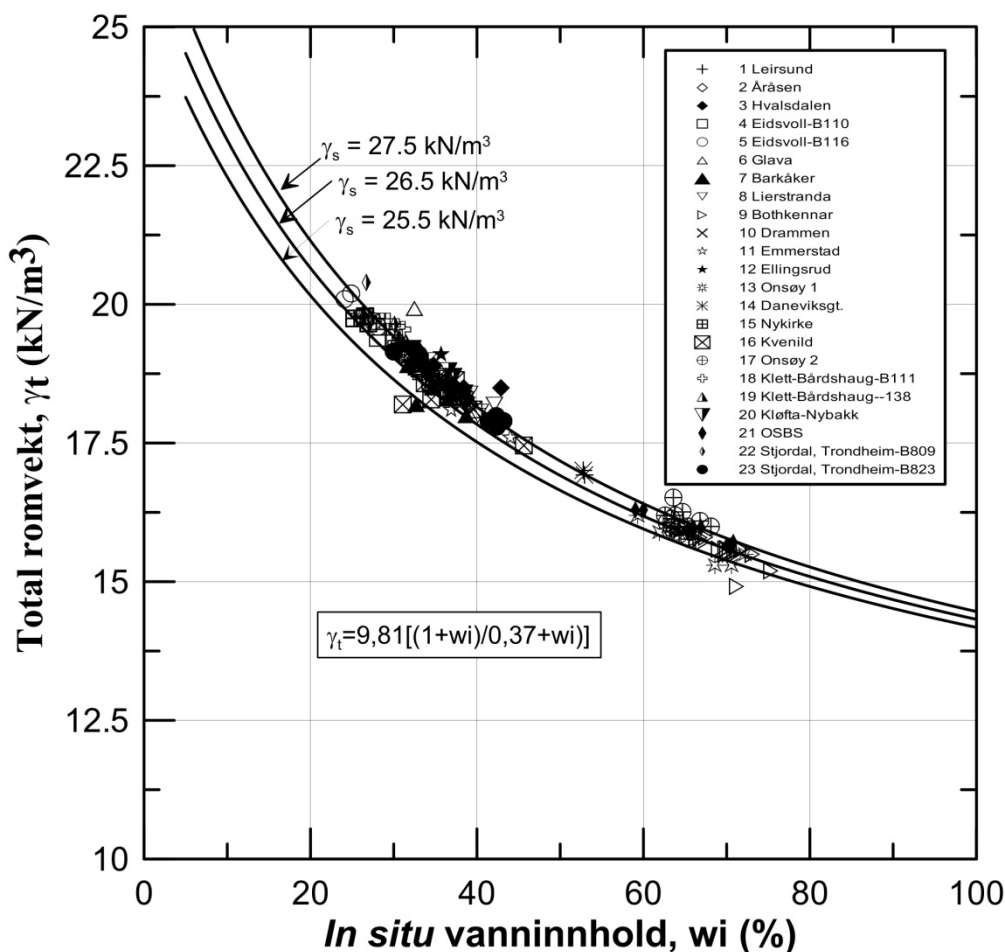
Testing av blokkprøver inneholder i alle tilfeller egenvekt, vanninnhold og plastisitetsgrense, og i de fleste tilfeller konusforsøk på uforstyrret og omrørt materiale. Sensitiviteten er primært tatt fra konusforsøk, men også vingebor ble noen steder benyttet der konusforsøk ikke var tilgjengelig. Omrørt skjærfasthet fra vingebor blir generelt høyere enn ved konusforsøk, spesielt for meget sensitive leirer. Grunnen til dette er at omrørt skjærfasthet under 0,5 kPa ikke kan leses av på vingeborutstyr. I tillegg bidrar stangfriksjon til for høye omrørte verdier. Ved åpenbare avvik har flyteindeksen vært benyttet til å definere sensitiviteten. Kornfordelingskurver er fremskaffet for 60 % av blokkprøvene. CPTU er utført ved mange av blokkprøvestedene. Data fra disse har tidligere blitt systematisert og korrelert mot udrenert skjærfasthet og OCR bestemt fra blokkprøvene, ref. Karlsrud et. al. (2005).

Figur 4 viser Atterbergs grenser i et Casagrande plastisitetsdiagram. Det meste av data tegnes over A-linjen, noe som bekrefter at leirene generelt er uorganiske.



Figur 10 Oppsummering av Atterbergs grenser for testede blokkprøver (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

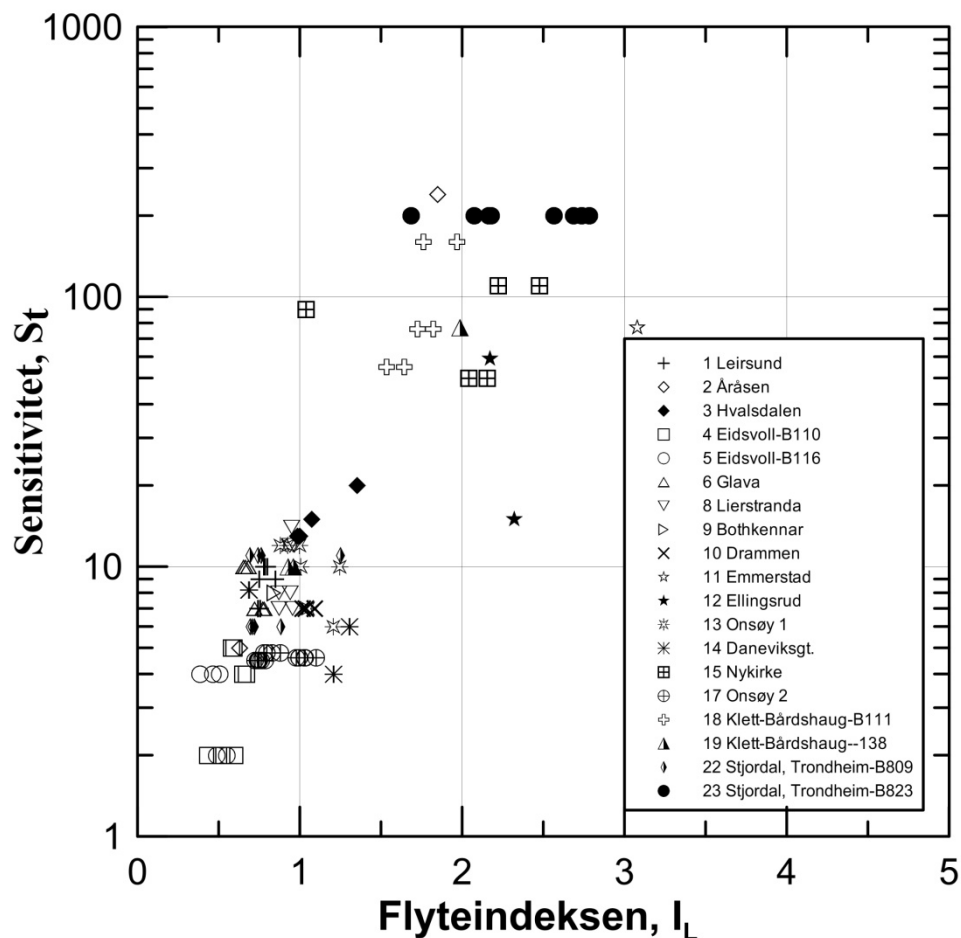
Figur 5 viser sammenheng mellom målt total egenvekt og in-situ vanninnhold for alle de 23 feltområdene i studien. Tallene følger en forventet trend i henhold til likning [1] anvendt for fullt mettet jord.



Figur 11 Oppsummering av egenvekt for blokkprøver (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

$$[1] \quad \gamma_t = 9.81 \left[\frac{1 + w_i}{\frac{1}{\rho_s} + w_i} \right]$$

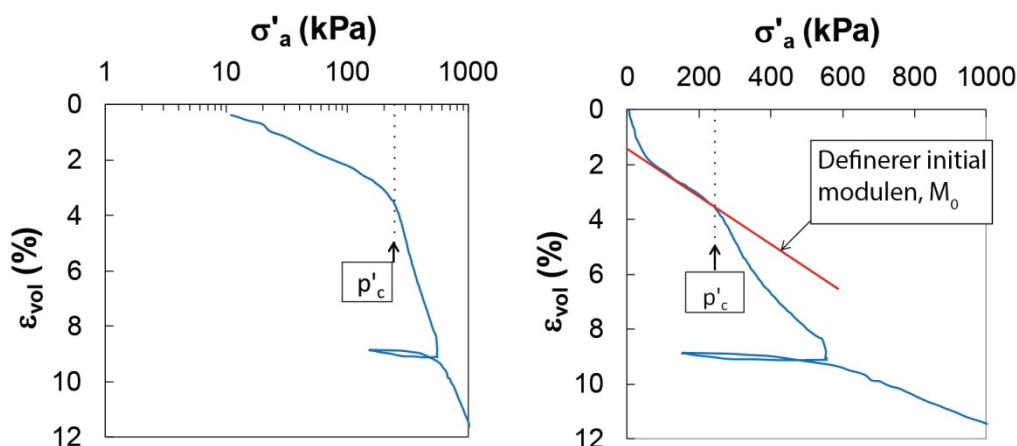
Figur 6 viser også, som forventet, at sensitiviteten er nært relatert til flyteindeksen (dataene er redusert til 19 av de 23 feltområdene). I følge Norsk Geoteknisk Forening er leire definert som veldig eller høyt sensitiv når $St > 30$, noe som i Figur 6 er realiteten når flytegrensen overskrider omtrent $LI = 1.35$. For at leire skal få betegnelsen kvikk, må omrørt skjærstyrke være lavere enn 0.5 kPa.



Figur 12 Sammenheng mellom sensitivitet og flyteindex (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

6.6.2 Ødometerforsøk

Figur 13 viser et typisk eksempel på spennings-/tøyningskurver fra et CRS-forsøk plottet i hhv. logaritmisk skala (venstre) og lineær skala (høyre). Fra den rødprykkede kurven i det lineære diagrammet, ser det ut til at belastningen utvikles lineært med spenning etter en initiell ”kontakteffekt” som fremstilt som en initiell modul, M_0 .



Figur 13 Eksempel på spennings-/tøyningskurve fra CRS forsøk på høykvalitets blokkprøve (logaritmisk skala til venstre, lineær skala til høyre) (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Den initielle “kontakteffekten” som er observert på alle prøvene er delvis et resultat av at prøven i utgangspunktet ikke er i perfekt kontakt med topp og bunnstykke. I tillegg vil det være noe leire nærmest de trimmede overflatene som i noen grad har blitt omrørt eller forstyrret. Den forstyrrede leira vil få noe ekstra volumendringer, spesielt ved lave spenninger, og bidra til ”kontakteffekten”. Figur 13 viser også at prekonsolideringsstrykket er enkelt å identifisere på disse blokkprøvene av høy kvalitet.

Tangentmodulkonseptet utviklet av Janbu (1963) er valgt for å presentere volumetrisk kompressibilitet. Figur 10 viser et eksempel på hvordan tangentmodulen utvikles med påført effektiv spenning, og hvordan nøkkelparametre har blitt definert fra hver ødometertest med tanke på prekonsolideringsspenning og modulverdier. Noen kommentarer finnes under:

- i) Prosedyren for å finne prekonsolideringsspenningen, p'_c , ble først foreslått av Karlsrud (1991). Som vi ser av Figur 10, er p'_c etter denne metoden definert som gjennomsnittet mellom spenningen der modulkurven starter å droppe i OC-området, og der den starter å øke inn i jomfruspenningsområdet. I en NGI-rapport (2005) har man sammenlignet andre metoder for å definere p'_c fra ødometertester. Dette inkluderer den klassiske Casagrande metoden (1936), Beckers (1987) energimetode, og en lineær kurvemetode som baserer seg på maksimum krumning av modulkurven. Anvendt på 15 av ødometerforsøkene i databasen, kommer Karlsruds (1991) metode omtrent likt ut som gjennomsnittet av de tre andre metoder (0,8 % høyere). Hovedgrunnen til å velge Karlsruds (1991) metode i denne studien er dens enkelhet. Videre er denne metoden også brukt for å etablere CPTU-korrelasjoner basert på blokkprøver som ble presentert av Karlsrud m.fl.. (2005).

- ii) Ved opplasting fra null til in-situ vertikal spenning, σ'_{v0} , øker modulen gradvis og ser ut til å nå et platå definert som maksimum rebelastningsmodul, M_0 (de lave initielle verdiene reflekterer trolig en "kontakteffekt" som diskutert tidligere). Modulen faller deretter mer eller mindre lineært til et minimumsnivå definert som M_L , med tilhørende spenning definert som σ'_{ML1} . Etter at denne spenningen er nådd, øker modulen lineært, men for noen leirer går modulen konstant opp til et spenningsnivå definert som σ'_{ML2} , før den øker lineært. Kurvens stigning etter dette nivået er av Janbu definert som modulaltet, m . Denne linjen definerer avskjæring på spenningsaksen som p'_r , som er den samme definisjonen brukt av Janbu (1963). For stive og forstyrrede leirer, kan p'_r være negativ.
- iii) Den klassiske jomfru kompresjonsindeksen $C_c/1+e_0$, definert ved en rett linje i et semilogaritmisk plott, er direkte relatert til modulaltet når $p'_r = 0$, gjennom likning [2].

$$[2] \quad m_0 = \frac{\ln 10}{\left(\frac{C_c}{1+e_0}\right)}$$

For korrelasjonsstudier kan det være mer hensiktsmessig å definere konsolideringsoppførselen i jomfruspenningsområdet med en m_0 -verdi med antagelsen $p'_r = 0$. Som vist i Figur 10, ble det for hver test i denne studien valgt å definere m_0 med en linje som starter i origo og passerer gjennom den observerte modulkurven med en spenning tilsvarende $\sigma'_{ML2} + 50$ kPa. Grunnen til dette valget, er at den kan representere et typisk grense for "akseptable" spennings- eller tøyingsnivå for praktiske setningsproblemer.

De fleste ødometertester i denne studien var av typen CRS (konstant tøyingshastighet), men også noen standard trinnvise forsøk med 24 timers trinntid (IL) er inkludert. På grunn virkning av kryp eller tøyingshastighet, vil prekonsolideringspenningen fra IL-tester være lavere enn for CRS-testene. En direkte sammenligning mellom CRS- og IL-tester, viser at prekonsolideringspenningen fra CRS-tester i de fleste tilfeller er 10 – 18 % høyere enn de fra IL-tester.

Vertikal permeabilitet er definert som permeabilitetskoeffisienten, k_0 ved null volumetrisk tøyning (dvs. ved in situ porevolum), som vist i Figur 14. Endring av permeabilitet ved tøyning er definert ved endringsindeksen, β_k , som vist i ligning [3]:

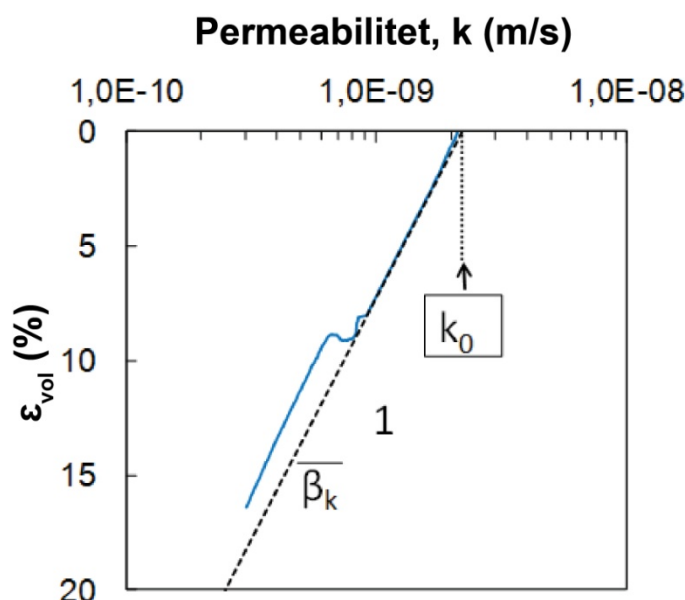
$$[3] \quad \beta_k = \frac{(\log k_1 - \log k_2)}{\Delta \epsilon_a}$$

Dette betyr at permeabiliteten i forhold til permeabiliteten ved null tøyning er gitt ved likning [4]:

$$[4] \quad \log k = \log k_0 - \beta \cdot k \cdot \varepsilon$$

Vertikal konsolideringskoeffisient, c_v , varierer også med spenningsnivå og volumforandringer. Denne variasjonen er entydig definert av sammenhengen mellom c_v , modul og permeabilitet, gitt i likning [5]. Derfor er ingen data for c_v benyttet i korrelasjonsstudiene.

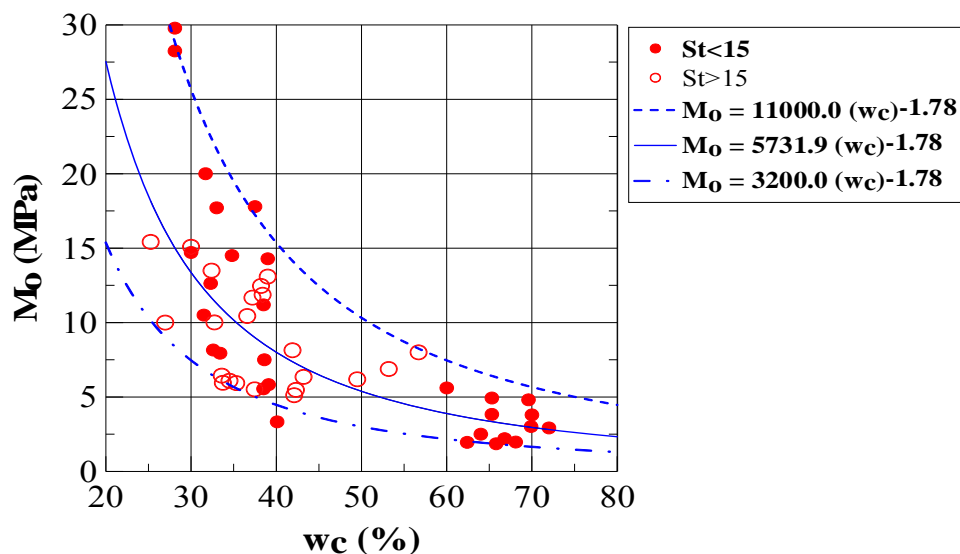
$$[5] \quad c_v = \frac{M \cdot k}{\gamma \cdot w}$$



Figur 14 Eksempel på bestemmelse av in-situ permeabilitet, k_0 , og endringsindeksen, β_k , fra CRS ødometerforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

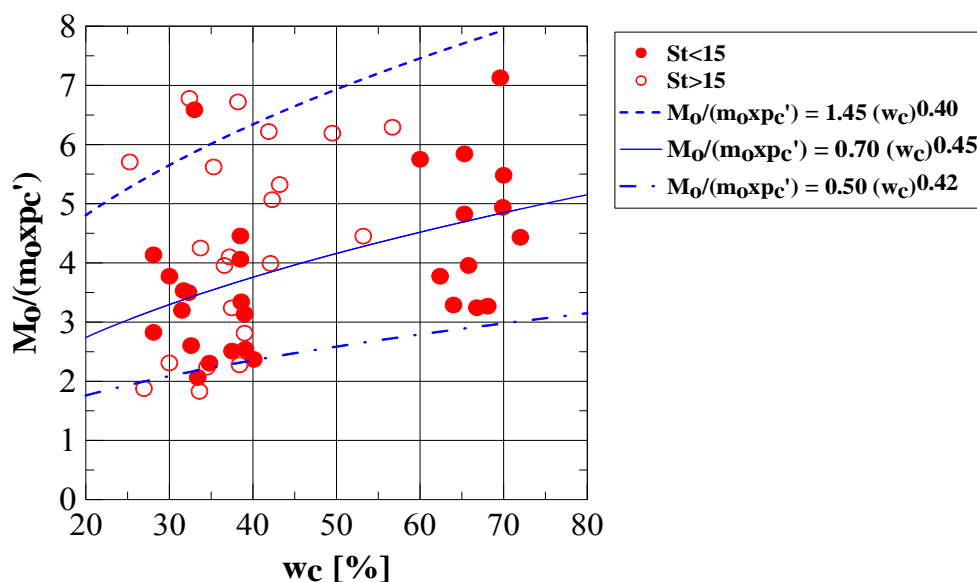
Modulkorrelasjoner

Figur 15 viser initiell rebelastningsmodul, M_0 , i forhold til vanninnhold, w_c , på prøvene i forkant av testingen. Data er delt inn i to grupper iht. sensitivitet, med hhv. $S_t < 15$ og $S_t > 15$. Det observeres at M_0 avtar med økt vanninnhold, som foreslått ved trendlinjene i Figur 15. Det ser ut til at sensitiviteten av leiren har liten eller ingen innvirkning på M_0 -verdiene.



Figur 15 Rebelastningsmodul, M_0 in forhold til vanninnhold, w_c (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Ødometertester på kunstig overkonsolidert leire viser at det er en nær sammenheng mellom initiell rebelastningsmodul, M_0 , og modultallet, m_0 . Figur 16 viser normale verdier av $M_0/m_0 \cdot p'_c$ som funksjon av vanninnhold, w_c . Dette normaliserte modulforholdet varierer mellom 2 og 7, og synes å øke med vanninnholdet. De sensitive leirene sammenfaller også i dette tilfellet med de ikke-sensitive.

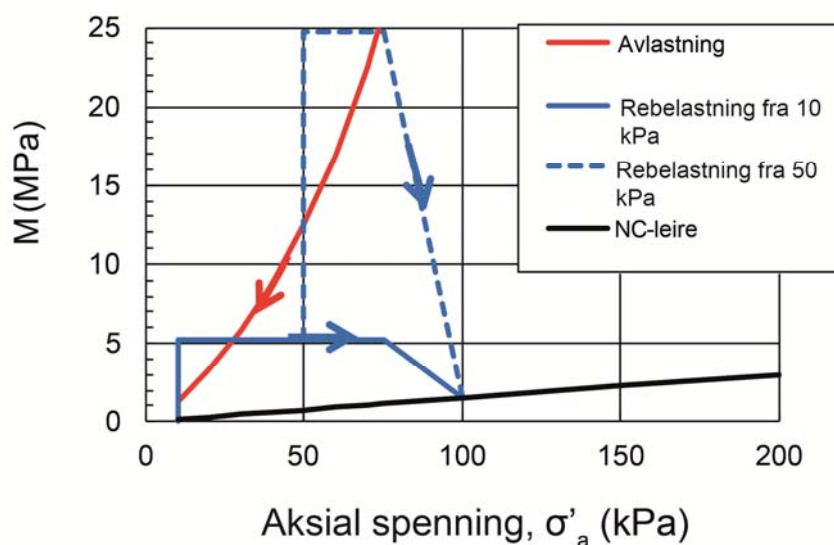


Figur 16 Normalisert rebelastningsmodul i forhold til vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Det er mulig at de laveste normaliserte verdiene av $M_0/m_0 \cdot p'_c$ reflekterer noe prøveforstyrrelser, som diskutert tidligere. Erfaringer viser at siltige lavplastiske leirer er

mer utsatt for forstyrrelser enn plastiske leirer med høyt vanninnhold, noe som delvis kan forklare tendensen til økning i normalisert $M_0/m_0 \cdot p'_c$ med økt vanninnhold.

En detaljert studie av avlastnings- og rebelastningsmodul foretatt på kunstig overkonsolidert leire fra Bjørvika (NGI, 2003), viste at avlastnings- og rebelastningsmodul i stor grad avhenger av avlastningsnivået. Figur 17 viser et idealisert eksempel på hvordan tangent modul avtar dramatisk under avlastning (rød kurve) for leirprøver prekonsolidert til 100kPa.

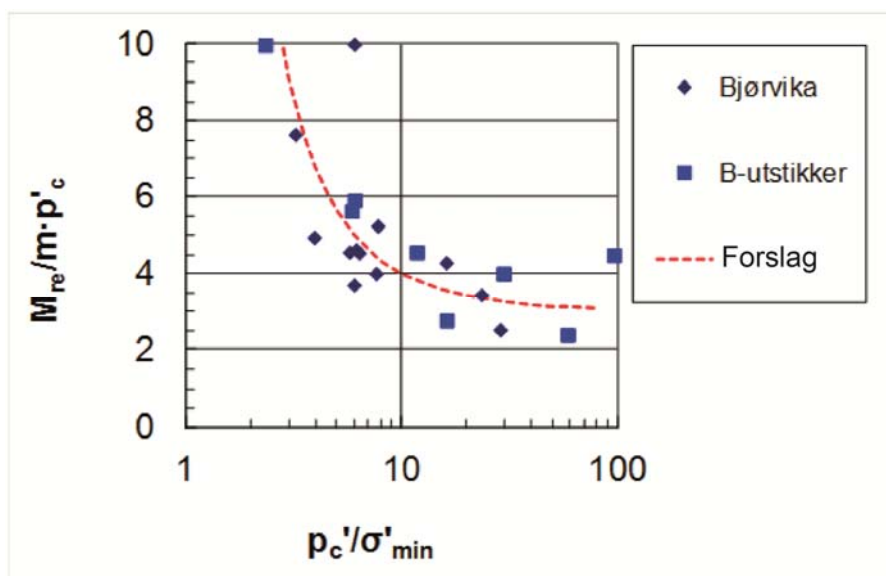


Figur 17 Illustrasjon på hvordan tangent avlastnings- og rebelastningsmodul avhenger av avlastningsnivået (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figuren viser videre at rebelastningsmodulen er mye mindre for prøver som har blitt avlastet til 10 kPa, sammenlignet med en avlastet til 50 kPa. På basis av disse testene, ble det foreslått at rebelastningsstivhet, M_{re} , kunne defineres med uttrykket vist i likning [6].

$$[6] \quad M_{re} = m \cdot p'_c \cdot \left(a + \left(\frac{b}{\left(\frac{p'_c}{\sigma'_{min}} - 1 \right)^n} \right) \right)$$

For leiren i Bjørvika passet konstantene $a=3$, $b=14$ and $n=1.2$ bra med data vist i Figur 18.



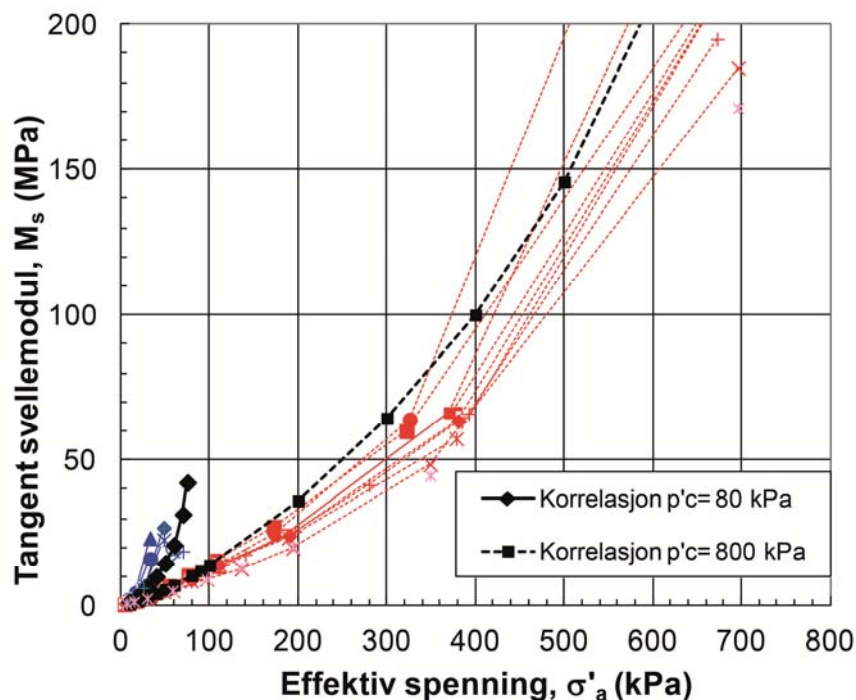
Figur 18 Rebelastningsmodulforholdet utviklet fra avlastning- og rebelastningstester på kunstig overkonsolidert leire fra Bjørvika (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Normaliserte verdier av $M_{re}/m_0 \cdot p'_c$ i Figur 18 viser i størrelsesorden de samme verdier som $M_0/m_0 \cdot p'_c$ i Figur 16. Et problem ved ødometertester er imidlertid å vite den faktiske indre effektivspenning som prøvene har blitt avlastet til, σ'_{min} , forut for belastning i ødometeret. For et virkelig tilfelle er det derfor foreslått å bruke likning [6] som basis for å definere in-situ initiell rebelastningsmodul ved å sette inn σ'_{v0} for σ'_{min} .

Figur 19 viser lignende data på svellemodulen (avlastning) på kunstig overkonsoliderte prøver av leire fra Bjørvika, prekonsolidert til en spenning på hhv. 80 kPa (tykke blå linjer) og 800 kPa (rødprikkede linjer).

På dette grunnlaget ble det foreslått (NGI, 2003) en sammenheng for svellemodulen som vist i likning [7].

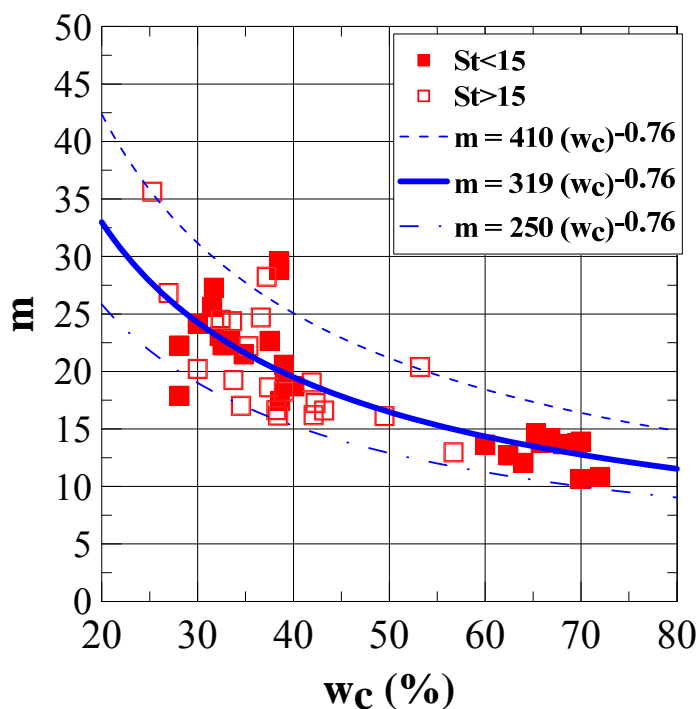
$$[7] \quad M_s = m_s \cdot \sigma' \cdot \left(\frac{\sigma'}{p'_c - \sigma'_a} \right)^n$$



Figur 19 Tangent svellemodul målt på kunstig overkonsolidert leire fra Bjørvika (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

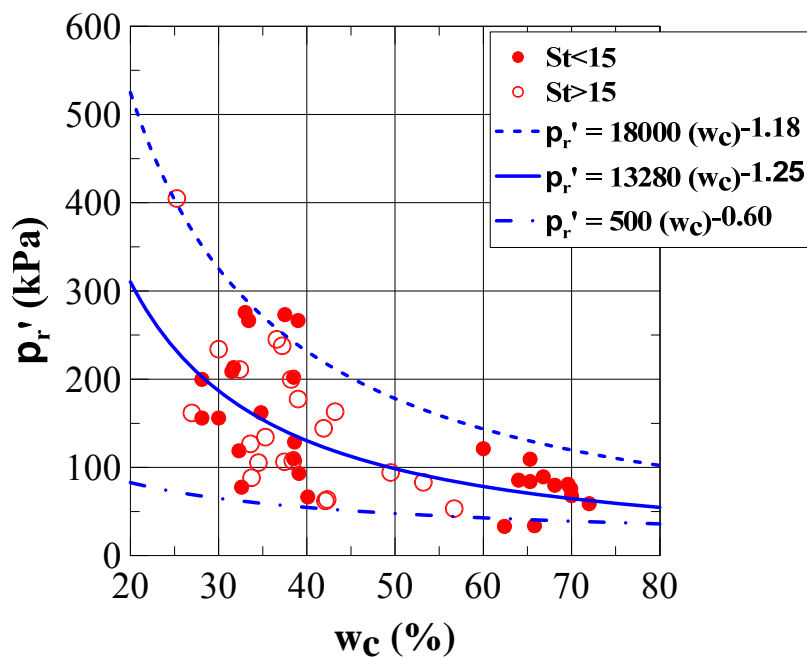
De beste kurvetilpassingsparametere i dette tilfellet var $m_s = 200$ and $n = 0.3$. Som vi ser av Figur 19, er svellemodulen meget høy ved starten av avlastningen. For små avlastningsnivå hadde prøvene fremdeles en kryprelatert volumreduksjon heller enn startende svelling. Dette skyldes, som forventet, relativt kort (1 dag) konsolideringstid for maksimum spenning før avlastningen.

Ødometertester på blokkprøver har i de fleste tilfeller inkludert en avlastnings- og rebelastningscyklus, men ingen forsøk har så langt blitt gjort på å etablere en avlastnings- (svelle) og rebelastningskoeffisient (definert ved likning 6 og 7) for hver prøve. Dette vil kreve avlastnings- og rebelastningscyklus fra forskjellige spenningsnivåer, og ikke bare én. Leiren fra Bjørvika har imidlertid et vanninnhold på omtrent 40 – 45 %, noe som er typisk gjennomsnittlig vanninnhold for blokkprøvene som er testet. Koeffisienten som er bestemt for Bjørvika-leiren kan i så måte være en rimelig representativ gjennomsnittsverdi. Figur 20 viser verdier for modultall, m (som definert i Figur 10) som funksjon av vanninnhold i %. Modultallet avtar som forventet med naturlig vanninnhold, men det er betydelig spredning. Spredningen for et gitt vanninnhold er ± 25 %. Det er tilsynelatende ingen påvirkning av sensitivitet på modultallet. Merk at modultall, m , for en spesifikk prøve er knyttet til en spesifikt referansespenning σ_r' , som vist i Figur 10.



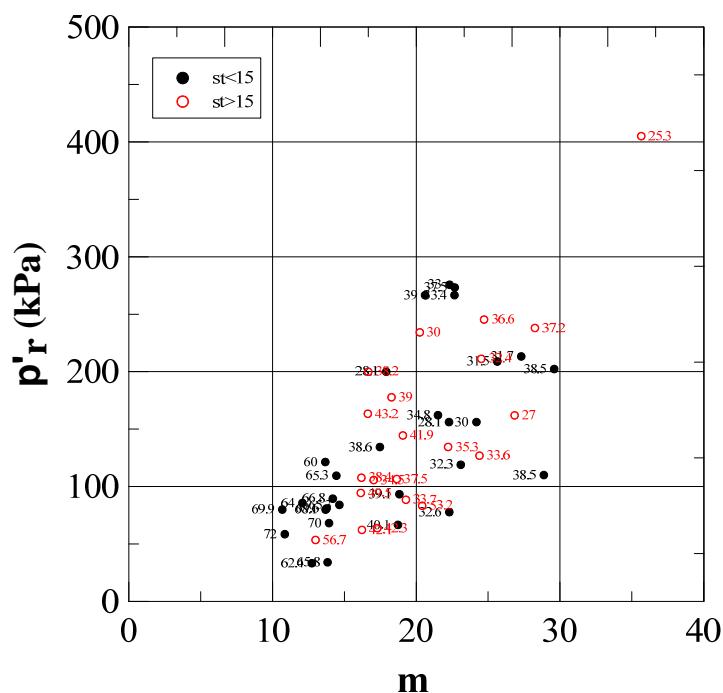
Figur 20 Modultall, m , mot vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 21 viser målte verdier av p_r' som funksjon av vanninnhold i %. Det ser ut til at også p_r' avtar med økt vanninnhold, og mer overraskende, det ser heller ikke ut til at den avhenger av sensitivitet.



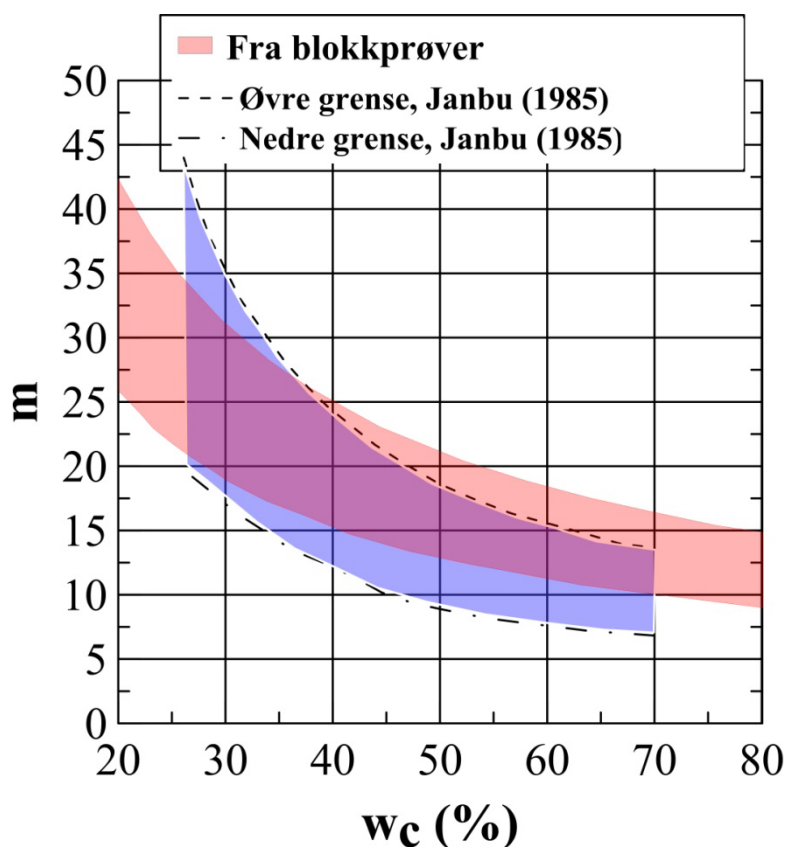
Figur 21 Referansespenning, p_r' , mot vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Et forsøk ble gjort i Figur 22 på direkte å korrelere verdiene av m , p_r' og vanninnhold. Som forventet ut i fra Figur 20 og Figur 21 er m og p_r' er nært knyttet til hverandre, og indikerer økte verdier av p_r' med økt modultall, m . Spredningen er fortsatt stort, også når det kommer til innflytelsen av vanninnhold.



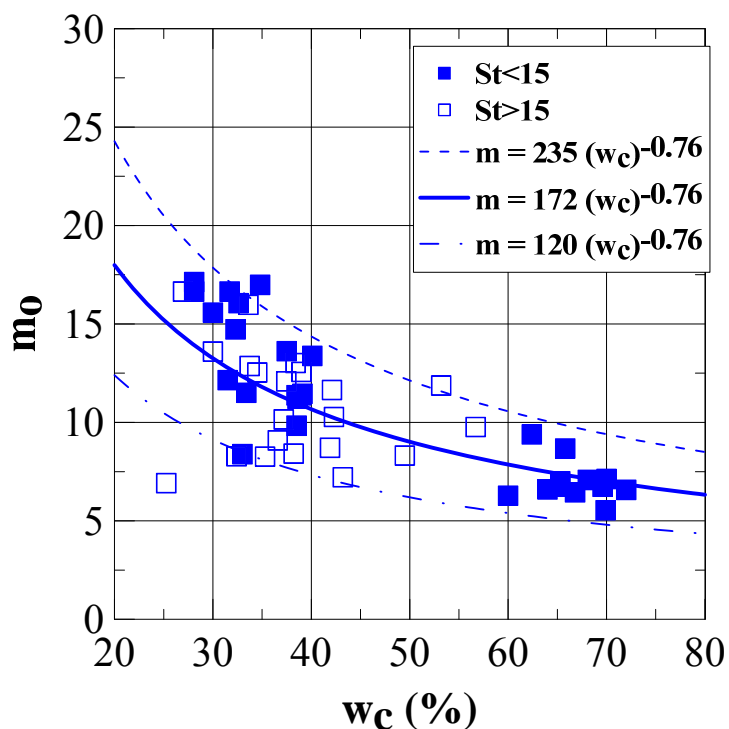
Figur 22 Kombinert korrelasjon mellom m og p'_r i forhold til vanninnhold (angitt pr. punkt) (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 23 sammenligner m -verdier fra Figur 20 med et typisk variasjonsområde foreslått av Janbu (1985). Janbus data var basert på resultater fra tradisjonell prøvetaking, hvilket indikerer at data er påvirket av prøveforstyrrelser. Videre er det heller ikke uttrykt om Janbu (1985) anslo p'_r -verdier i tilknytning til m -verdiene, eller om modullinjer ble tilpasset gjennom $p'_r=0$. Det er viktig å merke seg at ett resultat av prøveforstyrrelser er at m - og p'_r -verdier avtar med økt forstyrrelse.

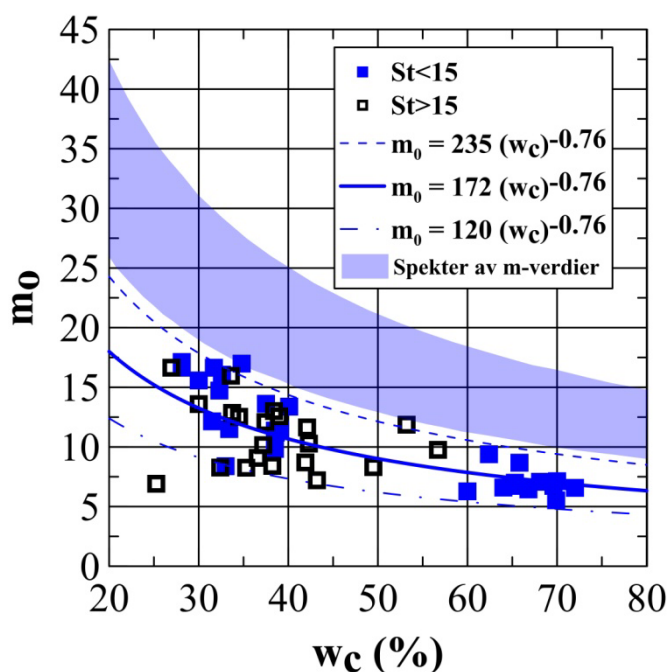


Figur 23 Sammenligning mellom modultall fra blokkprøver og data fra 54 mm prøver av Janbu (1985) (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 24 viser at det er en nær korrelasjon mellom m_0 -verdier og vanninnhold. For gitt vanninnhold er spredningen omtrent lik som m -verdiene vist i Figur 20. Som vi ser av Figur 25, er m_0 -verdiene betydelig lavere enn m -verdiene. I setningsanalyser er det derfor viktig å alltid bruke verdier for modultall, m , med en tilhørende verdien av p_r' . Dersom tilleggsspenningene kun er moderat høyere enn prekonsolideringsspenningen, kan man bruke verdier av m_0 sammen med $p_r'=0$.

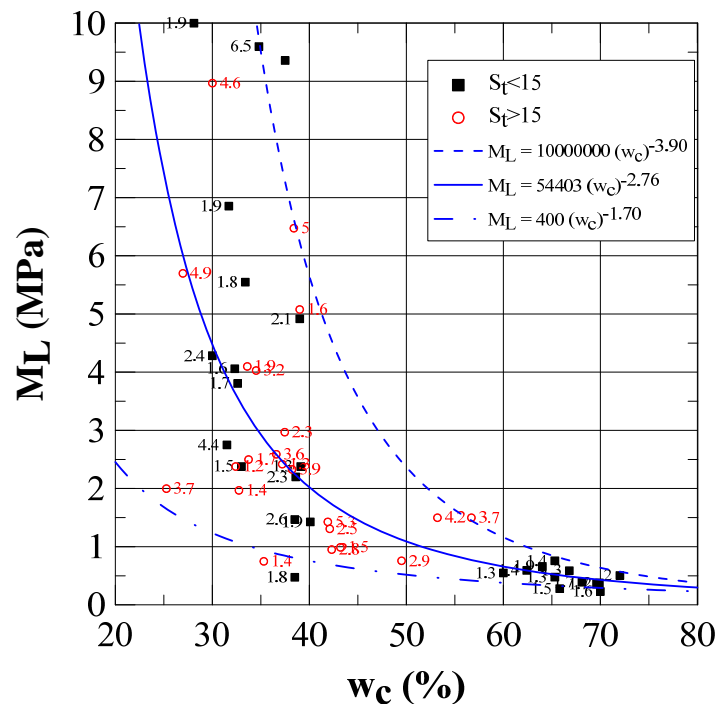


Figur 24 Modultall, m_0 , vs. Vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)



Figur 25 Sammenligning mellom modultall m_0 og m (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 26 viser verdier for laveste (minimum) modul, M_L , målt i hver test som funksjon av vanninnhold. Numrene på disse datapunktene viser OCR-verdi. Man ser at M_L avtar med økt vanninnhold, men viser betydelig spredning. Dette indikerer at M_L synes å øke med OCR, men det er vanskelig å etablere spesifikke trendlinjer for innflytelsen av OCR.

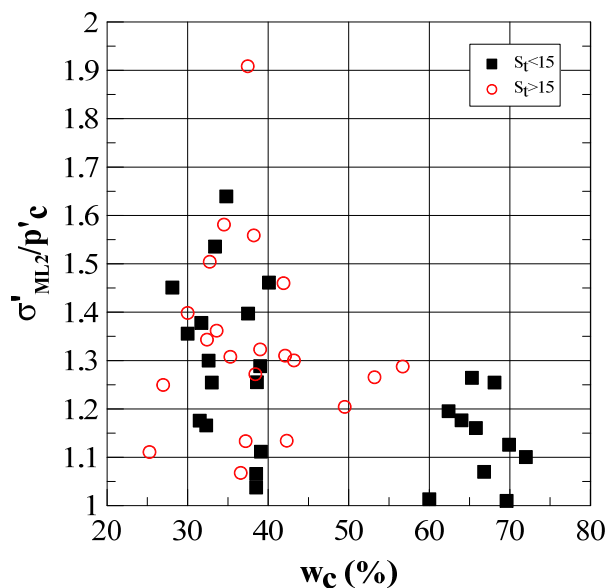


Figur 26 Målte minimumsverdier av modul, M_L , som funksjon av vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Basert på definisjonene i Figur 10, kan verdien av M_L også bestemmes ut fra likning [8].

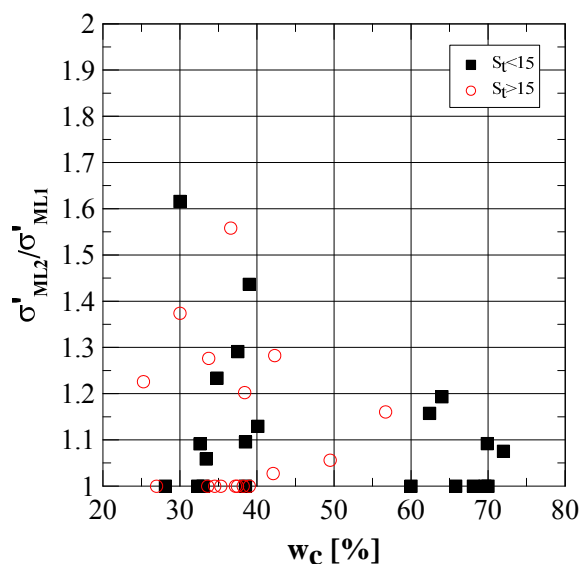
$$[8] \quad M_L = m(\sigma'_{ML2} - p'_r)$$

Figur 27 viser at normaliserte verdier av σ'_{ML2}/p'_c avtar med økt vanninnhold. Dette forholdet forteller oss hvor raskt modulen faller fra topp M_0 -verdi til minimum M_L -verdi. Dette kan tenkes å reflektere sprøheten av leirens struktur. Jo mindre forholdet σ'_{ML2}/p'_c er, desto sprøere er leiren. Sett i denne sammenheng, er det overraskende at leirer med høy sensitivitet ($S_t > 15$) ikke viser noen betydelig forskjell sammenlignet med leirer med lav til medium sensitivitet ($S_t < 15$).



Figur 27 Målte normale spenningsnivå, σ'_{ML2}/p'_c , i forhold til vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 28 viser at forholdet mellom spenningsnivåene der minimumsmodulen er konstant, (Figur 10), som definert ved det normaliserte forholdet $\sigma'_{ML2}/\sigma'_{ML1}$, ser ut til å avta med økt vanninnhold. Dette forholdet synes også å være uavhengig av sensitivitet og OCR for leiren.



Figur 28 Normalisert spenningsforhold $\sigma'_{ML2}/\sigma'_{ML1}$, i forhold til vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Permeabilitetskorrelasjoner

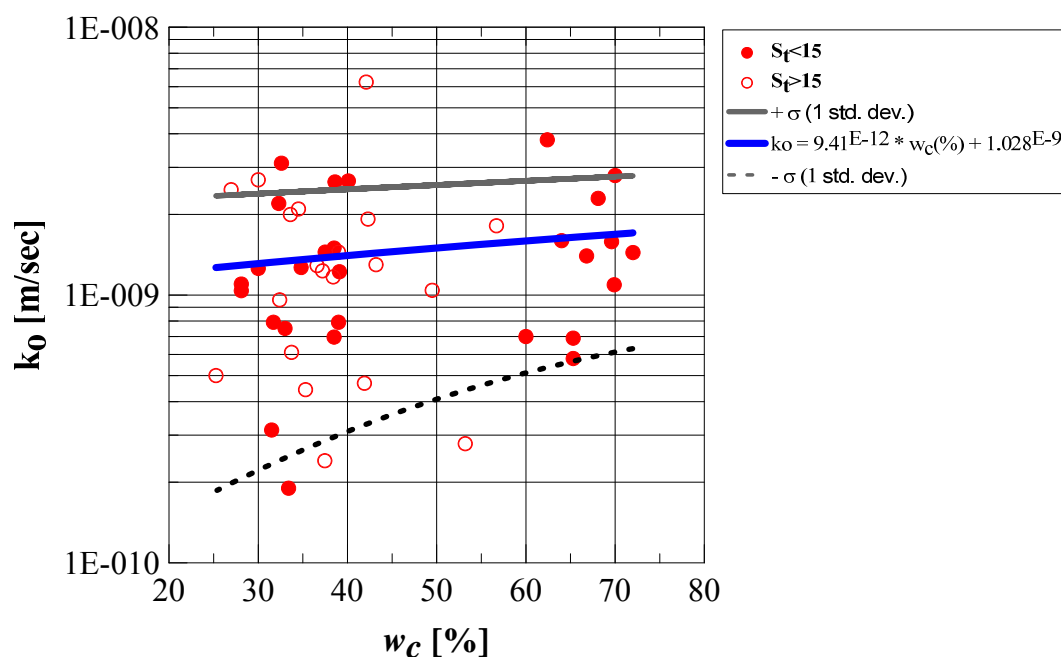
Figur 29 viser verdier av in-situ vertikal permeabilitet, k_0 , som tolket fra ødometerforsøk i forhold til vanninnhold. Gjennomsnittlig verdi og ett standardavvik opp eller ned blir som følger:

Gjennomsnittlig verdi: $k_0 = 1.77 \cdot 10^{-9}$ m/s

Gjennomsnittlig + 1 std.avvik. : $k_0 = 2.91 \cdot 10^{-9}$ m/s

Gjennomsnittlig – 1 std.avvik : $k_0 = 0.63 \cdot 10^{-9}$ m/s

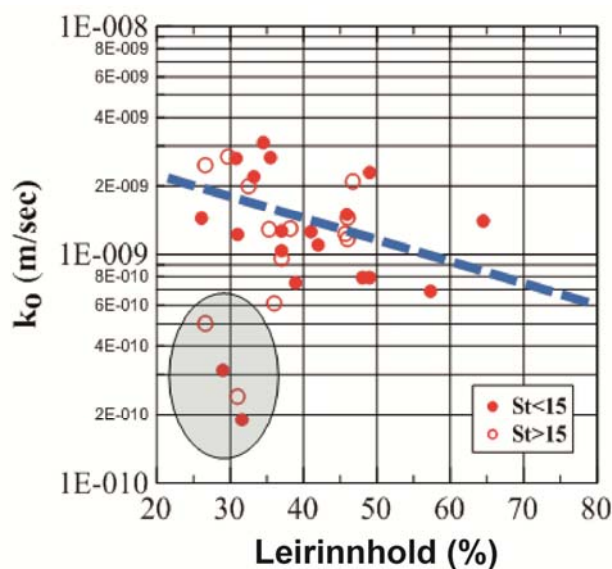
Som vist i Figur 29, gir en lineær regresjonsanalyse alle måledata en lineær linje \pm 1 std. avvik som tilsier en svak økning i permeabilitet med vanninnhold. Tavenas m.fl. (1983) og Mesri m.fl. (1994) viste også at permeabilitet synes å øke med vanninnhold eller porevolum.



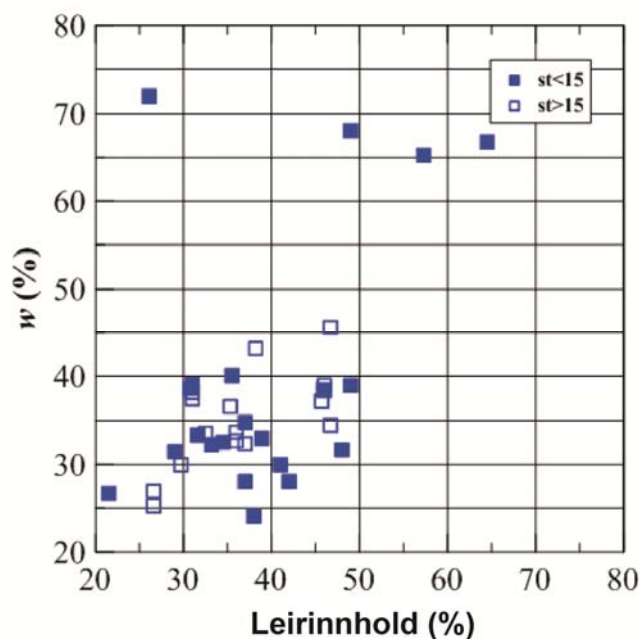
Figur 29 Permeabilitetskoeffisient, k_0 , tolket fra ødometerforsøk i forhold til vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

For de fleste prøvene ble leirinnhold målt ved hjelp av hydrometeranalyser. Dersom man ignorerer de fire laveste verdiene i Figur 30, synes permeabiliteten å avta med økt leirinnhold. For leirer med samme prekonsolideringsspenning, antas at vanninnholdet øker med økt innhold av leire. En direkte sammenligning mellom leireinnhold og vanninnhold, som vist i Figur 31, viser ingen innlysende korrelasjon. Som også diskutert av Tavenas m.fl., (1983) og Mesri m.fl., (1994), er det

ikke bare leireinnhold og porevolum som kan påvirke leirens permeabilitet, men også et antall andre faktorer, slik som type leiremineraller og kornfordeling.

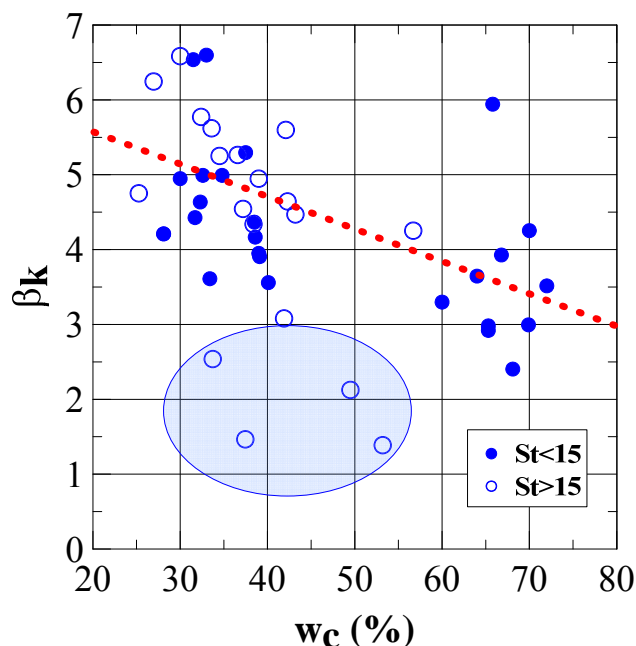


Figur 30 Permeabilitet, k_0 , bestemt fra ødometerforsøk i forhold til leireinnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)



Figur 31 Leireinnhold vs. Vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 32 viser at endringsindeksen for permeabilitet, definert ved likning [3], ser ut til å avta med økt vanninnhold dersom fire av de laveste prøveresultatene ekskluderes. De målte verdiene ligger stort sett i området 3 – 6, noe som stemmer med det som tidligere er blitt publisert av for eksempel Mesri m.fl.. (1994).



Figur 32 Endringsindeks for permeabilitet, β_k , som funksjon av vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

6.6.3 Udrenerte skjærforsøk

Før udrenert skjær, er alle prøver konsolidert anisotropisk til et spenningsnivå tilsvarende beste estimat av in-situ vertikal og horisontal effektiv spenning, dvs. $\sigma'_{ac} = \sigma'_{v0}$ and $\sigma'_{rc} = \sigma'_{h0}$. DSS-prøver som var antatt overkonsolidert, ble først lastet opp til et spenningsnivå på omtrent 80 – 90 % av forventet prekonsolideringstrykk, og videre avlastet til $\sigma'_{ac} = \sigma'_{v0}$ før udrenert skjær. Hensikten med denne konsolideringsprosedyren er å forsøke å gjenopprette riktig in-situ horisontal effektivspenning i prøvene, noe som kan ha en betydelig innflytelse på forsøksresultatene. Dette har vært standard prosedyre ved NGI siden 1970-årene ved DSS-forsøk på overkonsolidert leire.

Udrenert skjærfasthet

For å systematisere dataene med hensyn på udrenert fasthet, er det mest hensiktsmessig å arbeide med et normalisert forhold definert som c_u/σ'_{ac} . Basert på udrenerte prøver av leire som var blitt kunstig overkonsolidert i laboratoriet forut for udrenert skjær, foreslo Ladd og Foot (1974) at normalisert fasthet er nært relatert til overkonsolideringsgraden, OCR, ved likning. [9].

$$[9] \quad \frac{s_u}{\sigma'_{ac}} = S \cdot OCR^m$$

Prinsippet bak likning [9] ble av Ladd og Foot (1974) kalt SHANSEP, dvs.;

- **S**ress
- **H**istory
- **A**nd
- **N**ormalised
- **S**oil
- **E**ngineering
- **P**roperties

I denne studien er OCR-verdiene brukt i korrelasjonene basert på prekonsolideringsspenningen som er tolket fra CRS-prøvene. Ved ett område (Kvenild) var kun IL-prøver tilgjengelige. Basert på sammenligningen nevnt tidligere under ødometerforsøk, var prekonsolideringsspenningen fra IL-prøvene oppgradert med 12 % for å korrespondere med resultatene fra CRS-prøvene.

Figur 33 viser normalisert fasthet versus OC for CAUC triaksialforsøk. Figuren viser også variasjonsområdet for konstanten, S, og eksponenten, m som dekker alle data. Gjennomsnittslinjen og tilnærmet øvre og nedre grense, er presentert ved følgende verdier:

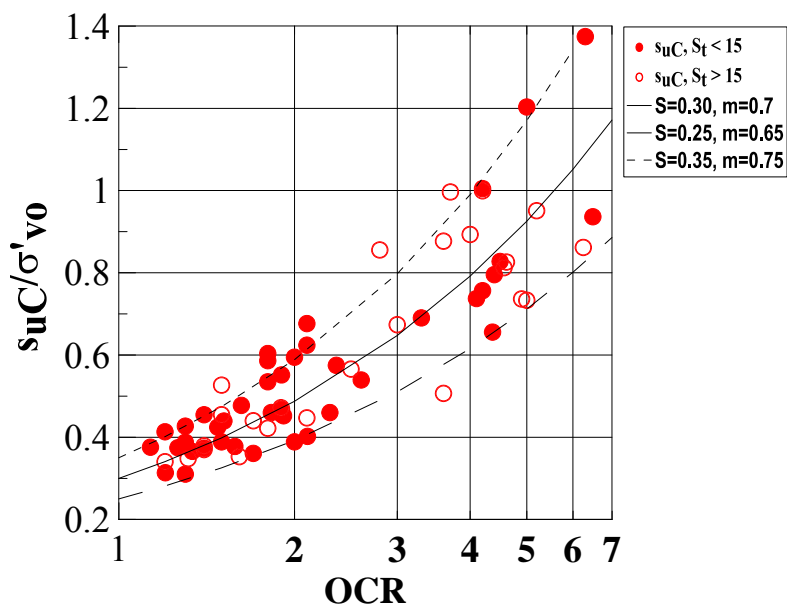
Gjennomsnittlig: S= 0.30, m= 0.7

Øvre: S= 0.35, m= 0.75

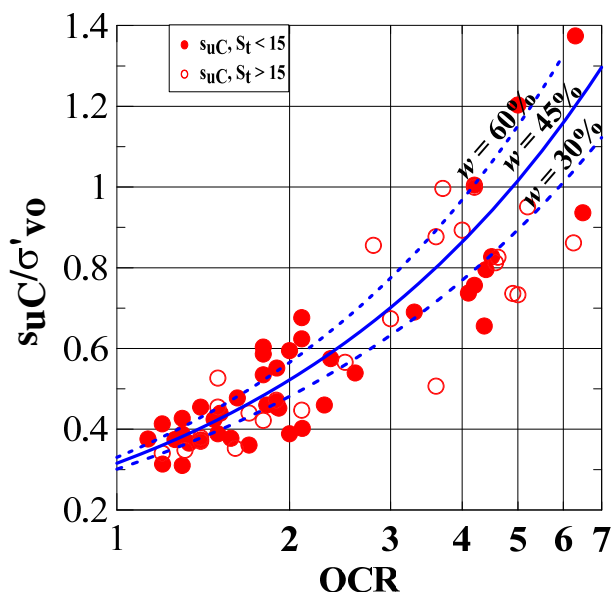
Nedre: S= 0.25, m= 0.65

Spredningen av data i Figur 33 er relativt stor. For en gitt OCR er varierer normalisert fasthet typisk med ± 20 % opp og ned. Det er ingen tilsynelatende effekt av sensitivitet, men noe av spredningen kan skyldes varierende vanninnhold. Dette er vist i Figur 34, som resultat av en lineær regresjonsanalyse av hele datasettet. Grovt sett kan variasjonen i vanninnhold forklare omtrent ± 10 %, eller halvparten av variasjonen i normalisert fasthet for en gitt OCR. Avhengigheten av vanninnhold er gitt i likning [10].

$$[10] \quad \frac{s_{uc}}{\sigma'_{v0}} = (0.27 + 0.10 \cdot w_c) \cdot OCR^{(0.58+0.33 \cdot w_c)}$$



Figur 33 Normalisert styrke vs. OCR fra CAUC-prøver (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)



Figur 34 Normalisert fasthet vs. OCR fra CAUC-prøver med resultater fra regresjonsanalyser for innvirkning av vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Det kan argumenteres at det er en viss usikkerhet i både fasthet og OCR-verdi pga. mulige variasjoner i prøve kvalitet for hver prøve. Tatt i betraktning den gode kvaliteten på alle prøvene, vil variasjon i kvalitet trolig ikke forklare den resterende spredningen av resultater. Som også diskutert i forbindelse med kompressibilitet er det nærliggende å tro at hovedgrunnen til spredningen kan forklares med detaljerte mineralogiske og geokjemiske egenskaper for leiren, inkludert mulige virkninger av

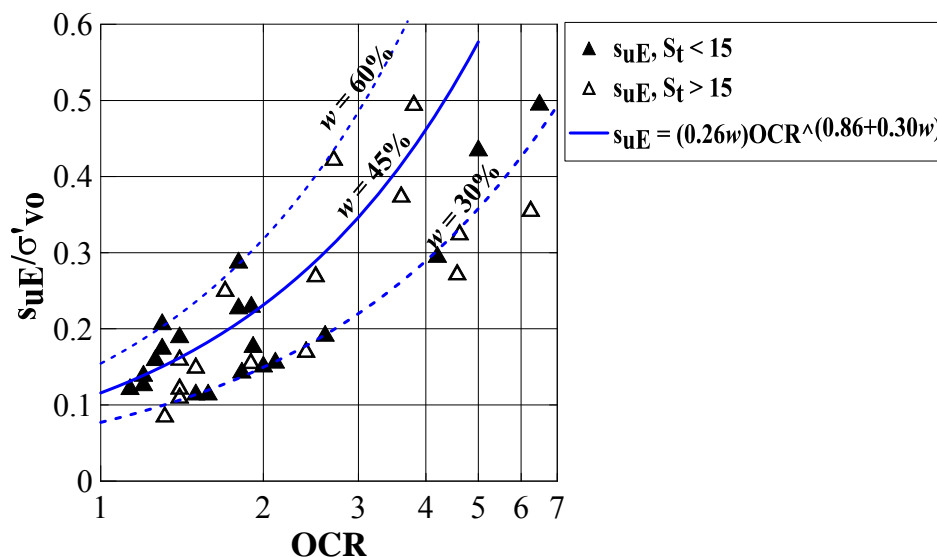
sementering og/eller kornstruktur. Ladd og Foot (1974) og Ladd og DeGroot (2003) presenterte normalisert fasthet for ulike kunstige og overkonsoliderte leirer. Deres data viser en variasjon av S- og m-verdier som er sammenlignbar med de vist i Figur 33 og 34.

Figur 35 viser normalisert fasthet for CAUE triaksforsøk. Disse resultatene viser også betydelig spredning for en gitt OCR, som gir følgende verdier for S og m når man ikke tar i betraktning variasjoner i vanninnhold:

Gjennomsnittlig: $S = 0.12$, $m = 0.8$

Øvre: $S = 0.16$, $m = 0.94$

Nedre: $S = 0.08$, $m = 0.75$



Figur 35 Normalisert fasthet vs. OCR fra CAUE-prøver med resultat av regresjonsanalyser for innflytelse av vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Selv om spredningen i normalisert CAUE-fasthet i Figur 35 er høyere enn for CAUC-fasthet i Figur 33, omtrent $\pm 35\%$, viser lineær regresjonsanalyser at observert spredning hovedsakelig er knyttet til variasjon i vanninnhold, vist i likning [11].

[11]
$$s_{uE} = (0.27 \cdot w_c) \cdot OCR^{(0.86+0.30 \cdot w_c)}$$

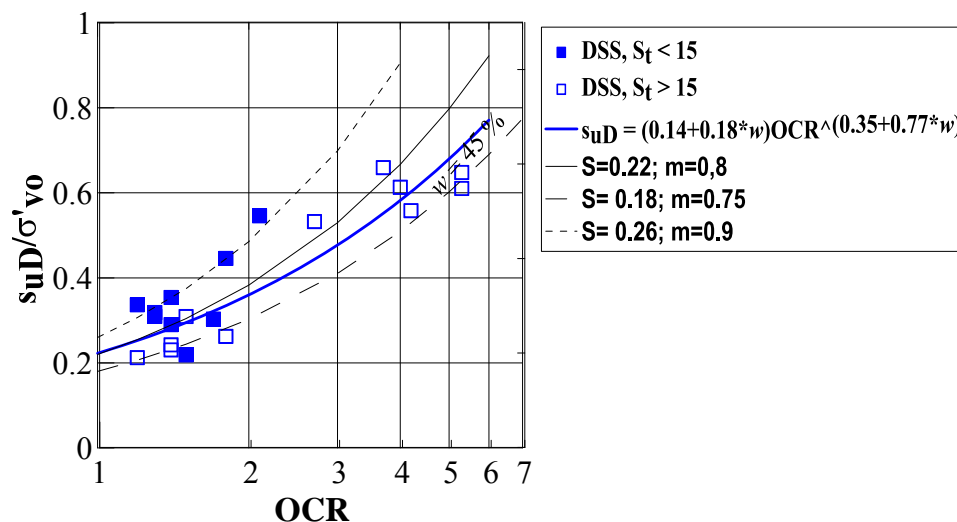
Dette er en interessant observasjon. I CAUE-prøver fører spenningsrotasjonen til mer degradering av original leirstruktur i det maks fasthet er nådd, sammenlignet med CAUA-prøver. Dvs. at fasthet er i størst grad gjenspeilet av vanninnhold ved starten av skjærdeformasjonen.

DSS-prøver har kun blitt utført på et fåtall blokkprøver. Således inneholder Figur 36 over normalisert fasthet færre datapunkt for DSS-prøver. Spredningen er også stor for dette tilfellet med følgende verdier for S og m når variasjoner av vanninnhold ikke er tatt i betraktning:

Gjennomsnittlig: $S = 0.22$, $m = 0.8$

Øvre: $S = 0.26$, $m = 0.9$

Nedre: $S = 0.16$, $m = 0.75$



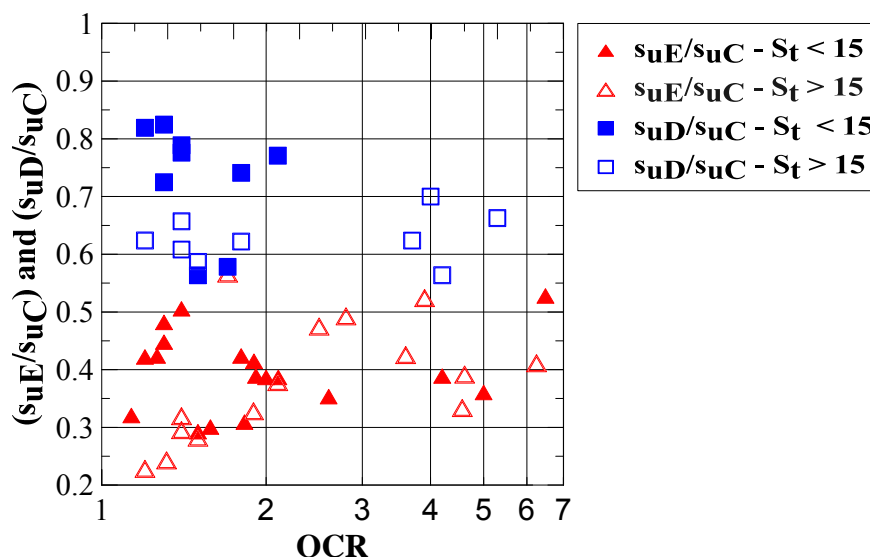
Figur 36 Normalisert fasthet vs. OCR fra DSS-prøver med resultater fra regresjonsanalyse mht. vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Lineær regresjonsanalyse tyder på at spredningen, slik som for CAUE-prøver, skyldes i hovedsak variasjoner i vanninnhold, vist i likning [12].

$$[12] \quad s_{uD} = (0.14 + 0.18 \cdot w_c) \cdot OCR^{(0.35+0.77 \cdot w_c)}$$

Figur 37 viser anisotropiforholdene s_{uE}/s_{uC} og s_{uD}/s_{uC} i forhold til overkonsolideringsgrad. CAUE-prøvene viser veldig lave verdier for $s_{uE}/s_{uC} = 0.22$ til 0.32 for sensitive leirer med $OCR < 2$, og øker til et gjennomsnitt på omtrent 0.4 (varierende

fra 0.32 til 0.52) ved høyere OCR-verdier. For leirer med lav sensitivitet, synes anisotropiandelen å være mer uavhengig av OCR, og er typisk gitt ved $s_{uE}/s_{uC} = 0.4$ (varierende fra 0.30 til 0.52). Spredningen i materialet er imidlertid relativt stor.



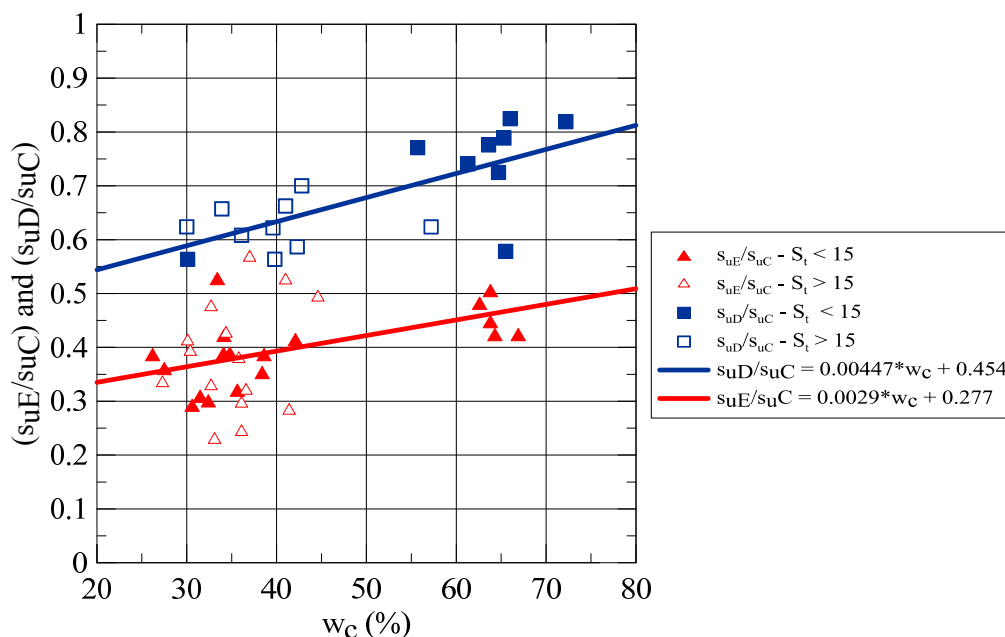
Figur 37 Anisotropiforhold mot overkonsolideringsgrad (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Det begrensede antallet DSS-prøver i denne studien tyder på en gjennomsnittsverdi på omtrent $s_{uD}/s_{uC} = 0.67$. Også i dette tilfellet er det en tendens til at sensitive leirer viser lavest fasthet. OCR-verdien synes ikke å være avhengig av forholdet s_{uD}/s_{uC} .

Figur 38 viser at anisotropiforholdene er mer avhengig av vanninnhold enn OCR. Likning [13-14] er anbefalt:

$$[13] \quad \frac{s_{uD}}{s_{uC}} = (0.00447 \cdot w_c) + 0.4547$$

$$[14] \quad \frac{s_{uE}}{s_{uC}} = (0.0029 \cdot w_c) + 0.277$$

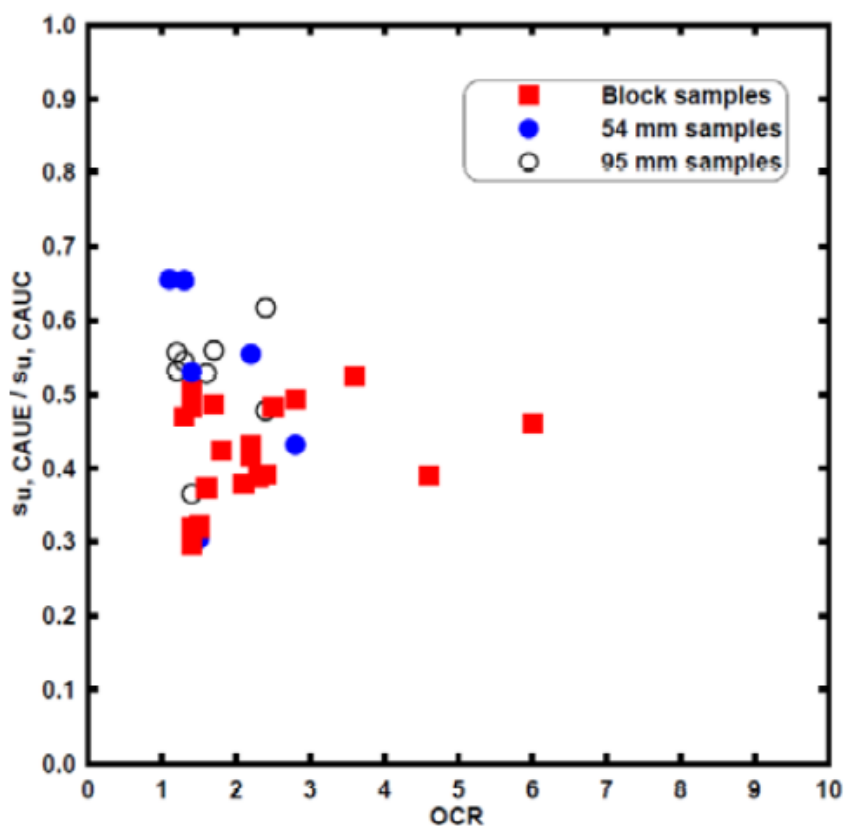


Figur 38 Anisotropiforhold vs. Vanninnhold (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 39 viser et typisk eksempel på anisotropiforholdet s_{uE}/s_{uC} , bestemt fra stempelprøver med dårligere kvalitet, sammenlignet med blokkprøver. Anisotropiforholdene er større for de dårlige stempelprøvene enn for blokkprøvene. Lunne og Andresen (2007) trakk en lignende konklusjon da de sammenlignet udrenert styrke fra stempelprøver med blokkprøvene referert til i Tabell 5. Forklaringen på denne effekten er at hovedspenningsrotasjoner i CAUE- og DSS-prøver fører til en gradvis nedbryting av leirstrukturen, og derfor mindre innflytelse på prøve kvaliteten sammenlignet med en CAUA-prøve.

Tabell 5 Sammenligning mellom anisotropiforhold på stempelprøver og blokkprøver av høy kvalitet (Lunne and Andresen, 2007)

Anisotropiforhold	Blokkprøver			54/95 mm stempelprøver		
	Middel	n	r^2	Middel	n	r^2
s_{u}^{DSS}/s_{u}^{CAUC}	0.69	20	0.989	0.74	16	0.987
$s_{u}^{CAUE}/s_{u}^{CAUC}$	0.42	19	0.984	0.50	12	0.974

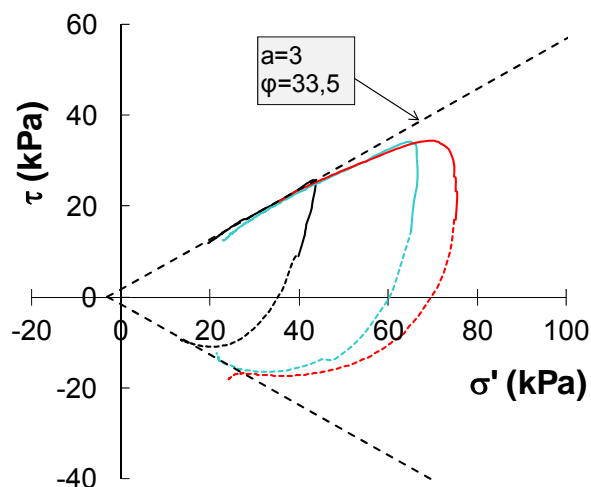


Figur 39 Anisotropiforhold fra konvensjonelle sylinderprøver (Karlsruh, 2003)

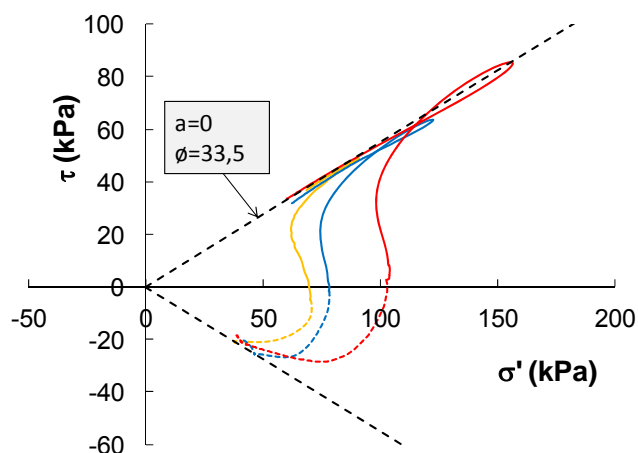
Effektive fasthetsparametere

Effektive fasthetsparametre for leire er i denne studien definert med en linje som definerer maksimumsverdier av mobiliserte effektive fasthetsparametre i en test. Effektive fasthetsparametre kan generelt defineres som en effektiv friksjonsvinkel, ϕ , og attraksjon, a . Attraksjonen, a , ble definert av Janbu (1963) som skjæringspunktet av Mohr-Coulombs bruddlinje på spenningsaksen. Attraksjonen er relatert til effektiv kohesjon ved avskjæring på skjærspenningsaksen, med uttrykket $a = c/\tan\phi$.

Det kan i enkelte tilfeller være vanskelig å tolke kombinerte verdier av friksjonsvinkel, ϕ , og attraksjon, a , fra en enkelt prøve. Det kan være nødvendig å bruke resultater fra flere forskjellige prøver for å definere disse parameterne. Figur 40 til 42 viser eksempler på effektivspenningsstier fra ulike steder. Både for den normal-konsoliderte Onsøy 2 leiren (Figur 40) og den overkonsoliderte kvikkleiren fra Klett-Bårdshaug (Figur 41) kan det trekkes en veldefinert Mohr-Coulomb bruddlinje, som stemmer bra med både CAUC- og CAUE-prøver. Attraksjonen, a , er veldig liten for begge disse tilfellene.

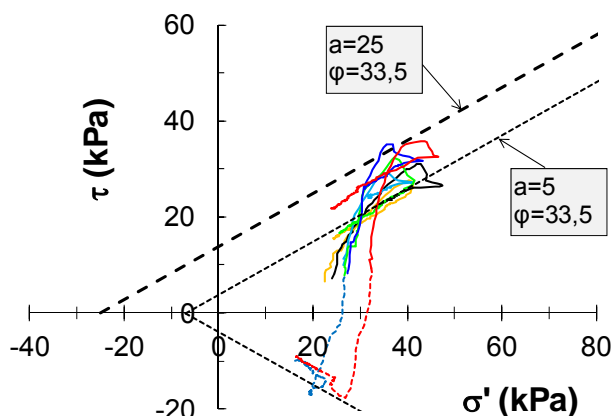


Figur 40 Effektivspenningsstier fra triakstester på Onsøy 2 leire (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)



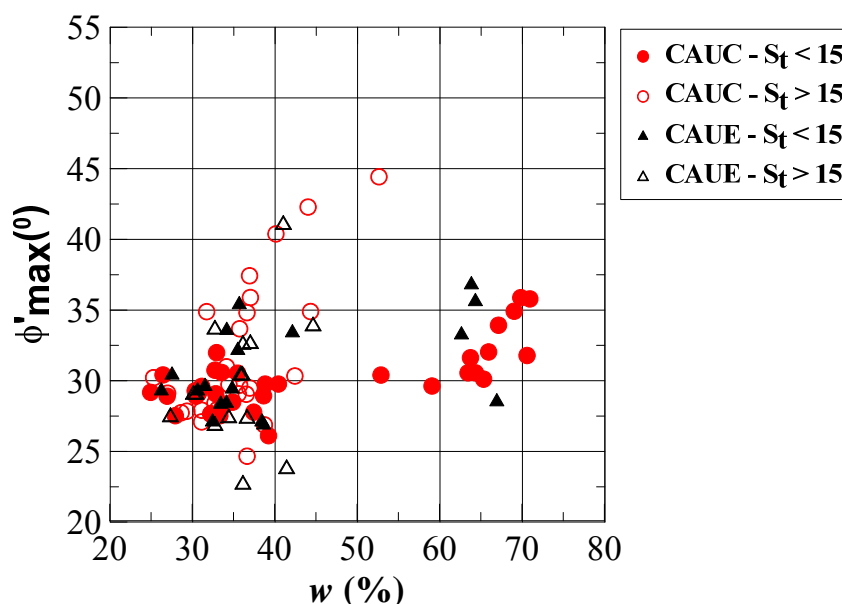
Figur 41 Effektivspenningsstier fra triakstester på Klett-Bårdshaug kvikkleire (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Fra CAUC- og CAUE-prøver av kvikkleire fra Emmerstad, vist i Figur 42, er det ikke mulig å definere en unik bruddlinje. Dersom effektiv friksjonsvinkel er $\phi=33,5^\circ$ for alle prøvene, vil attraksjonen variere fra 5 til 25 kPa. Den laveste attraksjonen er fra CAUE-prøvene, og de høyeste fra to av CAUC-prøvene. Formen på effektivspenningsstiene på CAUC-forsøkene tyder på at attraksjonen delvis brytes ned ved store tøyninger, og nærmer seg minimumsverdi. En mulig forklaring på dette er at kvikkleiren fra Emmerstad i noen grad er sementert.



Figur 42 Effektivspenningsstier fra triaksforsøk på Emmerstad kvikkleire (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Det er vanskelig å sammenligne effektivspenningsparametere fra de forskjellige prøvene, da både en tydelig friksjonsvinkel og attraksjon trengs for hver test. Derfor var det mer praktisk å definere en tydelig maksimum friksjonsvinkel, ϕ_{\max} , ved å tilpasse tangent M-C-linje som forutsetter null attraksjon (dvs. $a=0$). Figur 43 viser at tolkede verdier av ϕ_{\max} synes å øke med vanninnhold. Noen av de sensitive leireprøvene med vanninnhold på 36 – 53 % viser høyere verdier enn ikke-sensitiv leire, noe som er ganske overraskende.



Figur 43 Maksimum effektiv friksjonsvinkel fra triakstester i forhold til vanninnhold, forutsatt null attraksjon (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

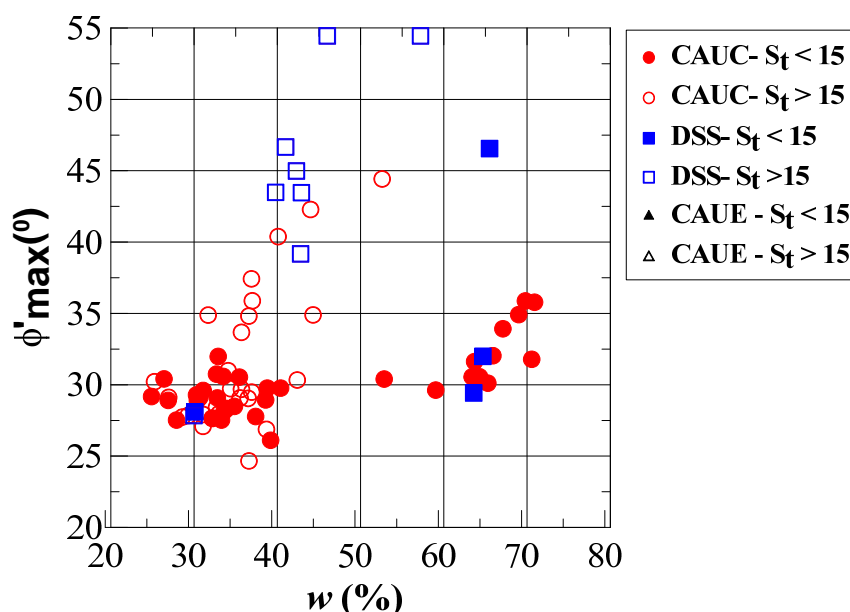
Siden radiell effektiv spenning ikke er kjent i standard DSS-prøver, kan vi ikke avlede sann effektiv friksjonsvinkel. Fra spesielle DSS-prøver instrumentert til å opprettholde radiell spenning gjennom en DSS-test, har det vært antatt at forholdet mellom radiell og aksiell effektivspenning nærmer seg 1,0 ved store tøyninger (Dyvik et. Al., 1987). Dersom dette er tilfelle, kan det vises at effektiv friksjonsvinkel mobilisert i prøven er gitt ved likning 15:

$$[15] \quad \sin\phi_{max} = \tan\delta_{max}$$

hvor,

$\tan\delta_{max}$ = maksimumsverdi av τ_h/σ'_a gjennom testen.

Figur 44 viser maksimum friksjonsvinkel avledet på denne måten fra DSS-prøver, sammenlignet med CAUC-prøver. Der det er direkte sammenlignbare resultater, stemmer verdier av ϕ_{max} fra DSS- og CAUC-prøver godt overens. De fem DSS-verdiene av vanninnhold fra 42 – 57 % viser relativ høy friksjonsvinkel sammenlignet med CAUC-prøvene. Disse verdiene gjelder kvikkleiren fra Emmerstad, og kan tyde på at denne leiren spesielt er påvirket av sementeringseffekter.



Figur 44 Maksimum effektiv friksjonsvinkel fra DSS-forsøk som funksjon av vanninnhold, forutsatt null attraksjon. Også sammenlignet med CAUC treksforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

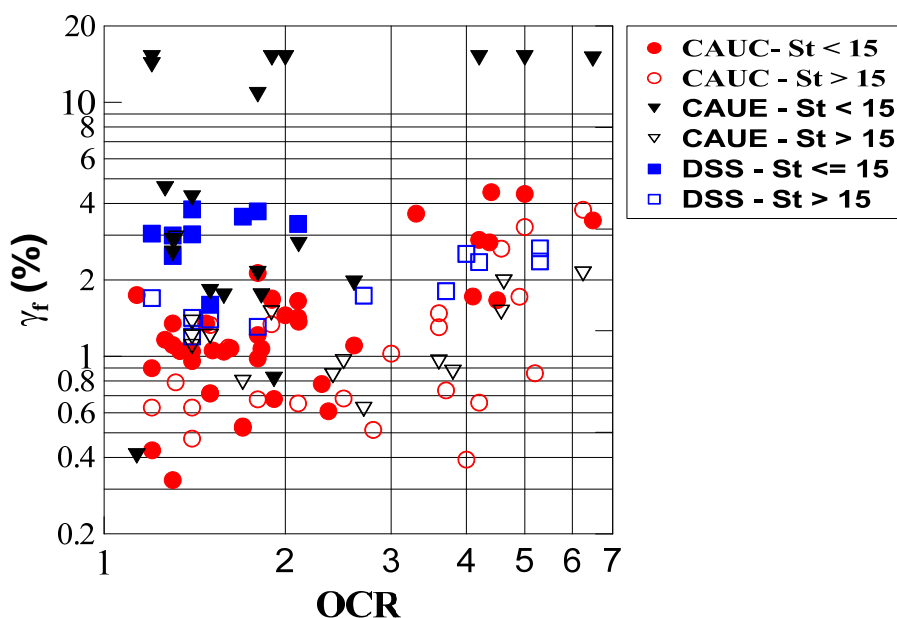
Tøyning ved brudd

For å muliggjøre en direkte sammenligning mellom triaksial- og DSS-prøver, viser Figur 45 skjærtøyning ved brudd, γ_f , for alle prøver og prøvetyper i forhold til OCR. Det er en generell tendens at skjærtøyningen ved brudd øker med OCR, men

dataene viser rimelig stor spredning, fra et minimum på 0.3 % til et maksimum på 15 %.

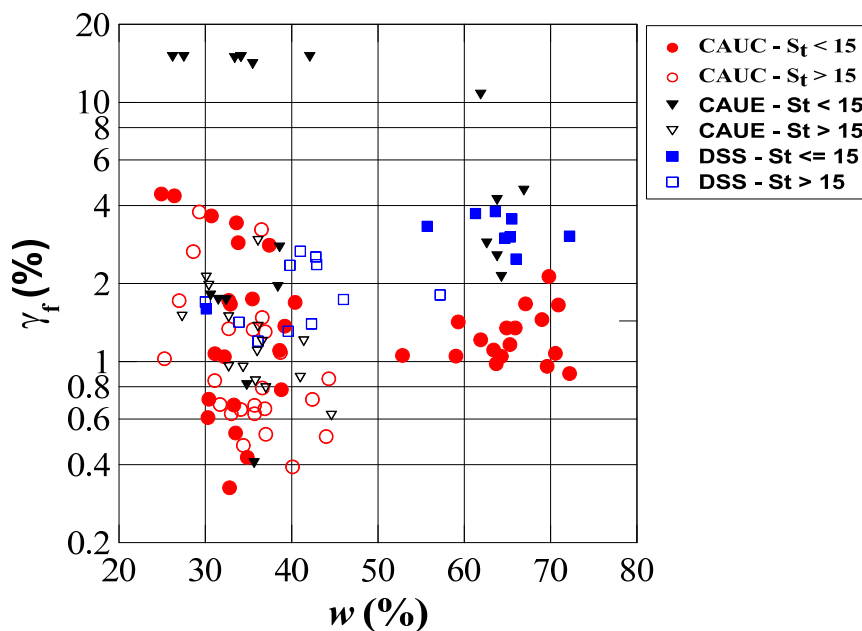
Noen andre observasjoner som kan gjøres er følgende:

- CAUC-prøver viser den klareste tendensen til økning av γ_f med økt OCR
- Skjærtøyning ved brudd er generelt minst for høysensitive leirer
- Skjærtøyning ved brudd er størst for CAUE-prøver på leirer med lav sensitivitet
- CAUE-prøver på leirer med høy sensitivitet viser kun moderat høyere verdier enn sammenlignbare CAUC-prøver
- DSS-prøver havner midt mellom CAUC- og CAUE-prøver



Figur 45 Bruddtøyning vs. OCR, for alle forsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

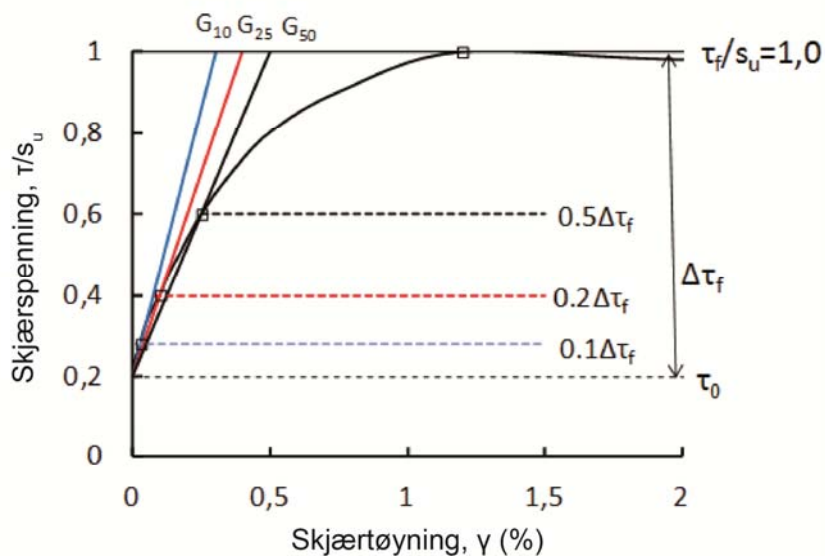
Figur 46 viser at skjærtøyning ved brudd også øker med vanninnholdet i leiren, men spredningen er stor.



Figur 46 Tøyning ved brudd vs. vanninnhold, alle forsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Udrenert skjærmodul

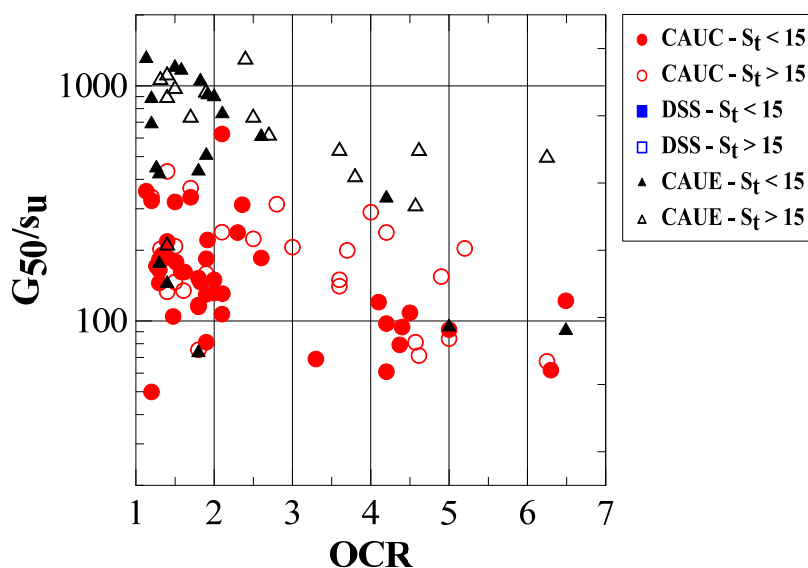
For å presentere udrenert skjærmodul i denne studien, er det valgt å bruke udrenert sekantmodul som grunnlag, og studere hvordan den avhenger av påført skjærspenningsnivå for alle tester og testtyper. Figur 47 illustrerer hvordan sekant skjærmodul er definert ved ulike fasthetsmobiliseringer. Merk at for triaksialtester, hvor udrenert belastning starter ved en skjærspenning gitt av konsolideringsspenningene, dvs. $\tau_0 = (\sigma_a - \sigma_r)/2$, refererer mobiliseringsgraden til påført økning i skjærspenning frem til brudd, $\Delta\tau_f$, definert i Figur 47. Verdier av G_{10} , G_{25} og G_{50} er tolket for hver individuelle prøve. I det følgende er det kun fokusert på verdier av G_{50} .



Figur 47 Definisjon av sekant skjærmodul ved forskjellig fasthetsmobilisering (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

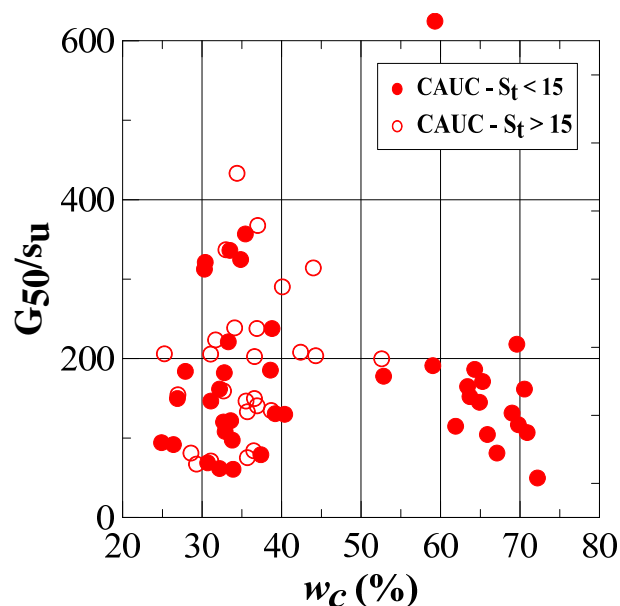
Figur 48 viser verdier for G_{50} -modulen normalisert med hensyn på absolutt verdi av maksimal skjærfasthet i de respektive prøvene. Det kan synes overraskende at CAUE-triakslforsøk viser de høyeste verdiene og CAUC de laveste. Hovedgrunnen er at udrenert skjærfasthet er lavest for CAUE-prøvene. Figur 48 viser at:

- G_{50}/s_u avtar noe med OCR
- G_{50}/s_u synes å være høyere for høysensitiv leire enn for lav-sensitiv leire



Figur 48 Sekant udrenert skjærmodul ved 50 % mobilisering normalisert mht. udrenert skjærfasthet (G_{50}/s_u) vs. OCR, for triaksialforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

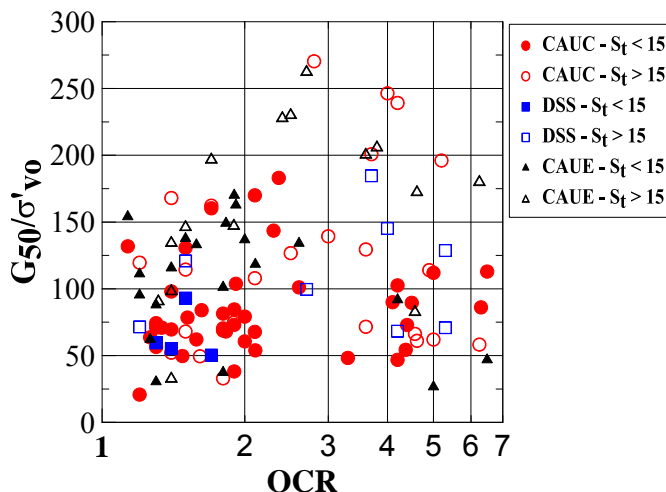
Spredningen i dataene må fortsatt sies å være høy. For å undersøke om noe av spredningen kan være relatert til vanninnholdet i leiren, viser Figur 49 korrelasjon mellom G_{50}/s_u - verdier og vanninnhold kun for CAUC forsøk. Disse tyder på at det ikke er noen tydelig korrelasjon mot vanninnhold.



Figur 49 Sammenligning mellom innflytelse av vanninnhold og OCR på G_{50}/s_u fra CAUC forsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

Figur 50 viser at når G_{50} -verdier er normalisert mot in-situ vertikal effektivspenning heller enn udrenert skjærfasthet, grupperer de ulike testtypene seg mer. CAUE-

prøvene synes fortsatt å gi de høyeste verdier av G_{50}/σ'_{v0} , mens G_{50}/σ'_{v0} -verdier fra CAUC og DSS-prøver er mer like.

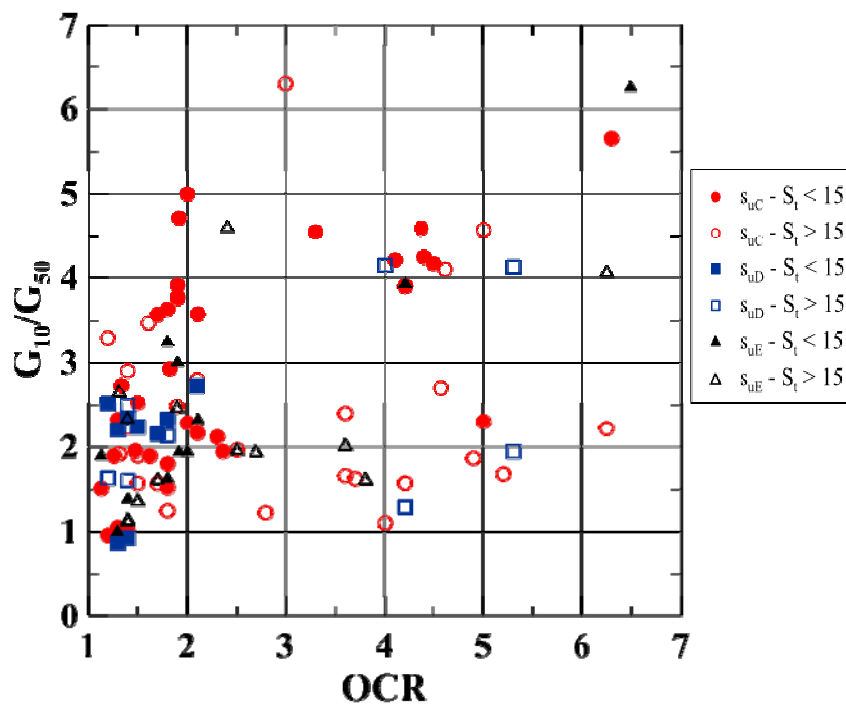


Figur 50 Sekant skjærmodul ved 50 % mobilisering normalisert mht. in-situ vertikal effektivspenning, (G_{50}/σ'_{v0}) vs. OCR, triaksforsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

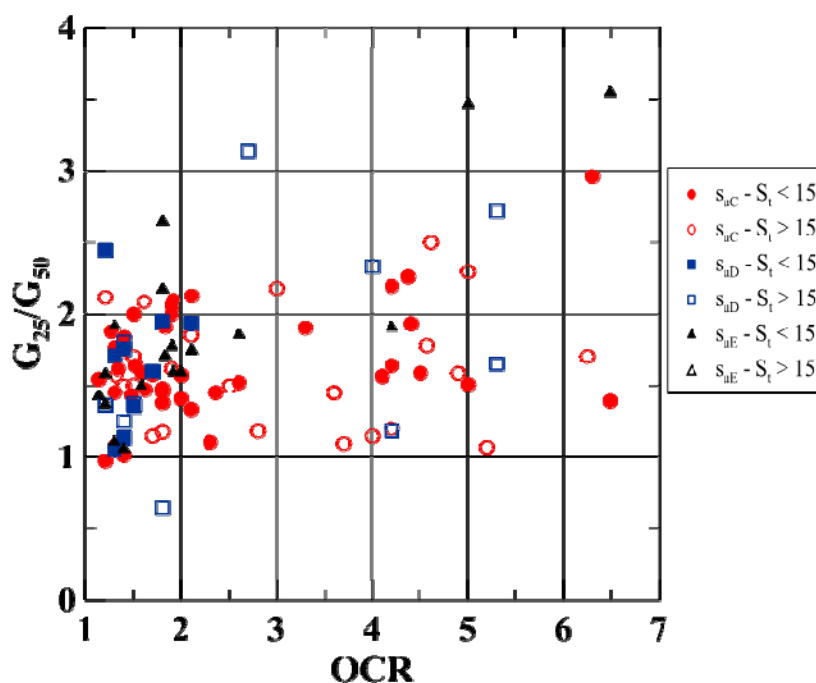
Ellers kan følgende tendenser observeres fra Figur 50:

- G_{50}/σ'_{v0} synes å øke med OCR for alle testtyper
- G_{50}/σ'_{v0} er generelt høyere for høy-sensitive leirer enn for leire med lav sensitivitet

Figur 51 og 52 viser forholdene G_{10}/G_{50} og G_{25}/G_{50} i forhold til OCR. Det synes som at disse er ganske variable, men ligger for det meste i området $G_{10}/G_{50} = 1$ til 7 og $G_{25}/G_{50} = 1$ til 3. Det er også en tendens til at begge øker med OCR, særlig for leirer med lav sensitivitet, og de avhenger overraskende lite av testtype.



Figur 51 Modulforholdet G_{10}/G_{50} vs. OCR, alle forsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

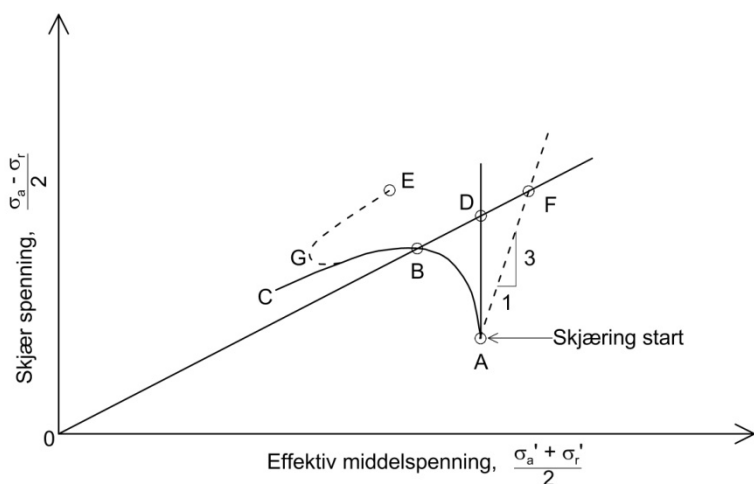


Figur 52 Modulforholdet G_{25}/G_{50} vs. OCR, alle forsøk (etter Karlsrud og Hernandez-Martinez, 2013)

6.7 Mulig korreksjon av 54 mm prøver

På bakgrunn av sammenligninger av udrenerte skjærforsøk på hhv. 54 mm prøver og blokkprøver, har Berre m.fl. (2007) foreslått en prosedyre for å vurdere potensialet for å kunne dokumentere høyere skjærfasthet ved å ta blokkprøver der det i utgangspunktet kun finnes 54 mm prøver. For små tøyninger (opp til ca. 3% skjærtøyning), hvor effekt av prøveforstyrrelse er antatt å være styrt av nedbrutt kornstruktur og ev. sementering, innebærer metoden en oppjustering av fastheten. For større tøyninger er prøveforstyrrelsen antatt å være styrt av redusert vanninnhold, og gir følgelig generelt øket fasthet i forstyrrede prøver, som dermed må justeres ned. Effekten er illustrert i Figur 2.

Justering av fasthet ved små tøyninger på CAUC-forsøk er foreslått gjort ut i fra spenningsstiens form, i det blokkprøver med høy kvalitet synes å følge en nær "elastisk" spenningssti opp til udrenert brudd, uten nevneverdig skjærinduserte poretrykk. En elastisk spenningssti følger i teorien en linje 3:1 i et plott med middelspenningen $(\sigma_a' + \sigma_r')/2$ på x-aksen og skjærspenning på y-aksen, forutsatt at disse plottes i lik målestokk. For svakt overkonsoliderte leirer, opp til $OCR = 2,0$ er det likevel anbefalt å anta en vertikal spenningssti da enkelte av disse viser noe kontraktans før brudd også på meget gode prøver. Punktet der den vertikale spenningsstien skjærer en forlenget linje fra origo til maks skjærspenning i 54 mm forsøket, blir da tolket som justert maksimal skjærfasthet. Dette har vist seg å stemme rimelig bra med mange forsøk, ref. Berre m.fl (2007). Prinsippet er illustrert i figur 53.



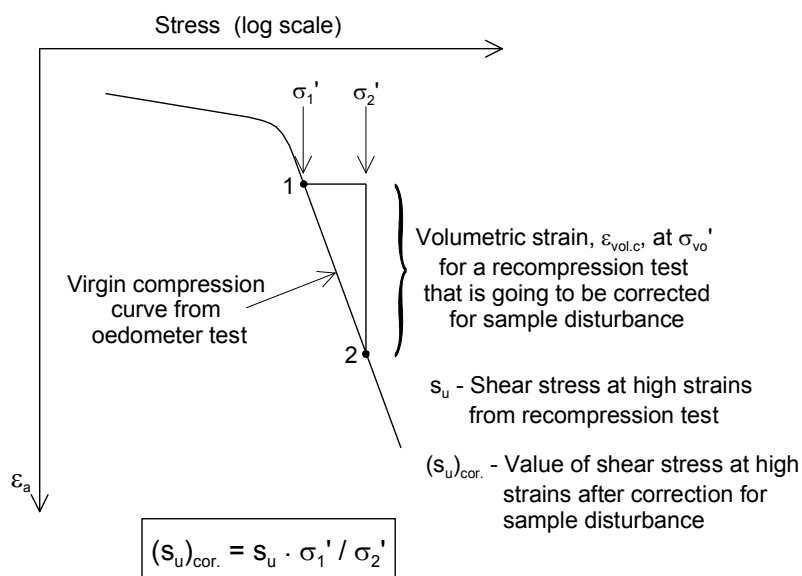
Figur 53 Prinsipp for korrigering av CAUC-forsøk (etter Berre m.fl. 2007)

Passive forsøk og DSS-forsøk viser ikke den samme forskjell i spennings-/tøyningsrelasjon ved små tøyninger, antatt fordi spenningsrotasjonen medfører en nedbryting av strukturen også for høykvalitetsprøver, som tidligere beskrevet.

Oppførselen er derfor i større grad styrt av vanninnholdet både for små og store tøyninger. Ved små tøyninger er fastheten fra blokkprøver og 54 mm prøver sammenlignbar, men 54 mm viser større tendens til dilatans for store tøyninger og dermed høyere fasthet. For 54 mm prøver kan målt maks skjærfasthet antas riktig for kontraktante forsøk, og lik fastheten ved startende dilatans for dilaterende forsøk.

Korreksjon ved store tøyninger (rundt 15 %) er foreslått ut i fra antagelsen om at forholdet mellom fasthet og effektivspenning er konstant så lenge prøven befinner seg i jomfruspenningsområdet. Korreksjonen kan dermed gjøres ut i fra målt endring i vanninnhold ved konsolidering til in-situ spenninger, sammenholdt med jomfrukurven fra et ødometerforsøk. Endret vanninnhold knyttes til et ekvivalent spenningsnivå, ref. figur 54. Korrigert skjærfasthet kan dermed settes til $(c_u)_{\text{kor.}} = c_u \cdot \sigma_1' / \sigma_2'$ (Berre m.fl. 2007).

Det presiseres at foreslåtte korreksjoner som beskrevet over kun må benyttes til å vurdere potensialet og mulige besparelser ved å bekoste blokkprøvetaking på et gitt prosjekt, og ikke til direkte å øke designfasthet uten å verifisere dette ved hjelp av høykvalitets prøver.



Figur 54 Prinsipp for korrigering av skjærspenning ved store tøyninger på udrenerte forsøk på prøve konsolidert til in-situ spenninger (etter Berre m.fl. 2007)

7 Sluttkommentar

Resultatene fra denne studien viser at variasjonen i naturlige leirers egenskaper er relativt stor, og større enn tidligere antatt. Årsaken til dette kan antagelig ligge i leirenes forskjellige mineralogi og geokjemi, og i mindre grad forskjell i

prøve kvalitet. For å kunne sortere ut slike effekter av mineralogi og geokjemi kunne det vært en idé å studere dette nærmere fra de prøvestedene som avviker mest fra gjennomsnittet. Dersom korrelasjoner fra denne rapporten benyttes til hjelp i design for spesifikke prosjekter, anbefales benyttet data fra forsøkssteder som ligger nærmest prosjektlokaliteten, og som har sammenlignbare rutinedata, ref. Tabell 3. I tillegg anbefales å gjøre konservative valg av empiriske data, dersom det ikke tas nye blokkprøver i forbindelse med prosjektet.

Mange av blokkprøveresultatene fra denne rapporten er tidligere benyttet for å etablere korrelasjoner til CPTU-data (Karlsrud m.fl., 2005). Disse kan være til god hjelp for valg av empiriske fasthetsparametre.

Det å benytte en høyere skjærfasthet på grunnlag av blokkprøver enn ved bruk av konvensjonell 54 mm prøvetaker, reiser noen spørsmål som er viktig å tenke over ved valg av sikkerhetsfilosofi, som diskutert av Karlsrud og Hernandez-Martinez (2013):

- Tidseffekt ev. pålastingshastighet.
- Tøyningskompatibilitet
- Progressiv bruddutvikling
- Forhold mellom skjærfasthet ved hhv. triaksiell og plan spenningstilstand
- 3D-effekter
- Effekter av svelling på udrenert skjærfasthet

Dette er effekter som går både i konservativ og ikke konservativ retning hva gjelder deres påvirkning på beregnet sikkerhetsfaktor, og mange av dem har normalt ikke blitt tatt hensyn til ved vanlig prosjektering på grunnlag av 54 mm prøver. Bruk av 54 mm prøver har trolig representert en innebygget konservatisme, som indirekte har tatt hensyn til noen av disse effektene. Det er imidlertid viktig å ha et bevisst forhold til dette ved bruk av høykvalitets prøver.

En ny og modifisert blokkprøvetaker er nå utviklet ved NGI. Denne kan opereres med en vanlig borerigg for geotekniske undersøkelser, og er dermed adskillig rimeligere i bruk enn Sherbrooke prøvetakeren som ble brukt tidligere. NGI har pr. 2012 produsert og levert slike prøvetakere til NTNU og Statens Vegvesen. Det er derfor grunn til å håpe på at det vil bli langt vanligere å ta høykvalitets prøver i fremtiden, og at det samlede nasjonale empiriske grunnlaget vil vokse og etterhvert representere et større mangfold av leirer, både geologisk og geografisk. Forutsetningen for å kunne dra nytte av slik utvikling er at resultater fra nye forsøk blir publisert. NGI vil for egen del fortsette å utvikle egen database i fremtiden, og vil se denne i nær sammenheng med, og videreutvikle tidligere etablerte CPTU-korrelasjoner.

8 Referanser

Aas, G., S. Lacasse, T. Lunne K. Høeg., (1986). Use of in Situ Tests for Foundation Design on Clay. ASCE Conf. in Situ '86, Blacksburg, Virginia, USA, 1968, p. 1-30.

Andersen K.H. and Stenhamar P., 1982, Static plate loading tests on overconsolidated clay. Journal of Geotechnical Engineering 108(7), 918-934.

Andresen A., Jostad, H.P., og Høeg, K., (2002). "Numerical Procedure for Assessing the Capacity of Anisotropic and Strain-Softening Clay", Proc. 5th World Congr. Comp. Mech. – WCCM V, Wien, Østerrike.

Becker, D.E., Crooks, J.H.A., Been, K. and Jefferies, M.G., 1987. Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clay. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, p. 549, 1987.

Berre, T., Schjetne, K. and Sollie, S. 1969. Sampling disturbance of soft marine clays. Proceedings of the ICSMFE, 7. Mexico. Spec. Session, 1. Pp. 21-24.

Berre, T. 1986. Effect of sampling disturbance on undrained static triaxial tests on plastic Drammen clay. Norwegian Geotechnical Institute, NGI Report 56001-3.

Berre, T. 1987. Comparison of fixed piston samplers and a Canadian block sampler on lean Drammen clay. Norwegian Geotechnical Institute, NGI Report 56001-5.

Berre, T., Lunne, T, Andersen, K.H., Strandvik, S., and Sjursen, M., 2007. Potential improvements of design parameters by taking block samples of soft marine Norwegian clays. Canadian Geotechnical Journal, 44: No. 6., June 2007, 698-716.

Bjerrum, L. 1954. Geotechnical properties of Norwegian marine clays. Géotechnique, 4:49-69.

Bjerrum, L. 1967. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. 7th Rankine lecture.

Bjerrum, L. 1972. "Embankments on Soft Ground: State-of-the-Art Report. Proceedings of the ASCE, Specialty Conference on the Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Vol. II, Purdue University, West Lafayette, IN, June, 1972, pp. 1-54.

Bjerrum, L. (1973). "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clay". Proc. 8th ICSMFE, Moscow, Vol.3, pp. 111-159.

Bozozuk, M. 1970. Effect of sampling, size and storage on test results for marine clay. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 483, pp. 121-131.

Casagrande, 1936, The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III, Discussion D-34, p. 60. Boston, June 22 to 26, 1936.

Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S., and Raadim, B., 1987, Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests. *Géotechnique* 37, No. 1, 3-10.

Eide, O and Andresen, A., 1977. Exploration, sampling and in-situ testing of soft clay. State-of-the-art report. Proc., Int. Symp. of Soft Clay, Bangkok, 1977

Geotechnique (VOL. XLII, Number 2, June 1992)

Grimstad, G., Jostad, H.P. og Andresen, L., (2010). "Undrained capacity analyses of sensitive clays using the nonlocal strain approach", 9th HSTAM International Congress on Mechanics Vardoulakis mini-symposia, Limassol, Kypros, 12. - 14. juli, 2010.

Hermann, S. and Jensen, T.G. (2000). CPTU combined with block sampling gave cost saving solutions for Nykirke railway crossing (in Norwegian), Proc. Norwegian Geotechnical Day, Oslo, Nov. 2000, Paper No. 32.

Hvorslev, M, 1949. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes. Report on soil sampling, U.S. waterways experiment station, Vicksburg, p. 521.

Janbu, 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Proc. 3rd European Conference Soil Mechanics, Wiesbaden 1, 19-25.

Janbu, 1985. Soil models in offshore engineering. *Géotechnique* 35, No. 3, 241-281.

Jostad, H.P., og Andresen A., (2004). "Modeling of shear band propagation in clays using interface elements with finite thickness", International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, 9, NUMOG IX. Ottawa, Canada, 2004.

Jostad, H.P., Andresen L og Thakur, V., (2006). "Calculation of shear band thickness in sensitive clays". European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 6. Graz, Østerrike 2006. Proceedings, side: 27-32.

Jostad, H.P., og Grimstad, G., (2011). "Comparison of distribution functions for the nonlocal strain approach", Proc. 2nd International Symposium on Computational Geomechanics, Cavtat-Dubrovnik, Kroatia.

Karlsrud, K.; Aas, G.; Gregersen, O. (1984). "Can we predict landslide hazards in soft sensitive clays? Summary of Norwegian practice and experiences". Proc. International Symposium on Landslides, 4. Toronto 1984. Proceedings, Vol. 1, pp. 107-130. Also publ. in: Norwegian Geotechnical Institute, Oslo. Publication, 158.

Karlsrud (1991). Sammenstilling av noen erfaringer med prøvetaking og effekt av proveforstyrrelse i norske marine leire. NGI report 521500-6.

Karlsrud, K., Lunne, T. and Brattlien, JK. (1996). Improved CPTU Interpretations Based on Block Samples. In Proceedings of the 12th Nordic Geotechnical Conference, Reykjavik, Iceland, June. Iceland Geotechnical Society, Reykjavik, Iceland. Vol. 1, pp 195-201. Also published in NGI Publication No. 202.

Karlsrud, K., (2003). Skjærstyrkeegenskaper av leire og bruk i stabilitetsanalyser. tabilitetsanalyser av skråninger, skjæringer og fyllinger. Kurs Norsk Geoteknisk Forening, Hell 2003. Foredrag 4.2.

Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, D.A. and Stransvik, S. (2005). CPTU correlations for clays. In Proceedings of the XVIth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE, Osaka, Japan. Vol. 2, pp 693-702.

Karlsrud, K., Hernandez-Martinez, F.G. (2013). Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high quality block samples. Sendt for publikasjon til Canadian Geotechnical Journal.

Lacasse, S., Berre, T., and Lefebvre, G. 1985. Block sampling of sensitive clays. In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 12–16 August 1985. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Vol. 2, pp. 887–982. (Also published as Norwegian Geotechnical Institute, Publication 163, 1986.)

Lacasse, S., 1995, Stress-Strain Behaviour: Importance of Mode and Rate of Load Application for Engineering Problems. Keynote Lecture, International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 2, Sapporo, Japan, 887-907.

Ladd, C.C., and Lambe, T.W. 1963. The strength of undisturbed clay determined from undrained tests. Symposium on Laboratory shear testing of soils. ASTM, STP No. 361, pp. 342-371.

Ladd C.C. and Foott, R., 1974. New Design Procedure for Stability of Soft Clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT7, 763-786. July 1974.

Ladd, C.C., (1991). "Stability evaluation during staged construction (22nd Terzaghi Lecture)". "J. of Geotech. Eng., 117(4), 540-615.

Ladd C.C., and DeGroot, D.J. (2003). Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture. 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Culligan, P.J., Einstein, H.H. and Whittle, A.J. Editors. Cambridge, Massachusetts, USA, June 22-26, 2003.

La Rochelle, P. and Lefebvre, G. 1970. Sampling disturbance in Champlain clays. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 483, pp. 143-163.

Lefebvre, G. and Poulin, C. (1979). A New Method of Sampling in Sensitive Clay. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 16 (1). pp. 226-233.

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., and Strandvik, S. 1998. Sample disturbance effects in deep soil investigations. In Proceedings of the Offshore site investigation and foundations behaviour '98. New Frontiers. SUT 1998. pp. 199–220.

Lunne, T., Berre, T., Andersen, K.H., Strandvik, S. and Sjursen, M., 2006. Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays. Canadian Geotechnical Journal, 43: 726-750.

Lunne, T. and Long, M., 2006. Review of long seabed samplers and criteria for new sampler design. Marine Geology 226 (2006), 145-165.

Lunne, T. and Andersen, K.H., (2007). Soft clay shear strength parameters for deepwater geotechnical design. Proc. 6th Int. Site Investigation and Geotechnics Conf. Confronting New Challenges and Sharing Knowledge, 11-13 Sept. 2007, London, UK, pp. 151- 176.

Mesri, G., T.W. Feng, S. Ali, and T.M. Hayat., (1994). "Permeability characteristics of soft clays," Proc. 13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., New Delhi, 2, pp. 187-192.

NGI (1982). Resultater av triaksialforsøk fra 95 mm prøver av kvikkleire fra Ellingsrud. Internal Report 50306, 30 July 1982.

NGI (2003) E18 Bjørvika-Notat 2-G-201- Deformasjonsparametere for bruk i geotekniske beregninger

NGI, 2005. SIP8 – Offshore Geohazards. Correction Methods for Oedometer Tests Theory and Verification. NGI Report No. 20021023-11. 15 August, 2005.

NGI, 2012. Data base for tests on high quality block sampled on clay. Summary of compressibility, strength and deformation parameters in relation to index properties. NGI Report No. 20051014-00-1-R. 22 February, 2012.



Noorany, I and Seed, H.B. 1965. In-situ strength characteristics of soft clays. *Journal of soil mechanics and foundations*. Division ASCE, 91(2). Pp. 49-80.

Schjetne, K. (1971). The measurement of pore pressure during sampling. Proc. 4th Asian ISSMFE- Session on quality of soil sampling, Bangkok. Also publ. NGI Publication No.94.

Skempton, A.W. and Sowa, V.A. 1963. The behaviour of saturated clays during sampling and testing. *Geotechnique*, 23(4), 269-290.

Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, 1983. The permeability of natural soft clays. Part II. Permeability characteristics. *Canadian Geotechnical journal*, 20, 645-660.

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page



Dokumentinformasjon/Document information					
Dokumenttittel/Document title State of the art – blokkprøver			Dokumentnr./Document No. 20120866-01-R		
Dokumenttype/Type of document Rapport/Report		Distribusjon/Distribution Begrenset/Limited		Dato/Date 1. desember 2012	
				Rev.nr.&dato/Rev.No.&date 0	
Oppdragsgiver/Client SVV/NVE/JBV					
Emneord/Keywords Blokkprøver, triaksforsøk, ødometerforsøk					
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, Block 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:	Sidemannskontroll/Colleague review av/by:	Uavhengig kontroll/Independent review av/by:	Tverrfaglig kontroll/Inter-disciplinary review av/by:
0	Originaldokument	VG/ RO	KK/ TBe		
Dokument godkjent for utsendelse/Document approved for release		Dato/Date 1. desember 2012		Sign. Prosjektleder/Project Manager Vidar Gjelsvik	

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 og leder "International Centre for Geohazards" (ICG).

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 and leads the International Centre for Geohazards (ICG).

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

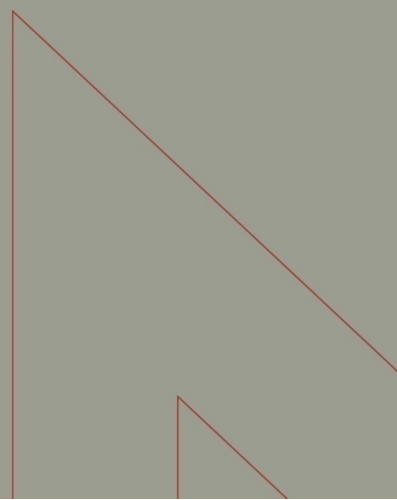
Besøksadresse/Street address:
Pirsenteret, Havnegata 9, NO-7010 Trondheim

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



Utgitt i Rapportserien i 2013

- Nr. 1 Roller i det nasjonale arbeidet med håndtering av naturfarer for tre samarbeidende direktorat
- Nr. 2 Norwegian Hydrological Reference Dataset for Climate Change Studies. Anne K. Fleig (Ed.)
- Nr. 3 Anlegging av regnbed. En billedkavalkade over 4 anlagte regnbed
- Nr. 4 Faresonekart skred Odda kommune
- Nr. 5 Faresonekart skred Årdal kommune
- Nr. 6 Sammenfatning av planlagte investeringer i sentral- og regionalnettet for perioden 2012-2021
- Nr. 7 Vandringshindere i Gaula, Namsen og Stjørdalselva
- Nr. 8 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. Ellen Skaansar (red.)
- Nr. 9 Energibruk i kontorbygg – trender og drivere
- Nr. 10 Flomsonekart Delprosjekt Levanger. Kjartan Orvedal, Julio Pereira
- Nr. 11 Årsrapport for tilsyn 2012
- Nr. 12 Report from field trip, Ethiopia. Preparation for ADCP testing (14-21.08.2012)
- Nr. 13 Vindkraft - produksjon i 2012
- Nr. 14 Statistikk over nettleie i regional- og distribusjonsnettet 2013. Inger Sætrang
- Nr. 15 Klimatilpasning i energiforsyningen- status 2012. Hvor står vi nå?
- Nr. 16 Energy consumption 2012. Household energy consumption
- Nr. 17 Bioenergipotensialet i industrielt avfall
- Nr. 18 Utvikling i nøkkeltall for strømnetselskapene
- Nr. 19 NVEs årsmelding
- Nr. 20 Oversikt over vedtak og utvalgte saker. Tariffer og vilkår for overføring av kraft i 2012
- Nr. 21 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Utstrekning og utløpsdistanse for kvikkleireskred basert på katalog over skredhendelser i Norge
- Nr. 22 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Forebyggende kartlegging mot skred langs strandsonen i Norge Oppsummering av erfaring og anbefalinger
- Nr. 23 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Nasjonal database for grunnundersøkelser (NADAG) – forundersøkelse
- Nr. 24 Flom og skred i Troms juli 2012. Inger Karin Engen, Graziella Devoli, Knut A. Hoseth, Lars-Evan Pettersson
- Nr. 25 Capacity Building in Hydrological Services. ADCP and Pressure Sensor Training Ministry of Water and Energy, Ethiopia 20th – 28th February 2013
- Nr. 26 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Vurdering av kartleggingsgrunnlaget for kvikkleire i strandsonen
- Nr. 27 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. Ellen Skaansar (red.)
- Nr. 28 Flomberegninger for Fedaelva, Kvinesdal kommune, Vest-Agder (025.3A1) Per Alve Glad
- Nr. 29 Beregning av energitilsig basert på HBV-modeller. Erik Holmquist
- Nr. 30 De ustabile fjellsidene i Stampa – Flåm, Aurland kommune Sammenstilling, scenario, risiko og anbefalinger. Lars Harald Blikra
- Nr. 31 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 4 Overvåking og varsling Overvåking ved akutte skredhendelser
- Nr. 32 Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2012. Jonatan Haga
- Nr. 33 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire
- Nr. 34 Kostnadseffektivitet i distribusjonsnettet – En studie av referentene i kostnadsnormmodellen
- Nr. 35 The unstable phyllitic rocks in Stampa – Flåm, western Norway Compilation, scenarios, risk and recommendations. Lars Harald Blikra
- Nr. 36 Flaumsonekart Delprosjekt Årdal i Sogn. Siss-May Edvardsen, Camilla Roald
- Nr. 37 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. Skånsomme installasjonsmetoder for kalksementpeler og bruk av slurry
- Nr. 38 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. Karakterisering av historiske kvikkleireskred og input parametere for Q-BING
- Nr. 39 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. Natural Hazards project: Work Package 6 - Quick clay Characterization of historical quick clay landslides and input parameters for Q-Bing

Rapportserien i 2013 forts.

Nr. 40 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. Skred ved Døla i Vefsn. Undersøkelse av materialeegenskaper

Nr. 41 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. State-of-the-art: Blokkprøver



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

