



Jernbaneverket

Statens vegvesen

# Naturfareprosjektet: Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder

46  
2012

R  
A  
P  
P  
O  
R  
T



Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire

# Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder

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

2012

**Rapport nr. 46/2012**

Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder

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

**Utarbeidet av:** Samarbeidsgruppen SINTEF/Multiconsult

**Forfattere:** Rolf Sandven, Arne Vik, Sigbjørn Rønning (Multiconsult), Erik Tørum, Stein Christensen, Anders Gylland (SINTEF)

**Kontrollert av:** Sigbjørn Rønning (Multiconsult), Stein Christensen (SINTEF)

**Dato:** 21.11.2012

Opplag: P.O.D.

ISBN: 978-82-410-0834-4

Forsidefoto: Forsidebildet viser en blokkprøve tatt i E-6 Møllenberg prosjekt. Bildet er tatt av Rolf Sandven v/Multiconsult.

**Sammendrag:** Etatene Statens vegvesen (SVV), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) har tildelt SINTEF og Multiconsult samlet en rammeavtale under etatsatsningprosjektet Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS), delpakke 6 som omhandler kvikkleire. Innenfor denne rammeavtalen er det gjort avrop på en deloppgave med tittelen Deloppgave 6 SM-6.4.2 "Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder". Delprosjektet tar sikte på å lage en veiledning for hvilke grunnundersøkelser som skal benyttes for kartlegging av sprøbruddsmaterialer, og i hvilket omfang disse skal utføres. I tillegg skal prosjektet videreutvikle dagens tolkningsmetoder med sikte på å forbedre påvisningen av sprøbruddsmaterialer fra sonderingsresultater.

Denne rapporten er delleveransen for dette avropet og beskriver dagens bransjepraksis i forhold til påvisning av kvikkleire fra ulike feltmetoder. Rapporten dekker de utvalgte metodene dreiesondering, dreietrykksondering, totalsondering, CPTU og vingeboing, med sammenstilling mot laboratorieresultater fra opptatte prøver. Det beskrives også mulige feilkilder og avvik i tolkningen for de ulike metodene, belyst med reelle eksempler fra praksis. Eksemplene viser at dagens sonderingsmetoder ikke gir entydig og riktig informasjon om kvikkleireforholdene i alle tilfeller, og at dette i noen grad påvirkes av de opptredende grunnforholdene. Dette er også sammenholdt med svenske erfaringer som viser noenlunde samme mønster.

Rapporten beskriver også forslag til videre utvikling og forskning innenfor dette tema, og det nevnes en rekke forslag til forbedring av praksis, både med utgangspunkt i konvensjonelle og nyere undersøkelsesmetoder. Blant de aktuelle tema for videre bearbeiding nevnes systematisering av et større antall sonderingsresultater fra dreietrykk-/totalsondering og CPTU, etablering av godt dokumenterte forsøksfelt i kvikkleire for nærmere sammenligning av utvalgte målemetoder, samt en nærmere analyse av vingeboforsøket hva angår spenningstilstand, bruddkurve og anisotropiforhold. Det foreslås å legge hovedfokus på videre utvikling av CPTU med måling av resistivitet (R-CPTU), blant annet i kombinasjon med tradisjonell CPTU-tolkning. Det vil også være ønskelig å sammenligne resultater fra R-CPTU med kontinuerlige linjemålinger fra 2D resistivitetsmålinger på overflaten.

**Emneord:** sprøbruddsmateriale, kvikkleire, dreiesondering, dreietrykksondering, totalsondering, CPTU, vingebo, laboratorieforsk, FoU-oppgaver

## Innholdsfortegnelse

1.	Innledning .....	5
2.	Geoteknisk problemstilling .....	5
3.	Geologisk grunnlag .....	6
3.1	Geologiske forutsetninger for kvikkleiredannelse .....	6
3.2	Partikkelkjemi og ionebytteprosesser .....	8
3.3	Geotekniske egenskaper for norske kvikkleirer .....	10
4.	Oversikt over utvalgte grunnundersøkellesmetoder .....	11
5.	Prinsipper for detektering av kvikkleire for ulike undersøkelsesmetoder – dagens praksis .....	12
5.1	Dreiesondering .....	12
5.1.1	Sonderingsprosedyrer - dreiesondering .....	12
5.1.2	Prinsipper for detektering av kvikkleirelag - dreiesondering .....	14
5.1.3	Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning - dreiesondering .....	14
5.2	Dreietrykksondering .....	14
5.2.1	Sonderingsprosedyrer - dreietrykksondering .....	14
5.2.2	Prinsipper for detektering av kvikkleirelag – dreietrykksondering .....	15
5.2.3	Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning - dreietrykksondering .....	16
5.3	Totalsondering .....	17
5.3.1	Sonderingsprosedyrer - totalsondering .....	17
5.3.2	Prinsipper for detektering av kvikkleirelag - totalsondering .....	19
5.3.3	Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning - totalsondering .....	19
5.4	Vingeboring .....	19
5.4.1	Måleprosedyrer – vingeboring .....	20
5.4.2	Prinsipper for detektering av kvikkleirelag – vingeboring .....	21
5.4.3	Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning – vingeboring .....	21
5.5	Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) .....	22
5.5.1	Sonderingsprosedyrer – CPTU .....	23
5.5.2	Prinsipper for detektering av kvikkleirelag – CPTU .....	24
5.5.3	Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning – CPTU .....	25
5.6	Anvendte metoder i Sverige .....	26
5.7	Anvendte metoder i Canada .....	28
6.	Vurdering av dagens tolkningsprosedyrer ved ulike grunnforhold – eksempler .....	29
6.1	Tilfelle A: Laminert leire med sand- og siltlag .....	29
6.1.1	Oppsummering med vurdering av observasjoner .....	32
6.2	Tilfelle B: Sprøbruddsmateriale under tynt topplag .....	33
6.2.1	Oppsummering med vurdering av observasjoner .....	42
6.3	Tilfelle C: Sprøbruddsmateriale under fast og mektig topplag .....	43
6.3.1	Oppsummering med vurdering av observasjoner .....	45
6.4	Tilfelle D: Løs og vannmettet silt/fin sand .....	45
6.4.1	Oppsummering med vurdering av observasjoner .....	47

---

6.5	Tilfelle E: Leire med artesisk poretrykk .....	48
6.5.1	Oppsummering med vurdering av observasjoner .....	49
6.6	Tilfelle F: Andre forhold .....	50
6.6.1	Effekt av spyling ved totalsondering .....	50
6.6.2	Effekt av overkonsolidering og skjærfasthetsvariasjon .....	50
6.6.3	Effekt av redusert stangfriksjon .....	50
6.6.4	Effekt ved sjøboring .....	50
7.	Sammenligning av sonderingsmetodene .....	51
8.	Forslag til mulig videre utvikling i NIFS .....	53
8.1	Etablering av utvalgte forsøksfelt .....	53
8.2	Dreietrykk-/totalsondering – aktuelle utviklingsoppgaver .....	53
8.2.1	Systematisering av tidligere erfaringer .....	54
8.2.2	Bruk av alternative prosedyrer ved gjennomføring .....	57
8.2.3	Modifisering av utstyr .....	57
8.3	Vingebooring – mulige utviklingsoppgaver .....	58
8.3.1	Arbeidskurve fra vingeborforsøk .....	58
8.3.2	Anisotropiforhold fra vingeborforsøk .....	59
8.3.3	Korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet bestemt ved treaksialforsøk og vingebor .....	60
8.3.4	Bestemmelse av omrørt skjærfasthet fra vingebor .....	60
8.4	Trykksondering med poretrykkmåling (CPTU) – mulige utviklingsoppgaver .....	60
8.4.1	Systematisering av tidligere erfaringer .....	60
8.4.2	Bruk av alternative prosedyrer ved gjennomføring .....	63
8.4.3	Detektering av kvikkleire – bruk av kunstig intelligens .....	64
8.5	Måling av spesifikk resistivitet (R-CPTU) – mulige utviklingsoppgaver .....	65
8.5.1	Bakgrunn for og utførelse av R-CPTU .....	65
8.5.2	Resistivitetsmåling for detektering av kvikkleire .....	66
8.5.3	Kombinasjon mellom R-CPTU og 2D måling av resistivitet .....	68
9.	Oppsummering .....	70
10.	Referanser .....	71

### **Vedlegg**

1. Sammenstilling av forsøksresultater – eksempel
2. Oversikt over eksempler på kvikkleirebestemmelse
3. Notasjoner

## 1. Innledning

Etatene Statens vegvesen (SVV), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) har tildelt SINTEF og Multiconsult i samarbeid en rammeavtale under etatsatsningsprosjektet Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS), delpakke 6 som omhandler tema Kvikkleire. Hovedmålsettingen med NIFS-prosjektet er og "Samordne retningslinjer og forbedre verktøy for geoteknisk prosjektering i kvikkleireområder". Innenfor denne rammeavtalen er det gjort avrop på en deloppgave med tittelen "Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder". Delprosjektet tar blant annet sikte på å utarbeide en veiledning for hvilke grunnundersøkelser som skal benyttes for kartlegging av kvikke og sensitive leirer (samlet: sprøbruddsmaterialer), og i hvilket omfang disse skal utføres. I tillegg skal prosjektet videreutvikle dagens tolkningsmetoder med sikte på å bedre påvisning av sprøbruddsmateriale.

Denne rapporten tar utgangspunkt i SVVs notat "Grunnundersøkelsesmetoder for kartlegging av kvikkleire"//. Rapporten er leveransen for dette avropet og beskriver dagens bransjepraksis i forhold til påvisning av sprøbruddsmateriale fra ulike feltmetoder. Det er også lagt vekt på en beskrivelse av mulige feilkilder og avvik for de ulike metodene, belyst med reelle eksempler. I tillegg beskriver rapporten forslag til videre FoU-oppgaver innen dette feltet i løpet av prosjektperioden frem til 2014.

Rapporten er utarbeidet ved at hver av deltakerne i prosjektgruppen SINTEF-Multiconsult, heretter omtalt som prosjektgruppen, har bidratt med innspill gjennom oppstartsmøter og diskusjonsmøter gjennom prosjektperioden. Delansvar for ulike deler av oppgaven er fordelt og har gitt viktige bidrag til hovedrapporten. Følgende personer har deltatt i prosjektgruppen for denne deloppgaven:

Stein Christensen – SINTEF  
Erik Tørum – SINTEF  
Anders Gylland – SINTEF/NTNU

Sigbjørn Rønning – Multiconsult  
Arne Vik – Multiconsult  
Rolf Sandven – Multiconsult (delprosjektleder)

Første del av rapporten beskriver vår forståelse av oppgaven og gir en gjennomgang av dagens praksis hva angår påvisning av sprøbruddsmateriale for de mest benyttede feltmetodene. Utstyr og prosedyrer for gjennomføring av undersøkelsesmetodene er kort beskrevet, sammen med prinsipper for detektering av sensitive materialer, samt usikkerheter og feilkilder i tolkningen. Tolkningsprinsipper og treffsikkerhet er belyst og vurdert ved hjelp av konkrete eksempler hentet fra praksis.

Andre del av oppgaven er fremoverskuende og foreslår videre forsknings- og utviklingsoppgaver som kan forbedre dagens praksis innen detektering av sprøbruddsmaterialer. Det pekes på nyutvikling av utstyr og prosedyrer, uttesting på godt dokumenterte prøvefelt, samt behandling og systematisering av tidligere grunnundersøkelsesdata. Disse vurderingene vil kunne danne grunnlag for videre aktiviteter innenfor dette tema i løpet av prosjektperioden.

## 2. Geoteknisk problemstilling

Indikasjoner på forekomster av kvikke og sensitive leirer er viktige i et hvert prosjekt ettersom dette vil legge føringer for den videre gjennomføring av grunnundersøkelsen. Det påvirker også gjennomføring av rådgivning og prosjektering, samt kontrollrutiner i forhold til dette.



Feltmetodene som benyttes i dag gir i mange tilfeller gode indikasjoner på sprøbruddsmaterialer, men det må likevel gjennomføres prøvetaking og påfølgende laboratoriemålinger for å verifisere forekomstene. I mange tilfeller vil imidlertid indikasjoner på kvikk eller sensitiv leire fra sonderingsprofilene ikke stemme med laboratorieklassifiseringen. Det er derfor et klart behov for å vurdere dagens metoder og detekteringspraksis opp mot disse erfaringene for å oppnå bedre forståelse og videre utvikling, både med hensyn på metodeutførelse i felt og forbedrede tolkningsmetoder.

Arbeidsoppgavene i denne utviklingen er blant annet beskrevet i målformuleringen for denne deloppgaven:

- Tolkningsmetodikk basert på kombinasjon av CPTU og R-CPTU (resistivitetsmåling) for bedre bestemmelse av sprøbruddsmateriale
- Sammenligning av skjærfasthetsverdier fra vinge boring og CPTU
- Geofysiske metoder for kartlegging av kvikkleireområder (resistivitetsmåling nedhulls og på overflaten, grunn seismikk o.a.)
- Bestemmelse av parameterkvalitet i felt og fra laboratorieforsøk
  - Klassifiseringsmetoder
  - Tidseffekter fra prøvetaking til forsøk
- Parameterbestemmelse for sprøbruddsmaterialer
  - Behandling av peak-verdier fra skjærforsøk
  - Vekting av parameterverdier ved bestemmelse av designverdier

I tillegg til de faglige vurderinger som må gjøres, bør også alle aktører i bransjen stimuleres til å benytte de samme metoder og følge de samme kvalitetskrav for å kartlegge sprøbruddsmaterialer. Etater og bestillere må også stille samme krav til omfang av kvalitet. Her må det blant annet stilles krav til at utførende firma skal ha et dokumenterbart kvalitetssikringssystem og råde over faglig ekspertise for å kunne gjennomføre grunnundersøkelsen på en tilfredsstillende måte.

### **3. Geologisk grunnlag**

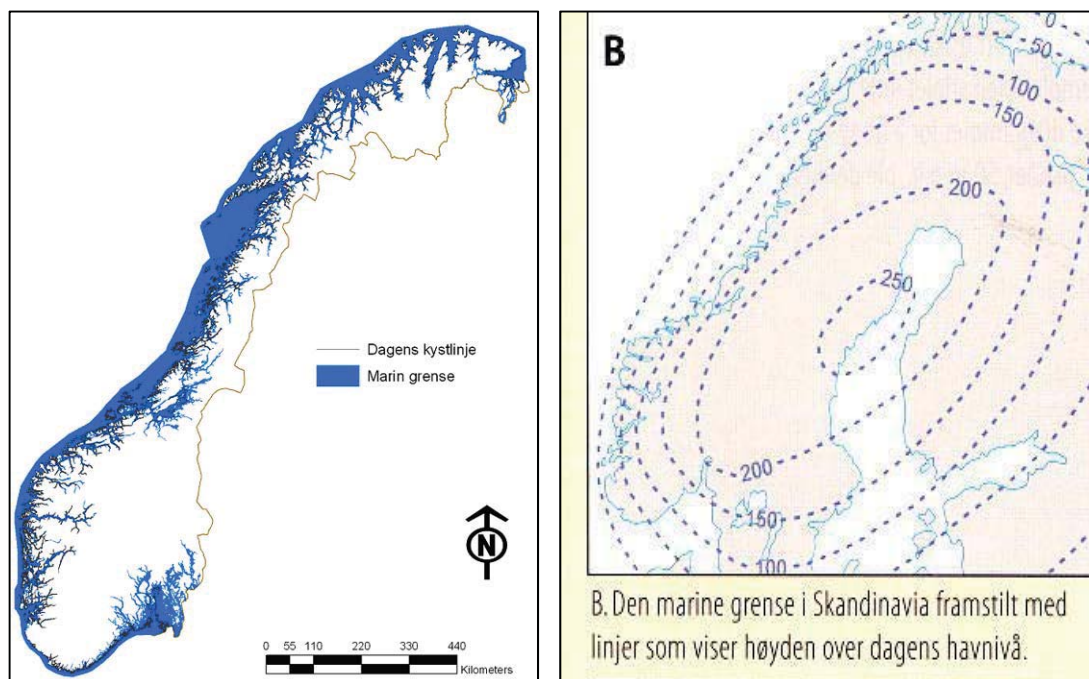
#### **3.1 Geologiske forutsetninger for kvikkleiredannelse**

Ved planlegging av grunnundersøkelsen må en rekke aspekter vurderes i forhold til hvor det kan forventes innhold av sprøbruddsmateriale i grunnen, blant annet de geologiske, topografiske og hydrogeologiske forhold i området, se Figur 1. Studier av topografiske, kvartærgeologiske og hydrogeologiske kart kan gi viktige avklaringer for omfang av grunnundersøkelsen og lokalisering av enkeltborhull. Rimeligvis vil sensitive leirer påtreffes i hav- og fjordsedimenter under den marine grense, men de mektigste leiravsetningene påtreffes oftest i god avstand under ca. 80 % av øverste havnivå i siste istid, Marin grense, se Figur 1. (Rankka m.fl. 2005 /2/). På den annen side har høyereliggende leiravsetninger blitt eksponert for utvasking over en lengre periode enn områder som ligger nær dagens havnivå.

Kvikkleire dannes fra marin leire ved at saltet vaskes ut fra porevannet. Dette kan forekomme på tre prinsipielt forskjellige måter:

- Perkolasjon av regnvann og overflatevann gjennom avsetningen
- Ved oppadrettede hydrauliske gradienter, for eksempel fra artesisk overtrykk i grunnvannet

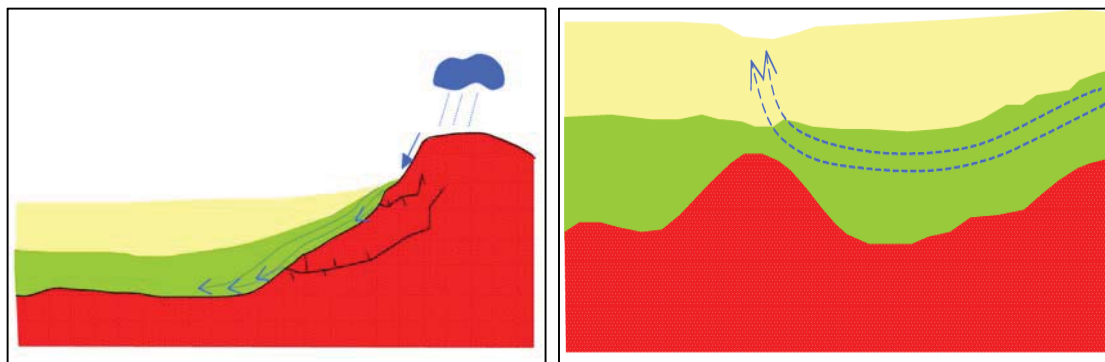
- Diffusjonsprosesser (se kap.3.2) med vandring av salter mot soner med lavere ionekonsentrasjon



Figur 1. Oversikt over Marin grense (MG) i Norge ([www.google.no](http://www.google.no)).

Disse prosessene kan opptre separat eller i kombinasjoner med hverandre. Utvaskingsprosessen av salt i marine leirer er en tidkrevende prosess og vil ta lengre tid jo tykkere sedimentet er. Hvis utvaskingen kun foregår ved diffusjon, er det estimert en diffusjonsrate på kvikkleiredannelse i svenske kvikkleirer på 6-7 m over en periode på 5000 år (etter Rankka m.fl. 2005 /2/).

Forekomst av kvikkleire påtreffes derfor hyppigst i forholdsvis tynne leirlag, eller der leirlagene veksler med lag av grovt permeabelt materiale som kommuniserer med en vannkilde (bergoverflaten, innsjøer, permeable topplag etc.), se Figur 2. Påvisning av slike lag gjøres best ved sonderinger, men studier av geologiske forhold og kjennskap til den geologiske dannelsesprosessen i området vil også kunne være til stor hjelp.



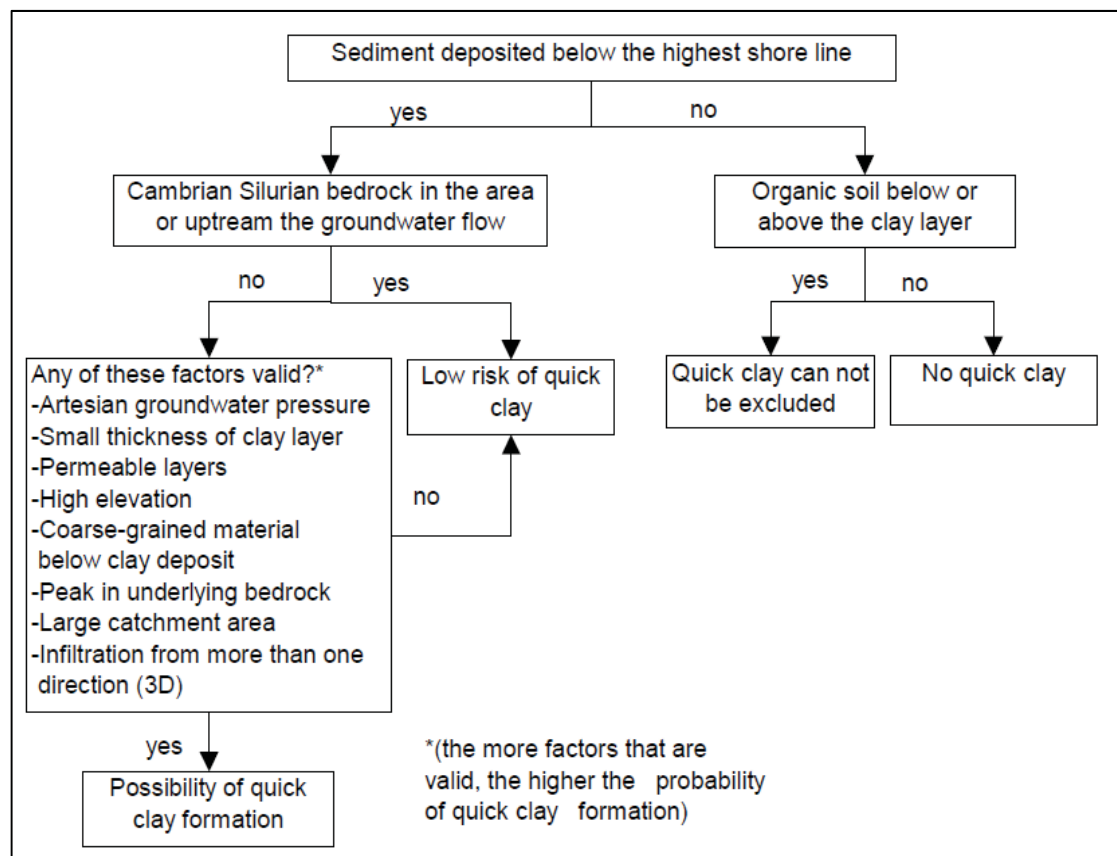
Figur 2. Utvalgte geologiske forutsetninger for utvasking av salt fra marine leirer (etter Rankka m.fl. 2005 /2/).

Lokalisering av bergoverflaten ved hjelp av studier av topografiske kart, sonderinger og/eller bergkotekart, kan også være nyttig ved lokalisering av mulig sprøbruddsmateriale. Der bergoverflaten stikker opp mot terrengoverflaten vil dette påvirke grunnvannsstrømmen og slik føre til utvasking av leire på utstrømningssiden av bergoverflaten. En tilhørende forsenkning av terrengoverflaten kan i slike tilfeller være en indikasjon på en kvikkleirelomme.



I områder med høyt artesisk poretrykk i grunnvannet vil kvikkleire lettere kunne dannes på grunn av oppadrettet vannstrømning. Typiske situasjoner vil være lavereliggende leirterreng nær fjellsider, ofte med vannførende lag av grovt materiale mot berget. Disse lagene vil kunne kommunisere med høyereliggende vannreservoarer, for eksempel fra utstrømmende vann fra bergsprekker oppe i fjellsiden eller ved høyereliggende innsjøer som mater vann inn i de grove lagene. Mulige underliggende lag av grovt materiale er ofte gitt på hydrogeologiske kart. Størrelsen på avrenningsområdet vil også bidra sterkt til vannbelastningen. Nedadrettede gradienter kan ha en tilsvarende effekt som oppadrettede hvis avrenningsforholdene på overflaten er utilstrekkelige, og leirlagene er omgitt av masser med stor vannmagasinerende evne.

I tillegg til forholdene nevnt over vil jordmassenes organiske innhold i noen tilfeller kunne fremskynde dannelsen av kvikkleire på grunn av endringer i ionsammensetningen i grunnvannet. Typiske forhold vil være områder der det forekommer myr eller torv på overflaten, eller der massene generelt inneholder mye humus. Mektige torv- og myrlag inneholder oftest mye vann som også vil være ugunstig med hensyn på kvikkleiredannelse i leirlagene under. Rankka m.fl. (2005) /2/ har i denne sammenheng laget et flytskjema for hjelp til detektering av kvikkleire, se Figur 3.



Figur 3. Flytskjema for geologiske forutsetninger for kvikkleiredannelse (Rankka m.fl. 2005 /2/).

Generelle erfaringer viser imidlertid at tørrskorpe eller forvitrede lag, leirer med høyt organisk innhold samt sterkt overkonsoliderte leirer sjelden er kvikke.

### 3.2 Partikkelkjemi og ionebytteprosesser

Leirer som har vært avsatt i havvann inneholder en viss konsentrasjon av salt, opprinnelig ca. 35 g/l. I en kjemisk sammenheng defineres salter som forbindelser som består av kationer og anioner. Disse opptrer som frie ioner i en løsning, men danner salter ved tørking. I

analyzesammenheng må det derfor skilles mellom det innhold av salter som måles i en mengde porevann som er sugd ut av en leirprøve, og det totale saltinnholdet som også inkluderer adsorptivt bundne ioner til leirpartiklene. Den totale saltkonsentrasjonen i leiren kan bestemmes ved en kjemisk ionebytteanalyse.

Lavt saltinnhold i en marin leire er bare ett av kriteriene som må være oppfylt for å få dannet kvikkleire. Det er likevel ikke slik at alle marine leirer blir kvikke eller høysensitive ved utvasking av salt. For eksempel vil en leire med en tettere struktur, og dermed lavere vanninnhold, ikke være kvikk ved et lavt saltinnhold. En leire som er blitt kvikk kan også stabilisere seg over tid på grunn av langsiktige ionebytte- og aldriingsprosesser, for eksempel ved tilføring av kalsium og magnesium til porevannet.

En leire som avsettes i havvann er bygget opp som en kjede av lange aggregater som er lenket til hverandre gjennom elektrokjemiske forbindelser. Hvis saltet i slike forbindelser blir vasket ut og leiren omrøres kan ikke leirpartiklene på nytt etablere slike aggregatforbindelser. Vannlagringsevnen til leiren uttrykt gjennom flytegrensen avtar, og leiren omformes til et materiale med flytende, lav-viskøs konsistens. Omrørt skjærfasthet er svært liten og sensitiviteten høy. Utvasking kan også medføre en reduksjon i den uforstyrrede skjærfastheten og en økning i materialets kompressibilitet. Det siste skyldes reduksjonen i leirens vannlagringsevne som opptrer ved utvasking, spesielt ved spenningstilstander nær og over forkonsolideringsspenningen.

Ionefordelingen i porevannet har vist seg å være av stor betydning for om leiren utvikler kvikk oppførsel eller ikke. Forskning viser at jo høyere konsentrasjon av enkeltvalente  $\text{Na}^+$  og  $\text{K}^+$  ioner i porevannet, jo større er mulighetene for at leiren blir kvikk. Dobbelvalente  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Mg}^{2+}$  ioner har ikke den samme innflytelsen. Et stort antall enkeltvalente ioner i forhold til dobbelvalente fører til større tykkelse på det diffuse dobbeltlaget rundt leirpartiklene for å opprettholde en elektrokjemisk likevekt mellom partiklene. Dette fører til større frastøtende krefter, og disse kreftene vil forhindre flokkulering av partiklene etter omrøring. Dette reduserer igjen omrørt skjærfasthet og øker sensitiviteten av leiren. Motsatt vil et høyt innhold av multivalente ioner medføre bedre flokkulering og en hurtigere gjenvinning av fastheten.

En rekke faktorer i leirens og porevannets kjemi vil derfor kunne påvirke kvikkleiredannelsen i det naturlige miljø, se Figur 4.

- Vannets hardhetsgrad

Hardt grunnvann vil inneholde et dominerende antall multivalente  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Mg}^{2+}$  ioner. Hvis leiren blir utvasket av hardt vann vil dette normalt ikke medføre kvikkleiredannelse. Utvasking med bløtt vann med et stort innhold  $\text{Na}^+$  ioner vil derimot være gunstig for kvikkleiredannelse. Hardt vann finnes ofte i områder med et stort innhold av kalkstein i berggrunnen.

- Avsetningshistorikk

Undersøkelser i Sverige (Rankka m.fl. 2005 /2/) viser at kvikkleire oftest påtreffes i post-glasiale leiravsetninger, beliggende over glasiale avsetninger, ofte med permeable lag integrert i kvikkleirelagene. Glasiale svenske leirer inneholder ofte en stor mengde kalsiumkarbonat, noe som kan forklares med et stort innhold av kalkstein i berggrunnen. Det høye innholdet av kalsiumkarbonat stimulerer ikke kvikkleiredannelsen. Disse erfaringene kan også være overførbare til norske forhold.

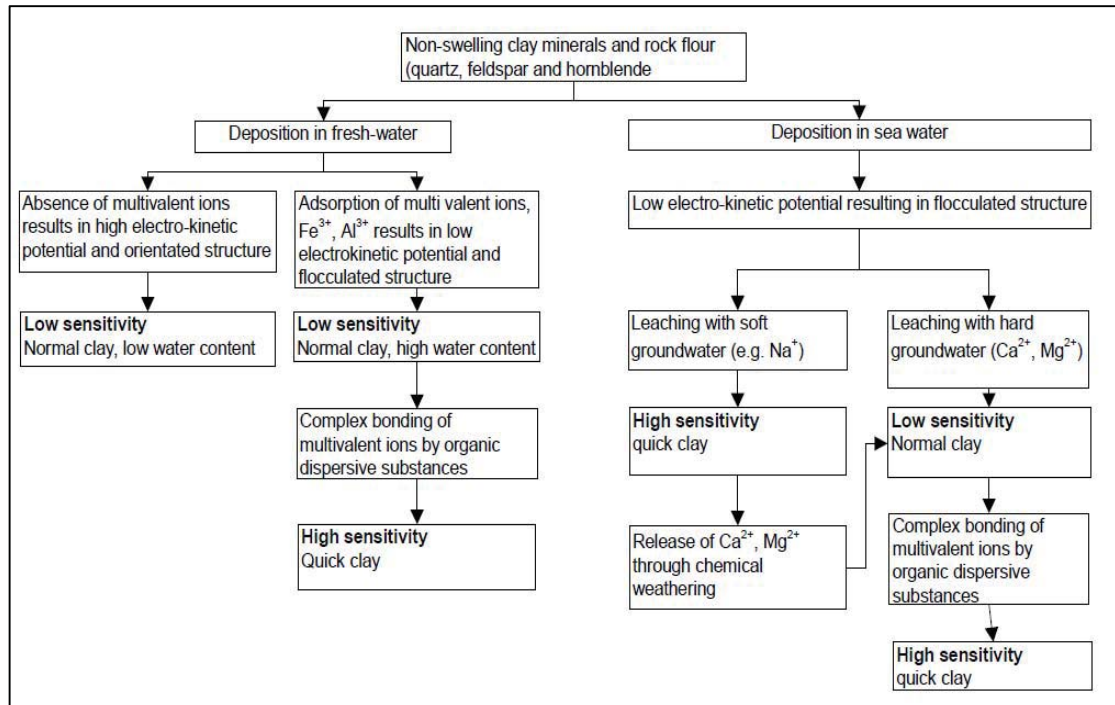
- Surhetsgrad

Surhetsgraden (pH) er viktigst i forbindelse med avsetning av sedimentet, men også senere endringer i kjemisk sammensetning kan påvirkes av surhetsgraden. Blant annet kan oppløst oksygen og karbondioksyd i nedbør redusere surhetsgraden i porevannet slik at multivalente ioner frigjøres fra mineraloverflaten. Dette medfører en reduksjon av leirens sensitivitet. Generelt vil et basisk porevannsmiljø medføre lavere omrørt

skjærfasthet og større sensitivitet enn et surt miljø. Forvitring av leirmineraler kan også endre ionesammensetningen i porevannet

- Innhold av dispergerende stoffer

Innhold av dispergerende stoffer medfører at tykkelsen på det diffuse dobbeltlaget øker på grunn av sterkere negative ladninger. Dette medfører høyere sensitivitet og lavere omrørt skjærfasthet for leiren. Eksempler på stoffer med dispergerende effekt er silikater, fosfater, sulfider og bikarbonater. Noen organiske forbindelser kan også ha denne effekten.



Figur 4. Flytskjema for kjemiske forutsetninger for kvikkleiredannelse (Rankka m.fl.2005 /2/).

### 3.3 Geotekniske egenskaper for norske kvikkleirer

Dette kapittelet oppsummerer kort noen viktige geotekniske egenskaper for norske kvikkleirer. Kvikkleirene avviker fra øvrige leirer ved en svært lav omrørt skjærfasthet og høy sensitivitet, lavere flytegrense, samt relasjoner mellom vanninnhold, konsistensgrenser og aktivitet. Endringer i flytegrense, plastisitetsgrense, omrørt skjærfasthet og sensitivitet opptrer når saltinnholdet i porevannet avtar til under 2 g/l (Torrance, 1976 /3/). Ved utvasking av salt vil vanninnholdet som regel være stabilt, men flytegrensen til leiren reduseres når saltinnholdet faller under 10 g/l.

#### Skjærfasthet og bruddoppførsel

Kvikkleire er i Norge definert som leire med en omrørt skjærstyrke under 0,5 kPa og sensitivitet over 30. Sensitiviteten er forholdet mellom udrenert uforstyrret og omrørt skjærfasthet. I følge Torrance (1976) /3/ kan det være 20 % - 50 % tap av skjærfasthet i en kvikkleire i forhold til en salt marin leire. Forskjellene knyttet til sensitivitet og omrørt skjærfasthet er relatert til leirens mikrostruktur og de fysiske-kjemiske egenskapene til porevannet. Kvikkleire har som følge av egenskapene en typisk sprøbruddoppførsel, der den mister skjærfasthet etter at kornstrukturen har gått til brudd. Sprøbruddegenskaper, lavere udrenert skjærfasthet og svært lav omrørt skjærfasthet er de mekaniske egenskapene som gjør kvikkleire problematisk med tanke på stabilitet og konsekvens av skred

#### Aktivitet og leirmineraler

En nødvendig forutsetning for dannelse av kvikkleire er at sedimentet er dominert av ikke-svellende mineraler med lav aktivitet. Rosenqvist (1978) /4/ fant for eksempel ingen kvikkleirer med mer enn et par prosent innhold av svellemineralet smektitt. Aktiviteten avhenger hovedsakelig av leirens ionebyttekapasitet og den spesifikke overflaten av leiren, samt innhold av organiske kolloider (Hansbo, 1975 /5/). Bjerrum (1955) /6/ samlet opplysninger om leirinnhold og plastisitetsindeks for en rekke naturlige norske leirer. Han fant generelt at norske leirer er lite aktive, med en aktivitet for kvikkleirene  $a < 0,5$ .

#### Poretall, vanninnhold og konsistensgrenser

Tykkelsen av det diffuse dobbeltlaget rundt leirpartiklene avtar hvis saltet vaskes ut av leiren og fnokking av partiklene etter at bindingene er brutt er ikke mulig. Dette fører til en betydelig reduksjon i flytegrensen, mens det naturlige vanninnholdet er tilnærmet konstant. Det er derfor karakteristisk at vanninnholdet er høyere enn flytegrensen for kvikkleirene. Plastisitetsgrensen avtar svært lite ved utvasking, noe som betyr at plastisitetsindeksen  $I_p = w_l - w_p$  avtar for kvikkleirer.

## **4. Oversikt over utvalgte grunnundersøkelsesmetoder**

I dagens grunnundersøkelsespraksis benyttes et relativt lite antall undersøkelsesmetoder, i hvert fall innenfor ordinære prosjekterings- og kartleggingsoppdrag. I forskningssammenheng benyttes noen flere metoder, men heller ikke på dette området er det snakk om et stort metoderepertoar. Følgende metoder er utvalgt for videre behandling:

- Dreiesondering
- Dreietrykksondering
- Totalsondering (dreietrykksondering i kombinasjon med bergkontrollboring)
- Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)
- Vingeboring

Dreiesondering benyttes i liten grad i dagens praksis, men fortjener likevel oppmerksomhet grunnet det store innslaget av dreieboringer i gamle grunnundersøkelser fra 1950-tallet og utover til 1980-tallet. Slagsondering (eller annen dynamisk sondering) benyttes i dag i noen tilfeller, men er med sin grove oppløsning lite påaktet som detekteringsmetode for sprøbruddsmateriale.

I tillegg er in situ målemetoden vingeboring vurdert ettersom dette er den eneste metoden som kan gi omrørt skjærfasthet og sensitivitet ved direkte måling og ikke gjennom indirekte empiriske vurderinger. Metoden er således viktigere ved undersøkelser og utredninger i områder med sprøbruddsmaterialer enn dagens begrensede bruk skulle tilsi.

En beskrivelse av disse utvalgte metodene er gitt i det følgende.

## 5. Prinsipper for detektering av kvikkleire for ulike undersøkelsesmetoder – dagens praksis

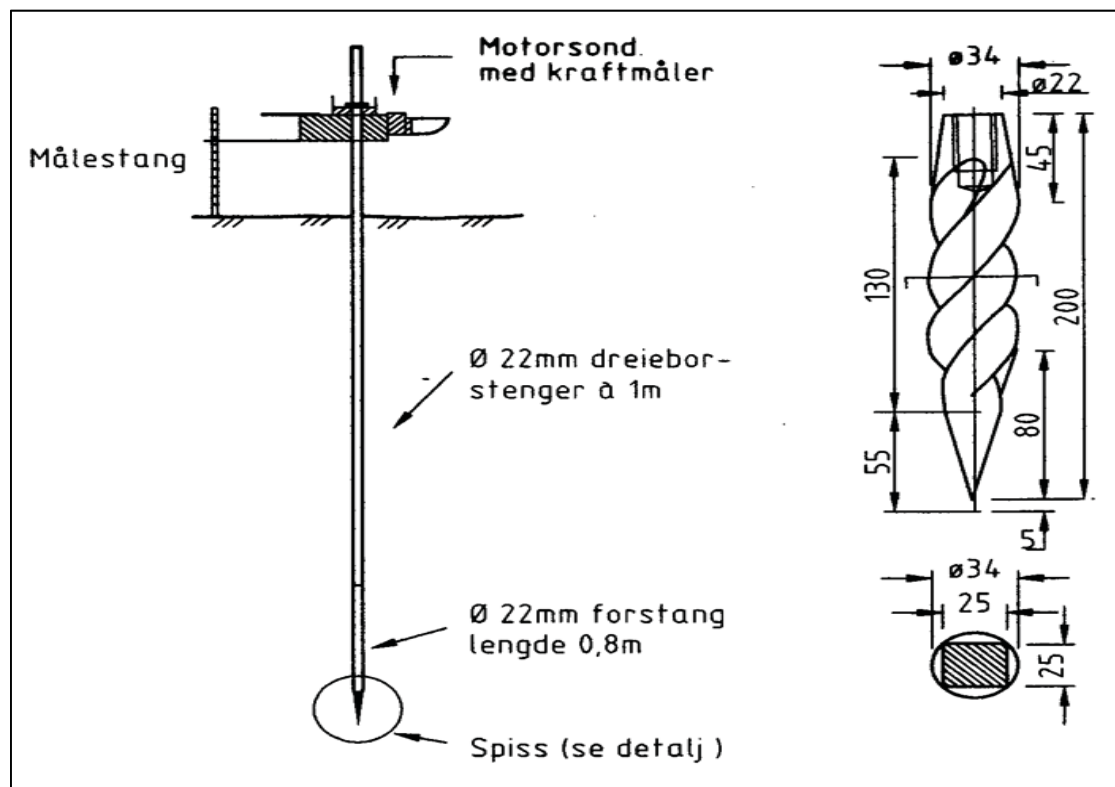
### 5.1 Dreiesondering

Dreiesondering er et enkelt sonderingsutstyr som benyttes for å gi en orientering om grunnens relative fasthet og dybden til faste lag. Resultatene kan til en viss grad benyttes til å vurdere om grunnen består av grusige, sandige eller leirige materialer. Metoden anvendes i hovedsak i løse til middels faste jordarter med lite stein, og der det er vanskelig å komme til med tyngre borutstyr. Sonderingsresultatene kan gi grunnlag for utvelgelse av andre metoder, samt lokalisering av prøvetaking og in situ målinger.

Dreiesondering var tidligere en mye benyttet sonderingsmetode og data fra eldre grunnundersøkelser inneholder ofte dreieboringsresultater. Etter hvert som behovet for riggbasert sondering og større nedpressingskapasitet økte er metoden erstattet av tyngre og mer effektive sonderingsmetoder.

#### 5.1.1 Sonderingsprosedyrer - dreiesondering

Boringen kan utføres for hånd eller ved motordrift, se Figur 5. Motstanden mot nedtrengning registreres i løs jord som den trinnvise pålagte belastning (inntil 100 kg) som gir jevn synk.



Figur 5. Dreieborutstyr med borspiss (etter Statens Vegvesen Håndbok 280 /71).

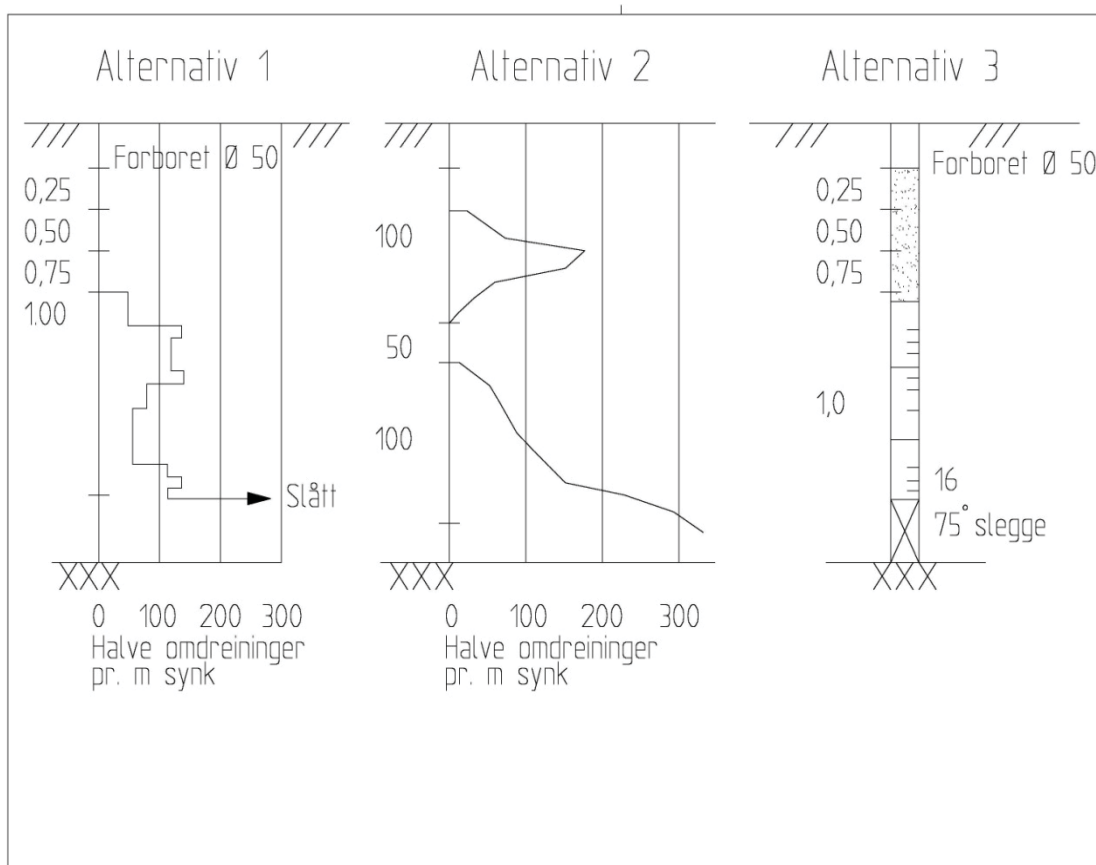
Belastningstrinnene ved utførelse av metoden er som følger:

- Boret synker av egen vekt
- Ved synk mindre enn 2 m/min, økes et lasttrinn
- Lasttrinnene er: 0,05 – 0,15 – 0,25 – 0,50 – 0,75 – 1 kN
- Ved last større enn 1 kN startes rotasjon av stangsystemet.

- Dreihastigheten skal være mellom 15 og 40 omdreininger/min
- Antall halve omdreininger registreres ved rotasjon av boret
- Synkningen etter hver lastøkning skal ha opphørt og spissens dybde notert før hver ny belastning påføres. Når synkningen er mindre enn ca.2 m i minuttet, økes belastningen.
- Synker boret med mer enn 3 m i minuttet lastes det av til et lavere trinn.
- Trenger ikke boret ned ved rotasjon, slår man på boret og registrerer synk pr. slag eller pr. tidsenhet.

Synker boret med mindre enn 2 m i minuttet ved full belastning, 1 kN (100 kg), startes dreieing av boret. Boret dreies kun ved 1 kN (100 kg) belastning. Motoren skal av hensyn til vibrasjonene stoppes når boret ikke dreies.

Ved dreieing av boret registreres antall halve omdreininger pr. 20 cm synk eller synk pr. 25 halve omdreininger. Resultatene fra dreiesonderingen kan tegnes opp ved å avsette antall halvomdreininger pr. m synk av boret langs horisontalaksen, se Figur 6 Alternativene 1 og 2. Forboringedybde markeres og diameter angis i mm. Belastningen i kN angis på borhullets venstre side. Boreresultatene kan også fremstilles i diagram med bruk av tverrstreker, se Figur 6 Alternativ 3. Hel tverrstrek tilsvare 100 halvomdreininger, mens halv tverrstrek benyttes for hver 25 halvomdreining. Synking uten dreining markeres med skyggelegging eller raster. Mindre enn 25 halvomdreininger vises ved å skrive antall halvomdreininger på høyre side. Neddriving ved slag på boret vises med kryss, eventuelt angis slagantall og redskap.



Figur 6. Presentasjon av resultater fra dreiesondering (etter NGF Melding 3/13/).



### 5.1.2 Prinsipper for detektering av kvikkleirelag - dreiesondering

Ved gjennomføring av dreiesondering vil den sikreste indikasjonen på kvikkleirelag være at boret synker jevnt for mindre belastning enn 1,0 kN. Jo mindre last, jo bløtere antas materialet i grunnen å være. Dette er likevel ingen entydig bestemmelse av kvikk eller sensitiv leire da også andre materialer kan gi slik oppførsel av boret. Figur 6 (Alternativ 2) viser et eksempel på sondering gjennom et kvikkleirelag der boret har sunket for 50 kg loddbelastning uten rotasjon.

For opptegning etter Alternativ 2 i Figur 6 vil dybdeintervaller der strekene ligger med stor avstand indikere bløtere eller sensitive lag.

### 5.1.3 Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning - dreiesondering

Dreiesondering registrerer antall halvomdreininger og loddbelastning på overflaten av stangsystemet. Dette betyr at friksjon mot borstengene vil være et økende problem med dybden, og kan medføre at tynnere, bløte eller sensitive lag ikke vil fremstå klart på sonderingsprofilen. Slike hendelser vil være avhengig av grunnforholdene i de øvre lagene, tykkelsen av det aktuelle sensitive laget og hvorvidt det er forboret gjennom faste topplag/tørskorpe. For å få korrekte resultater må det derfor ved enkelte typer grunnforhold forbores gjennom fyllmasser, tørskorpeleire og eventuell tele (teledybden noteres) for å redusere friksjonen mot borstrengen. Dette vil gi et riktigere bilde av den relative fastheten av underliggende grunn. Antall halve omdreininger pr. dybdeenhet kan være forskjellig ved motorboring og ved handboring.

## 5.2 Dreietrykksondering

Dreietrykksondering er en normert sonderingsmetode som går ut på å trykke borstenger ned i bakken med konstant hastighet og med konstant omdreiningshastighet. Sonderingsmotstanden registreres som det trykk mot boret som skal til for å oppnå den normerte nedpressingshastigheten.

Dreietrykksonderinger brukes i de fleste typer masser, fra leire til grus. Metoden kan benyttes til bestemmelse av lagdeling i løsmasser og dybde til faste eller bæredyktige lag. Metoden har forholdsvis god evne til å trenge ned i og gjennombore faste jordarter, men vil stoppe mot stein og blokk. Dreietrykksondering gir ikke pålitelig påvisning av berg, men kan gi en indikasjon på bergdybden. Resultatene fra dreietrykksondering gir grunnlag for å tolke jordart og relativ lagringsfasthet i grunnen.

### 5.2.1 Sonderingsprosedyrer - dreietrykksondering

Prinsipp for dreietrykksondering er vist i Figur 7. Metoden gjennomføres ved å penetrere borstengene ned i grunnen ved en kombinasjon av rotasjon og statisk trykk. Ved nedpressing skal boret ha:

Nedpressingshastighet:  $3 \pm 0,5$  m pr. min.

Dreiehastighet:  $25 \pm 5$  omdreininger pr. min.

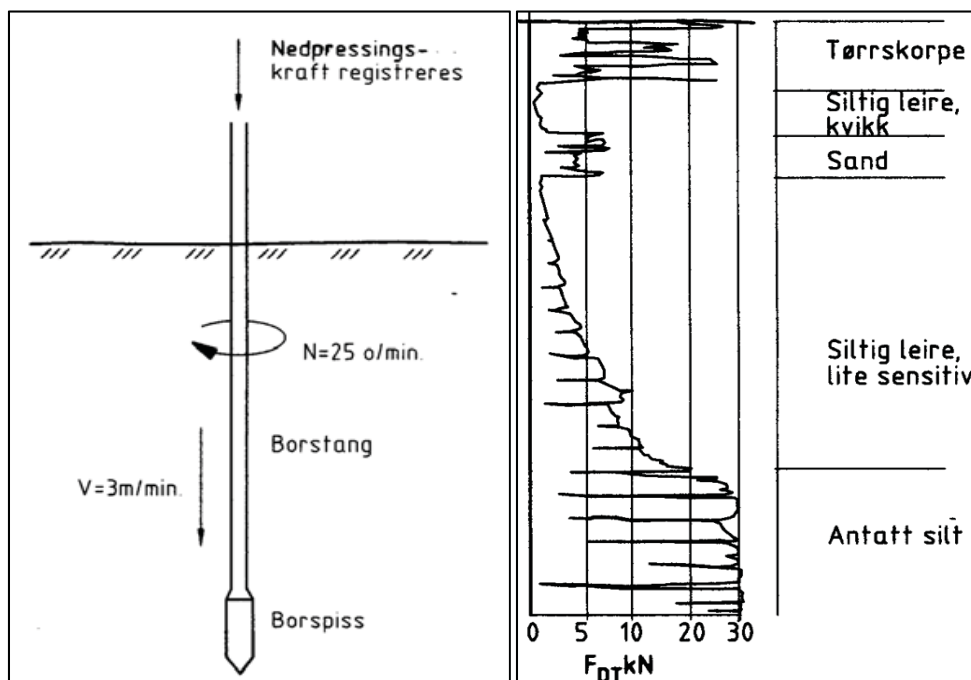
Det er nødvendig å benytte hydraulisk drevet borrhjelp med minimum nødvendig dreiemoment 1,0 kNm og nedpressingskapasitet 30 kN ved gjennomføring av metoden. En lastmåler montert på borrhjelpen registrerer nedpressingskraften under disse betingelsene. Kraften registreres på et diagram med dybdemålestokk 1:200 og bi-lineær skala 0-10 kN = 25 mm og 10-30 kN = 25 mm. Et eksempel på sonderingsdiagram er vist i Figur 7.

I gjennomføringen starter rotasjonen før trykkingen starter. Sonderingen fortsetter til borspissen stopper mot berg, blokk eller fast grunn. Når motstanden blir for stor kan sonderingen føres videre ved å øke dreiehastigheten, og /eller at det benyttes pumping ved at borstangen føres opp og ned samtidig med at boret dreies for eventuelt å penetrere faste lag.

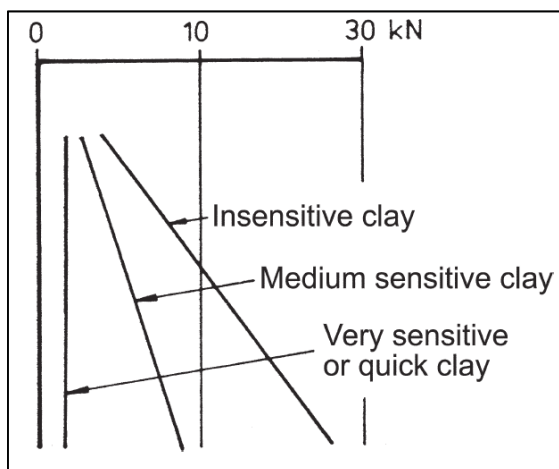
Når nedpressingskraften overstiger 30 kN eller når det pumpes, vil sonderingskurven ikke gi sikre holdepunkter for bestemmelse av materialtype.

### 5.2.2 Prinsipper for detektering av kvikkleirelag – dreietrykksondering

Når borspissen penetrerer nedover i grunnen vil sonderingsmotstanden avhenge av hvilket material som påtreffes, og sonderingskurven kan derfor benyttes til erfaringsbasert tolkning av grunnforholdene. Materialtype og lagringsbetingelser kan vurderes, med mindre innholdet av stein er for stort og materialene for fast lagret. Det er den standardiserte utførelsen og utformingen av borspissen som gir grunnlag for tolkning av resultatene. Siltlag i leire vil for eksempel karakteriseres med en plutselig økning i nødvendig nedpressingskraft og slik vil det som regel være en tydelig grense mellom leire og friksjonsmaterialer. Det vil også være en tydelig grense mellom tørrskorpeleire/forvitret leire og intakt leire.



Figur 7. Prinsipp for og sonderingsresultat fra dreietrykksondering (etter NGF Melding 7/9/).



Figur 8. Prinsipiell helning på sonderingskurven for leirer med forskjellig sensitivitet (etter NGF Melding 7/9/).

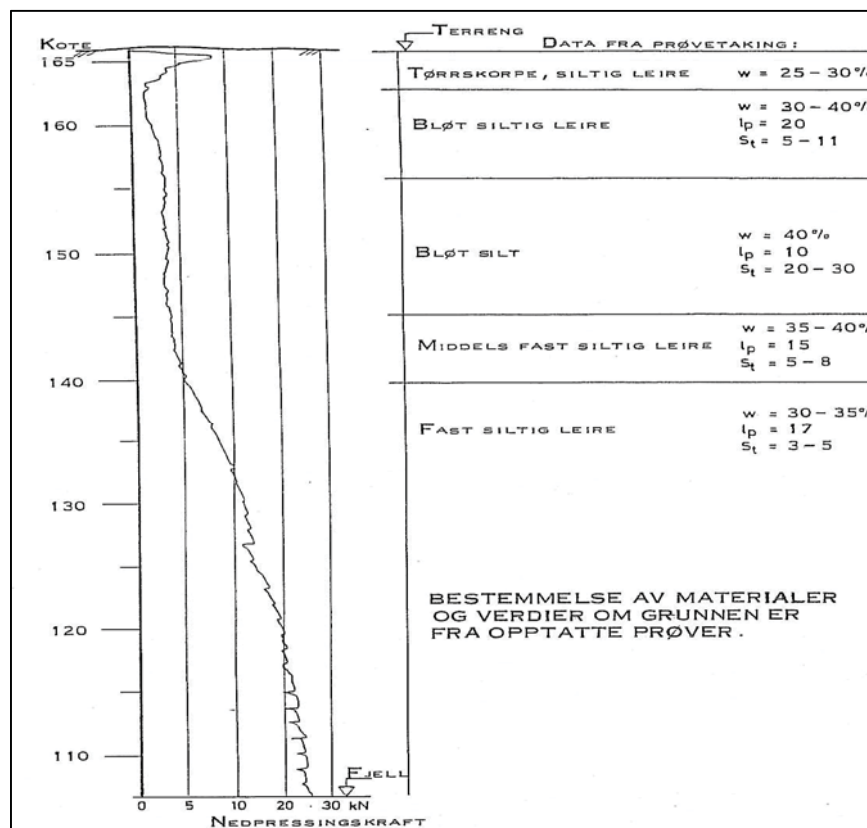
Registreringskurven ved sondering i leire kan benyttes til å bestemme sensitiviteten av leirmassene, se Figur 8. Som vist i figuren vil varierende sensitivitet i leiren markeres med forskjellig helning av sonderingskurven. Kvikk eller meget sensitiv leire vil gi tilnærmet vertikal helning på sonderingskurven, mens lite sensitive leirer gir markert økning av sonderingsmotstanden med dybden.

Sensitivitetens innflytelse forklares ved at omrørte, sensitive masser gir mindre friksjonsbidrag mot stengene. I kvikkleire eller ved meget sensitive leirer ( $S_t > 20-30$ ) vil friksjonsbidraget bli marginalt på grunn av de omrørte massenes flytende karakter. Dette vil gi tilnærmet vertikal strek dersom forholdene for øvrig ikke endrer seg ved dybden.

I tillegg vil kvikkleirenes kollapsestendens ved økende skjærtøyninger kunne gi redusert spissmotstandsbidrag, noe som kan påvises som avtagende motstand med dybden (negativ helning på sonderingskurven).

### 5.2.3 Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning - dreietrykksondering

Detektering fra dreietrykksondering er i hovedsak vurdert ut ifra formen på sonderingsprofilen, i mindre grad på registrert nedpressingskraft. Størrelsen på nedpressingskraften kan imidlertid være nyttig å vurdere, spesielt hvis kombinasjonen lav kraft – konstant eller avtagende sonderingsmotstand inntreffer. Vurdering av nedpressingskraften betinger imidlertid at lastcellen på boreriggen er nøyaktig kalibrert, slik at registrert nedpressingskraft gir et riktig bilde av grunnforholdene. I de fleste løsmasser vil økende friksjon langs borstengene gi en økende nedpressingskraft med dybden. I en meget sensitiv eller kvikk leire blir økning i friksjonen langs stengene tilnærmet lik 0. Dermed får man ingen økning i nedpressingskraft med dybden dersom forholdene forøvrig ikke varierer.



Figur 9. Sonderingsprofil fra dreietrykk i lagdelte masser (etter NGF Melding 7/9/).

I enkelttilfeller er det påvist at selv profiler med konstant eller avtagende sonderingsmotstand ikke nødvendigvis skyldes innhold av kvikkleire i grunnen. Flere forhold kan forårsake sonderingsprofiler som kan feiltolkes som kvikkleire, eksempelvis:

- Sondering i løs, vannmettet silt kan gi tilnærmet konstant sonderingsmotstand ved nedpressing på grunn av kollaps i siltmassen under borspissen og lite utviklet friksjon. Spesielt gjelder dette ved liten overdekning og relativt løse masser over siltlaget. At løse, vannmettede siltlag geoteknisk sett kan være like vanskelige å håndtere som kvikkleire er for øvrig en interessant observasjon her.
- Overgangssoner fra fastere til løsere homogene finsandlag kan også gi partier med avtagende sonderingsmotstand og forholdsvis jevne sonderingskurver som kan være lik kvikkleirerespons i formen. Som regel er imidlertid nedpressingskraften større i disse tilfellene.
- Påtreffes tykkere lag med høyt organisk innhold vil dette gi meget lav nedpressingsmotstand og i noen tilfeller medføre vertikal kurveform, noe avhengig av omvandlingsgraden. Lite omvandlet organisk materiale viser relativt høy friksjon, som vil medføre økende nedpressingskraft med dybden.
- Siltig utvasket leire med hyppige siltlinser og -lag kan representere en situasjon der leirlagene er sensitive, mens nedpressingsmotstanden vil være økende med dybden på grunn av friksjonsbidraget i siltlagene.

Disse forholdene er nærmere eksemplifisert med utvalgte resultater i kap.6.1.

### **5.3 Totalsondering**

Metoden brukes til å bestemme lagdeling i løsmasser og dybder til fast grunn og berg og gir muligheter til å bore gjennom stein/blokk. Resultatene kan gi grunnlag for å bedømme jordarter og vurdere relativ fasthet i løsmassene. Metoden kan benyttes for verifisering av bergoverflaten ved å bore minimum 3 m i berg.

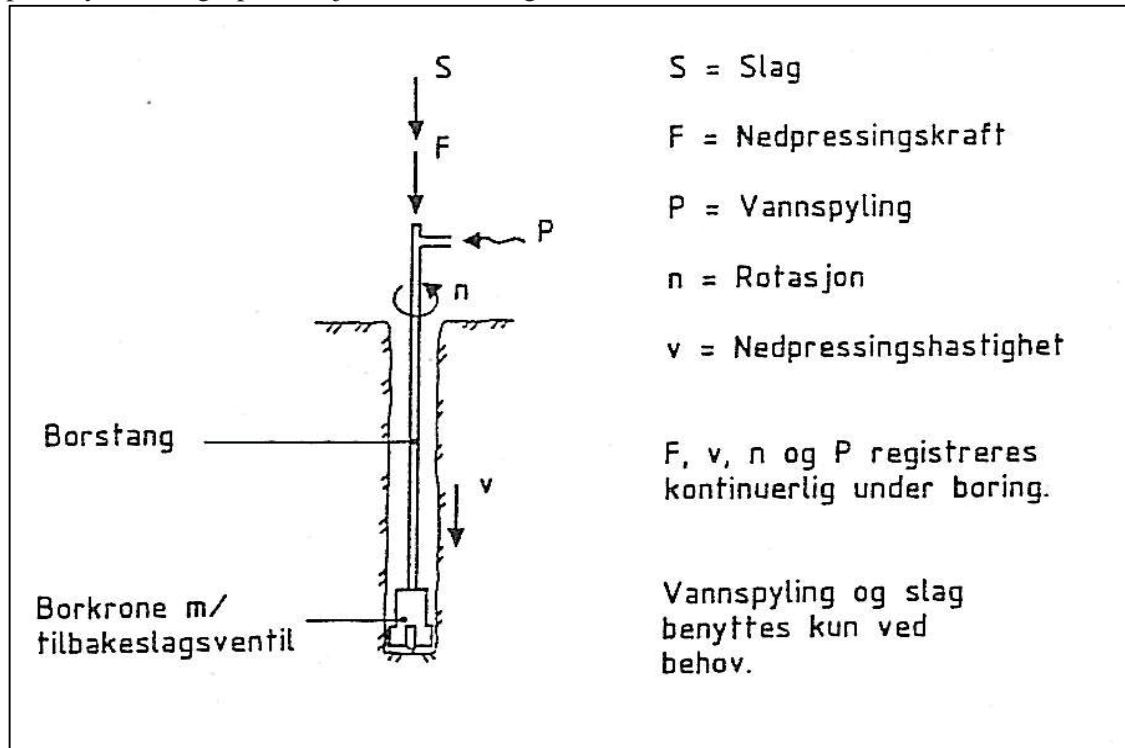
#### **5.3.1 Sonderingsprosedyrer - totalsondering**

Totalsondering kombinerer sonderingsprinsippene fra metodene dreietrykksondering og fjellkontrollboring. Metoden brukes til å bestemme lagdeling i løsmasser og dybder til fast grunn og berg. Resultatene gir grunnlag for å identifisere jordarter og vurdere relativ fasthet i løsmassene og berggrunnen.

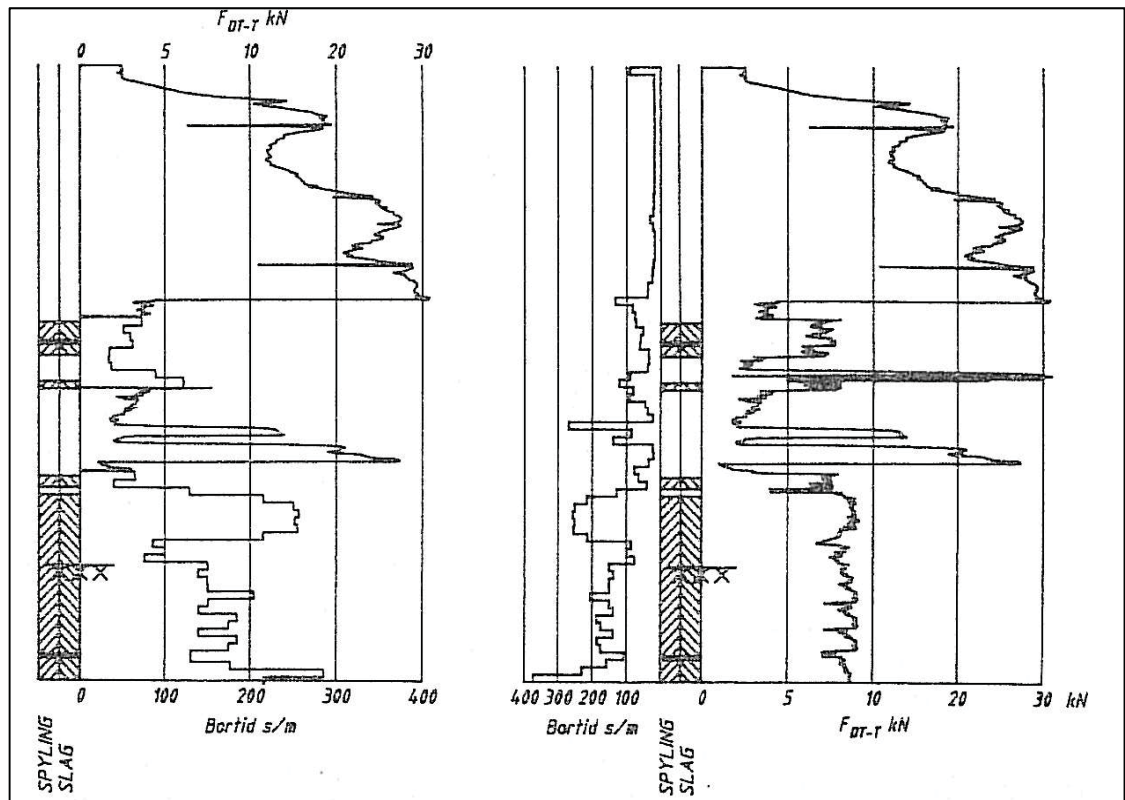
I dreietrykksonderingsmodus dreies og trykkes stenger ned i bakken med konstant hastighet og konstant dreiehastighet, se kap.4.2 og Figur 10. Hvis dette prinsippet ikke gir borsynk går en over til fjellkontrollboring. Dette innebærer at funksjonene slag og spyling kobles til under rotasjon av boret med normert dreiehastighet og normert matekraft. Det er da mulig å bore gjennom steiner og blokker, samt å utføre verifiserende boring i berg med minimum 3 m penetrasjon.

For å utføre totalsondering må det benyttes en hydraulisk drevet borrhjelm med slagborhammer og spylesystem. Bruk av vann som spylemedium er standard. Luft kan benyttes i de tilfeller hvor det er vanskelig med tilførsel av vann, samt i perioder med streng kulde. Nedpressingskraften registreres med elektronisk registreringsenhet eller hydraulisk kraftmåler. Bruk av økt rotasjon, slag og spyling markeres under boringen. Ved avvik fra normert verdi skal bortid måles i intervaller på 0,2 m, evt. 0,5 m ved manuell registrering. Sonderingen utføres med de normerte hastigheter, og fortsetter til borspissen stopper mot berg, blokk eller fast grunn, eventuelt avtalt dybde. Når sonderingsmotstanden blir for stor, skal sonderingen føres videre ved først å øke rotasjonshastigheten, deretter anvendes spyling med normert

hastighet, dernest slagboring med spyling og rotasjon som introduseres hvis de øvrige prosedyrer ikke gir penetrasjon av borestrengen.



Figur 10. Prinsipp for totalsondering (Kolstad, 1987) (etter NGF Melding 9/10/).



Figur 11. Anbefalt optegning av resultater fra totalsondering (etter NGF Melding 9/10/).

Normal sonderingsprosedyre (dreietrykksondering) skal gjenopptas så snart som mulig etter passering av blokk eller faste lag.

Sonderingsresultatene presenteres i bordiagram med kontinuerlig kurve for nedpressingskraft der hvor sonderingen er utført med normert nedpressingshastighet, se Figur 11. Eventuell bruk av økt rotasjon markeres med kryss og kurve for nedpressingskraft tegnes opp. Bruk av slag og spyling markeres med skravur i de angitte kolonnene. Resultatpresentasjonen kan også inneholde tolkning med hensyn til beskrivelse av materialene i grunnen.

### 5.3.2 Prinsipp for detektering av kvikkleirelag - totalsondering

Erfaringer som er etablert for dreietrykksondering over mer enn 20 år har gitt grunnlag for å tolke grunnforholdene på grunnlag av registrert sonderingsmotstand også for dreietrykkmodus i totalsondering. Det henvises derfor til kap.5.2.2 hva angår prinsipper for detektering.

### 5.3.3 Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning - totalsondering

I middels fast, lite sensitiv leire er stangfriksjonen vesentlig, også for totalsonderingsutstyret. Stigningen på matekraftkurvene synes å være den samme som i dreietrykksondering. Stangfriksjonen er svært beskjedent i sand, grus, sensitiv- og kvikkleire, samt i bløte siltige masser. Borhullet vil være lite utsatt for gjensiging, slik at stangfriksjonen vil være mindre dominerende enn i bløtere, ikke-sensitive leirer.

Med bakgrunn i en del parallellboringer med dreietrykk- og totalsonderinger, er det mulig å komme med enkelte kommentarer på tolkningen av dreietrykkdelen av en totalsondering. Endringen på utstyret påvirker i mindre grad selve formen på sonderingsprofilen. Matekraftutslaget for totalsonderingen er oftest lik eller større enn matekraftutslaget til en dreietrykksondering, og forskjellen er avhengig av hvilke masser det sonderes i.

Følgende faktorer kan oppgis som orienterende:

	$Q_{total}/Q_{dreietrykk}$
- Siltig leire/leirig silt:	1 – 1,5
- Kvikkleire:	1 – 1,5
- Leire, middels fast, lite sensitiv	1 – 1,5
- Meget fast leire:	3 – 5
- Ensgradert sand, grusig sand:	2 – 3

Rotasjonshastigheten innvirker imidlertid en del på utslaget til matekraften under kontinuerlig nedpressing. I masser som inneholder mye silt (sandig silt/siltig sand) er reduksjonen omkring 40-50 % ved økning fra standard rotasjonshastighet (25 omdreininger/min) til 50 omdreininger/min. Den samme reduksjonen kan forventes ved sondering i middels fast, lite sensitiv leire. I sand viser reduksjonen matekraft seg å være mer beskjedent, omkring 20 – 30 %. I lite sensitive leirer, hvor stangfriksjonen er betydelig, må en ha klart for seg at resultatene kan påvirkes av spyling utført på et høyere nivå. Spylingen vil nærmest oppheve stangfriksjonen over det nivå der en sluttet å spyle. En må med andre ord betrakte videre sondering som om terrenget er i den dybde der spylingen ble avsluttet. Dette kan i enkelte tilfeller feilaktig gi inntrykk av særdeles bløt eller sensitiv leire, se for øvrig kap.6.6.1.

## 5.4 Vingebooring

Vingebooring brukes til å bestemme udrenert og omrørt skjærfasthet i leire og leirig silt. Det må på forhånd kontrolleres ved sondering at jordarten er egnet for metoden. Resultatene brukes



ved vurdering av bæreevne og stabilitet, men vingeboring bør ikke brukes som eneste metode til bestemmelse av skjærfastheten.

#### 5.4.1 Måleprosedyrer – vingeboring

En komplett vingeborutrustning består av en nederdel med vingesko og ving, innerstenger, ytterrør og et registreringsinstrument, se Figur 12. Vingen, som får påskrudd innerstenger og ytterrør er trukket inn i en beskyttelsessko under nedpressingen. Vanligvis består vingen av fire rektangulære plater som parvis står i rett vinkel på hverandre.

Standardstørrelse for aktuelle vinger for norske forhold er:

Liten vinge: 55 • 110 mm

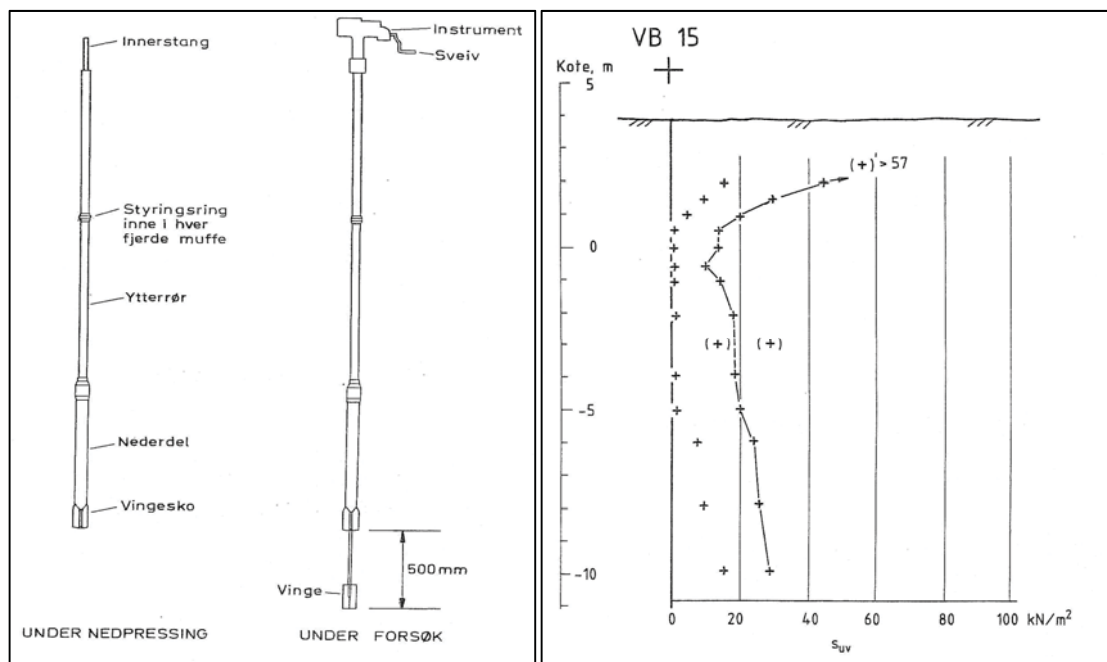
Anbefalt for arbeidsområdet  $s_{uv} = 30 - 100 \text{ kN/m}^2$

Stor vinge: 65 • 130 mm

Anbefalt for arbeidsområdet  $s_{uv} < 50 \text{ kN/m}^2$

Vingedimensjon 65 • 130 mm anbefales også for nøyaktig måling av omrørt skjærfasthet  $s_{rv}$ , eksempelvis ved kartlegging av kvikkleire.

Vingeforsøk foretas i dybdeintervaller (ofte hver 0,5 eller 1,0 m) avhengig av problemstilling, grunnforhold og dybder. Før måling presses vingen ned i uforstyrret leire på den dybden målingen ønskes foretatt. Her påføres vingen et økende torsjonsmoment til materialet rundt vingen går til brudd. Det torsjonsmomentet som skal til for å dreie vingen med en gitt hastighet betegnes som det maksimale torsjonsmomentet og gir grunnlag for å bestemme materialets udrenerte skjærfasthet  $s_{uv}$ . Vingens rotasjonshastighet nær og ved brudd skal være ca. 0.2°/s. Forsøket bør føres til brudd i løpet av 1-3 minutter. Det forutsettes at bruddflaten er den sylinder som omskriver vingen (Cadling & Odenstad 1950 /11/). Ved bruk av borerigg utføres dreiningen ved hjelp av en elektrisk motor på instrumentet. Denne påfører dreiemoment direkte på vingen med en fast, normert hastighet.



Figur 12. Vingeborforsøk (etter NGF Melding 4 /12/).

- a) Situasjon ved nedpressing av utstyr og ved forsøkskjøring,  
b) Fremstilling av resultater fra vingeborforsøk.

Den udrenerte skjærfastheten ( $s_{uv}$ ) forutsettes fullt mobilisert og like stor over hele bruddflaten, og bestemmes fra følgende formel:

$$s_{uv} = 6T/7\pi D^3 \quad (1)$$

der:

T: målt maksimalt torsjonsmoment

Den omrørte skjærfastheten ( $s_{rv}$ ) bestemmes etter minst 25 hele, hurtige omdreininger av vingen. Det foretas to avlesninger med vingehastigheter 0,2°/s, og med instrumentet dreid 90° mellom hver avlesing. Den laveste verdien benyttes. Den omrørte skjærfasthet ( $s_{rv}$ ) bestemmes ut fra samme formel som den uforstyrrede verdien.

$$s_{rv} = 6T_r/7\pi D^3 \quad (2)$$

der:

$T_r$  = torsjonsmoment ved måling på omrørt materiale

Ønsker man å registrere deformasjonsegenskaper og restskjærfasthet, kreves det en arbeidskurve som fortrinnsvis tegnes opp automatisk. En slik kurve vil også gi muligheter til å vurdere om leiren er forstyrret, og eventuelle uregelmessigheter ved forsøket. Opptegningen skjer i henhold til Figur 12.

Ved bestemmelse av udrenert skjærfasthet fra vingebor må resultatene korrigeres i forhold til gjennomsnittlig effektivt overlagingstrykk langs glideflaten og materialets plastisitetsindeks  $I_p$ . Veiledning for korreksjonene er blant annet gitt av Aas (1976) /14/.

#### **5.4.2 Prinsipper for detektering av kvikkleirelag – vinge boring**

Detektering av kvikkleire fra vinge boring er basert på måling av torsjonsmomentet etter fullstendig omrøring av leiren i bruddsonen (25 omdreininger av vingekorset før ny måling). Torsjonsmomentet bestemmes som stabil verdi etter omrøring og forutsettes å være like stor langs hele bruddflaten. Det forutsettes videre at måleinstrumentet er riktig kalibrert, at vingeborustyret er godt vedlikeholdt med rette stenger og uskadet vingekor og at friksjonen er redusert til et minimum eller at den faktisk blir målt (elektrisk vinge bor). Kriteriet for bestemmelse av kvikkleire er som ellers en omrørt skjærfasthet på  $s_{rv} < 0,5$  kPa.

#### **5.4.3 Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning – vinge boring**

Vinge borutstyr av forskjellige typer og fabrikat vil ikke alltid gi de samme resultatene. Her i landet har det modifiserte SGI vinge boret vært mest brukt. Praktiske erfaringer og resultater er derfor knyttet til dette utstyret.

Kvikkleire har ofte en omrørt skjærfasthet i området 0,1-0,2 kPa. For et vinge bor med dimensjonene 55 mm x 110 mm tilsvarer dette et torsjonsmoment under 0,1 Nm. Dette er i samme område som intern friksjon i utstyret, og kan dermed sies å være innenfor måleoppløsningen. Dette fører igjen til usikkerheter med hensyn på tolkning av slike lave verdier, og dette gir vanligvis en generell overestimering av den omrørte skjærfastheten, sammenlignet med konusforsøk utført i laboratoriet.

Vinge boret er også følsomt for heterogeniteter i jorda. Hvis deler av vingen (side, topp/bunn) er påvirket av et sterkere/svakere lag eller stein- og gruskorn vil det i stor grad innvirke på

målingene. Det anbefales derfor å kjøre flere serier med vingeborforsøk for å minimere denne usikkerheten.

Ved påfallende høye verdier bør det kontrolleres om det er samsvar mellom benyttet vingestørrelse og kalibreringsformelen. Friksjonen mellom vinge og nederdel bør kontrolleres, samt at rør og stenger er rette og godt sammenskrudd. Lokalt høye verdier kan også skyldes innhold av stein, grus, skjell eller lag av sand og silt i grunnen. Ved større dybder og store skjærfasthetsverdier kan man få betydelige deformasjoner i instrument og stenger, noe som vil påvirke målingene.

Ved påfallende lave verdier bør samsvar med vingestørrelsen kontrolleres. Det må også vurderes om de lave verdiene kan skyldes at leiren foran vingen blir omrørt på grunn av stein, skjell eller liknende som presses ned foran vingen ved utskyvning. Lave verdier kan også skyldes at stengene ikke har vært godt nok sammenskrudd før torsjonsbelastningen. Etter avlesningene trekkes vingen opp i skoen igjen. Leiren som hefter seg til denne vingen, blir under denne operasjonen helt eller delvis strøket av vingebladene.

Den delen av vingskaftet som skyves ned i leiren, er omgitt av et vingerør. Når vingen dreies, skjer bevegelsen mellom skaft og rør. Adhesjon mellom leire og vingerør innvirker således ikke på resultatene. Med riktig vedlikehold har friksjonen mellom vingskaft og vingerør og mellom innerstenger og ytterrør liten praktisk betydning. Rør og innerstenger må imidlertid være rette, da skjevheter kan gi friksjon som vil innvirke på måleresultatene, spesielt ved bestemmelse av omrørt skjærfasthet.

For å oppnå brudd innenfor det ønskede tidsrom kan det være nødvendig å benytte en større rotasjonshastighet under første del av forsøket. Forsøk viser også at den målte skjærfastheten øker med tiden etter at vingen er presset ned i leiren.

Elektrisk vingebor muliggjør måling av friksjon i stangsystemet. Denne verdien kan tas hensyn til ved tolkning av den omrørte skjærfastheten  $s_{rv}$ , og dette er viktig for kvikkleirebestemmelsen. Det skal svært liten friksjonseffekt til før omrørt skjærfasthet overstiger 0,5 kPa (kvikkleiredefinisjonen), og dette kan være en begrensning ved skjærfasthetsbestemmelse med manuelt utstyr. Det anbefales derfor å benytte elektrisk vingebor med gyldig kalibreringssertifikat ved måling i sprøbruddsmaterialer.

## 5.5 Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)

Resultater fra en trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) kan i prinsippet brukes til å bedømme:

- Lagdeling
- Jordart
- Jordartens lagringsbetingelser
- Jordartens mekaniske egenskaper
  - \* Skjærfasthetsegenskaper
  - \* Deformasjons- og konsolideringsegenskaper

Trykksondering er egnet i jordartene leire, silt og sand. Metoden er mindre godt egnet i grus og grovere jordarter med stort steininnhold fordi nedpressingsmotstanden vil bli for stor og utstyret lett vil bli skadet.

Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) gir sikrere bestemmelse av lagdeling og jordartstype enn trykksondering uten poretrykksmåling (CPT), og gir generelt bedre grunnlag

for å bedømme jordartens mekaniske egenskaper. I Norge er trykksondering med poretrykksmåling mest benyttet.

### 5.5.1 Sonderingsprosedyrer – CPTU

CPTU blir utført med en sylindrisk sonde med konisk spiss som penetreres ned i jorda med konstant penetrasjonshastighet. Trykksonden inneholder interne målere for registrering av kraft mot den koniske delen, friksjonskraft mot friksjonshylsen og poretrykket på ett eller flere steder langs sondens overflate. Poretrykket ved sondering er det vanntrykket som måles mens trykksonden presses ned i grunnen med foreskrevet hastighet, vanligvis målt i referansenivå like bak den koniske spissen. En helningsmåler (inklinometer) er vanligvis inkludert for måling av penetrometerets helning i forhold til vertikalaksen. Utstyret som benyttes ved nedpressing skal være i stand til å penetrere trykksonden med en standard hastighet på  $20 \pm 5$  mm/s. For trykksonder med måling av poretrykk skal filteret og andre deler av poretrykkssystemet være mettet med en væske (porøst filter) eller fett (spaltefilter) før penetrasjonen starter. Tilstrekkelige tiltak for å opprettholde metningen underveis i forsøket skal gjennomføres.

Ved penetrasjon gjennom grove og/eller steinrike lag kan det være nødvendig å forbore i deler av sonderingsprofilen, om nødvendig i kombinasjon av foringsrør for å unngå kollaps av borhullet. I bløt, løs jord benyttes vanligvis forboring gjennom tørrskorpelaget ned til en eventuell grunnvannstand.

Utførelse av CPTU klassifiseres i fire Anvendelsesklasser (1-4), avhengig av opptredende grunnforhold og krav til nøyaktighet av målingene. Anvendelsesklasse 1 (beste klasse) benyttes for bløte til meget bløte homogene avsetninger og kreves ved utredninger i kvikkleireområder. I Anvendelsesklasse 1 skal forsøksresultatene presenteres som kontinuerlige profiler mot penetrasjonsdybde:

- Korrigert spissmotstand - dybde	$q_t$ (MPa) - z (m)
- Sidefriksjon - dybde	$f_s$ (MPa) - z (m)
- Totalt poretrykk, referansenivå - dybde	$u_2$ (MPa) - z (m)
- Målt helning av stangsystem	$i$ (°) - z (m)

I denne anvendelsesklassen skal korrigert spissmotstand ( $q_t$ ) og sidefriksjon ( $f_s$ ) plottes i tillegg til måleverdiene, og disse verdiene anbefales også benyttet i tolkning og bearbeiding av resultatene. Et unntak kan gjøres ved sondering i grove jordarter, der effekten av korreksjonene er neglisjerbar.

En rekke faktorer i utstyrvalg, planlegging og utførelse av testen påvirker målenøyaktigheten, som for eksempel:

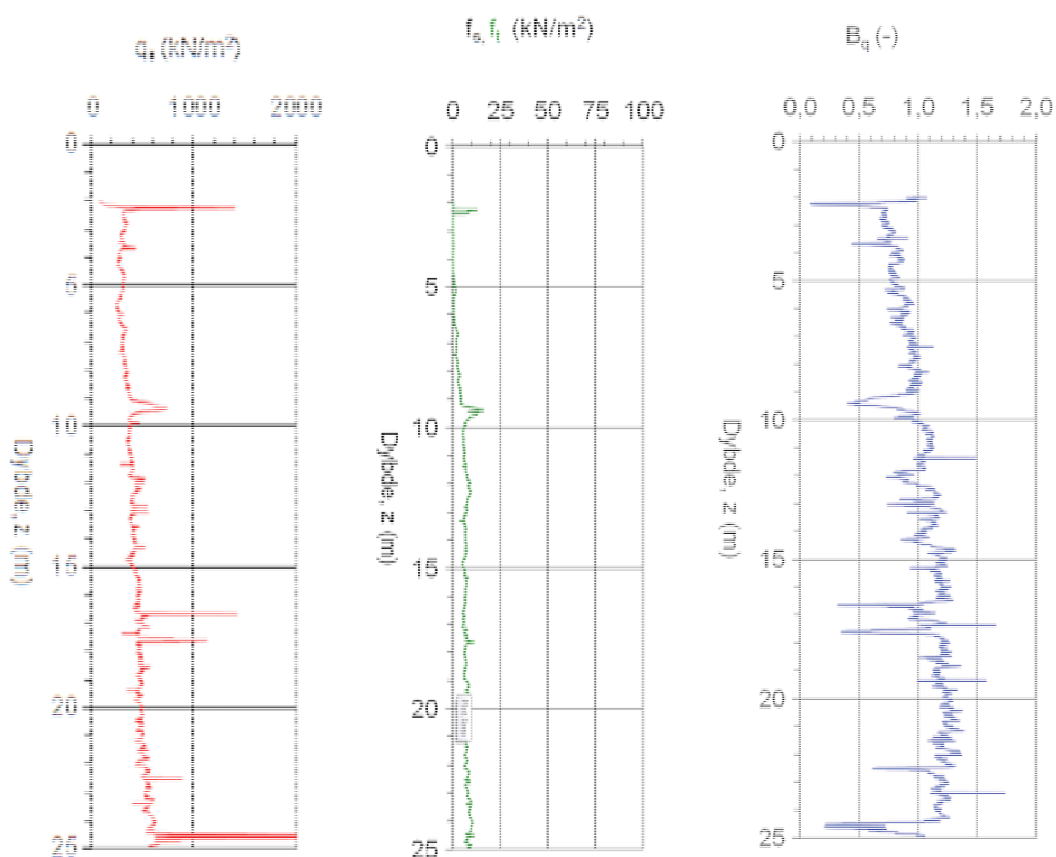
- Sondens måleområde
- Kalibreringsnøyaktighet
- Temperaturpåvirkning
- Nullpunktsavvik
- Metting av poretrykkmåler
- Helningsavvik
- Slitasje

Nullavlesning for spissmotstand og penetrasjonsdybde, eventuelt også sidefriksjon, poretrykk og helning relativt til vertikalaksen skal registreres. Ved avlesning må trykksonden være ubelastet og temperaturstabilisert til bakketemperatur (5 - 7 °C).

For utførelse i Anvendelsesklasse 1 er det viktig å dokumentere oppnådd nøyaktighet av målingene.

### 5.5.2 Prinsipper for detektering av kvikkleirelag – CPTU

I utgangspunktet skulle CPTU være en meget fordelaktig metode for bestemmelse av kvikke og sensitive lag ettersom alle målinger foretas i sonden. Målingene påvirkes derfor ikke av akkumulert sidefriksjon mot stangsystemet. I tillegg måles både mekanisk spissmotstand og sidefriksjon, samt at poretrykket kan fange opp eventuelle kollapsmekanismer i materialet som penetreres av sonden.



Figur 13. Aktuelle størrelser for detektering av sprøbruddsmateriale fra CPTU (Sandven (2012) /17/).

Detektering av kvikk/sensitiv leire fra CPTU kan da vurderes ut i fra følgende profiler, se eksempel på plott i Figur 13.

- Netto spissmotstand ( $q_n$ ) – sonderingsdybde ( $z$ ) (eventuelt effektivt overlageringsstrykk ( $\sigma'_{vo}$ )).
  - Detektering fra netto spissmotstand (eventuelt spissmotstandstallet  $N_m$ ) følger i prinsippet de samme retningslinjer som for tolkning av dreietrykksondering.
- Sidefriksjon ( $f_s$ ) eller friksjonsforhold ( $R_f = f_s * 100 \% / q_t$ ) – sonderingsdybde ( $z$ ).

- Lave måleverdier for sidefriksjonen  $f_s$  er vanligvis en god indikasjon på kvikkleire.
- *Poretrykksforhold ( $B_q = \Delta u/q_n$ ) – sonderingsdybde ( $z$ ).*
  - Høye verdier for poretrykksforholdet  $B_q > 1,0$  indikerer ofte kvikke eller meget sensitive leirer.

### 5.5.3 Usikkerheter, avvik og begrensninger ved tolkning – CPTU

På tross av det åpenbare potensiale til CPTU som detekteringsmetode er det en viss skepsis til å benytte metoden til bestemmelse av kvikkleire ut ifra dagens kunnskap. Primært kan dette skyldes at metoden ennå ikke er benyttet spesielt systematisk i forhold til kvikkleirebestemmelse, men også fordi sonderingsresultatene er påvirket av en rekke forhold i grunnen som ikke nødvendigvis har sammenheng med at leiren er sensitiv eller kvikk. Dette er nærmere diskutert i det følgende.

Netto spissmotstand  $q_n$ : Effekten med konstant eller jevnt avtagende netto spissmotstand med dybden ved CPTU i kvikkleire synes å være litt mindre uttalt enn for dreietrykkssondering. CPTU-profiler med vertikal eller negativ helning forekommer tilsynelatende usystematisk, også i kvikke leirer. Dette kan skyldes at CPTU-sonden ikke roteres og derved i mindre grad omrører leiren foran og langs sonden.

#### Sidefriksjon $f_s$ :

Ettersom fullstendig omrørt kvikkleire skal ha omrørt skjærfasthet  $s_r < 0,5$  kPa, er materialet omtrent flytende som en tykk væske. Dette skulle medføre svært liten sidefriksjon langs sondens friksjonshylse. Imidlertid viser tolkning av CPTU at kvikkleire kan forekomme selv om målt sidefriksjon er forholdsvis høy og langt større enn 0. Dette skjer ofte i siltige, grove leirer, der materialet krever mer enn en gangs penetrasjon av sonden for å oppnå full omrøring av kvikkleiren. Dette fenomenet er forsøkt belyst ved å gjenta penetrasjonen flere ganger ved at sonden kjøres opp og ned i noen sykler, samtidig som sidefriksjonen måles. Utførte forsøk viser at det ofte må gjennomføres 5-10 repetisjoner før materialet er blitt tilstrekkelig omrørt og flytende. Dette har i hovedsak blitt utført med alternative sondegeometrier som T-bar og piezoball, se nærmere vurdering og beskrivelse i kap.6.3.

#### Poretrykksforhold $B_q$ :

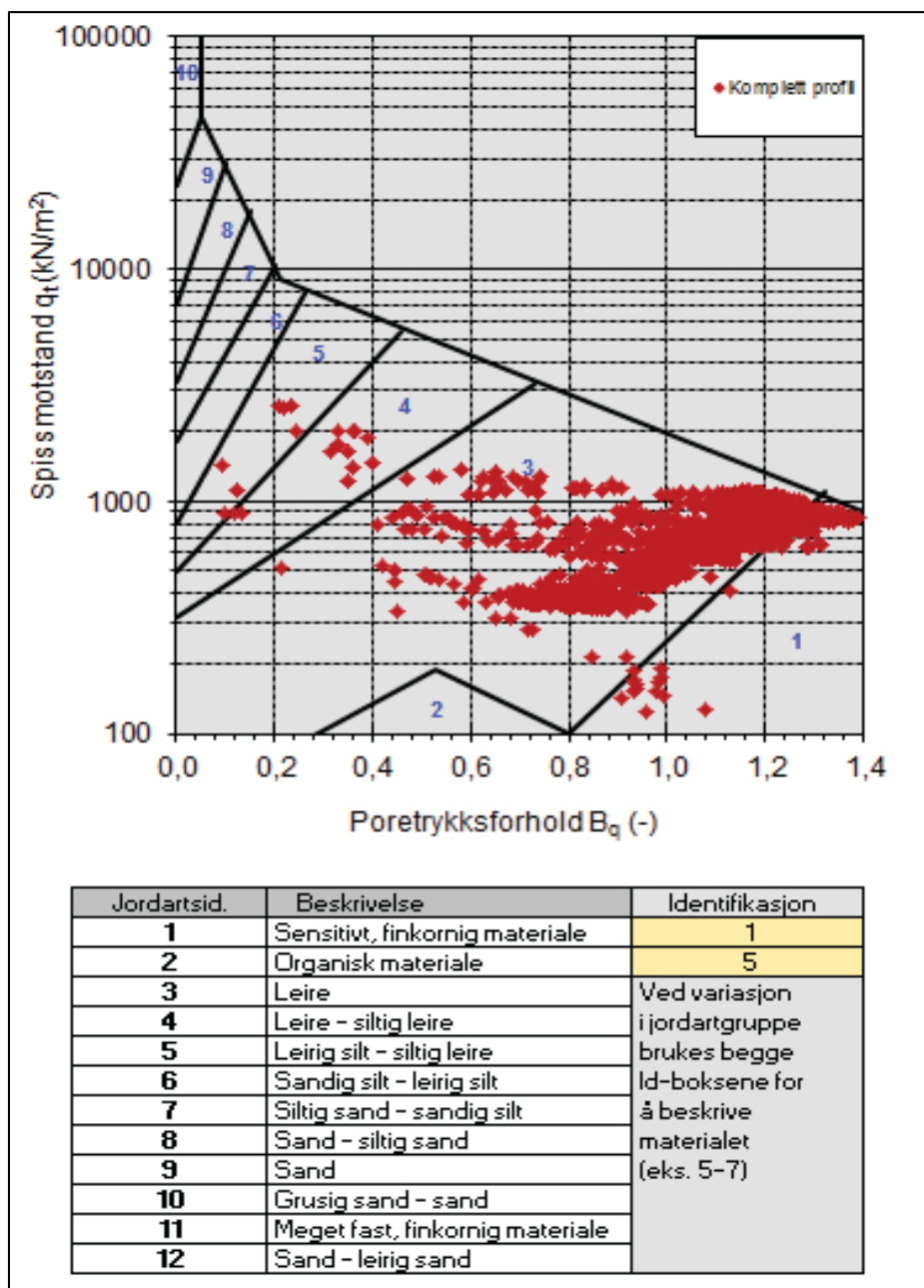
Ved penetrasjon av CPTU-sonden ned i grunnen oppstår en betydelig massefortrengning med store tøyninger i materialet rundt sondespissen. Disse spennings- og tøyningssendingene fører til en endring av poretrykket i den influerte sonen rundt sonden. Denne poretrykksresponsen registreres av sondens poretrykksmåler som er plassert like bak den koniske spissen.

I bløte, normalkonsoliderte leirer kan poretrykksforholdet  $B_q$  ligge så høyt som mellom 1,0 og 1,5, selv med poretrykket målt bak den koniske spissen. I slike tilfeller klassifiseres sonderingsresultatene som kvikkleire i de mest benyttede identifikasjonsdiagrammene for CPTU (eks. Robertson & Campanella, (1989) /15/).

I stivere, overkonsoliderte kvikkleirer vil oftest  $B_q$ -verdiene ligge betydelig lavere, ofte mellom 0,6-0,9 avhengig av blant annet forkonsolideringsgraden. Dette skyldes at poretrykket målt bak den koniske delen ikke vil inneholde så store bidrag fra skjærspenningsinduserte poretrykk som i tilfelle med normalkonsoliderte leirer (Sandven (1990) /16/). Leirenes dilatansgenskaper er en avgjørende innflytelsesfaktor i forhold til dette. I slike tilfeller klassifiseres vanligvis ikke leiren som kvikk i identifikasjonsdiagrammene, og poretrykksforholdet  $B_q$  kan derfor ikke alene benyttes som entydig identifikasjonsparameter, se eksemplet i Figur 14.



Her vil det være ønskelig å kunne måle poretrykksresponsen på spissen av sonden, noe som lettere ville ha fanget opp den kollapsible oppførselen til kvikkleiren og den betydelige poretrykksresponsen dette medfører i bruddsonen under spissen.



Figur 14. Identifikasjonsdiagram for samme leire som i Figur 13 (Sandven (2012) /17/).

Eksemplet i Figur 14 er hentet fra samme profil som sonderingsresultatene i Figur 13 ((fra Sund-Rissa, profil C3 i sprøbruddsmateriale (Sandven (2012) /17/)). Grunnforholdene her er dominert av sensitiv, men ikke kvikk leire fra ca. 10 m dybde.

## 5.6 Anvendte metoder i Sverige

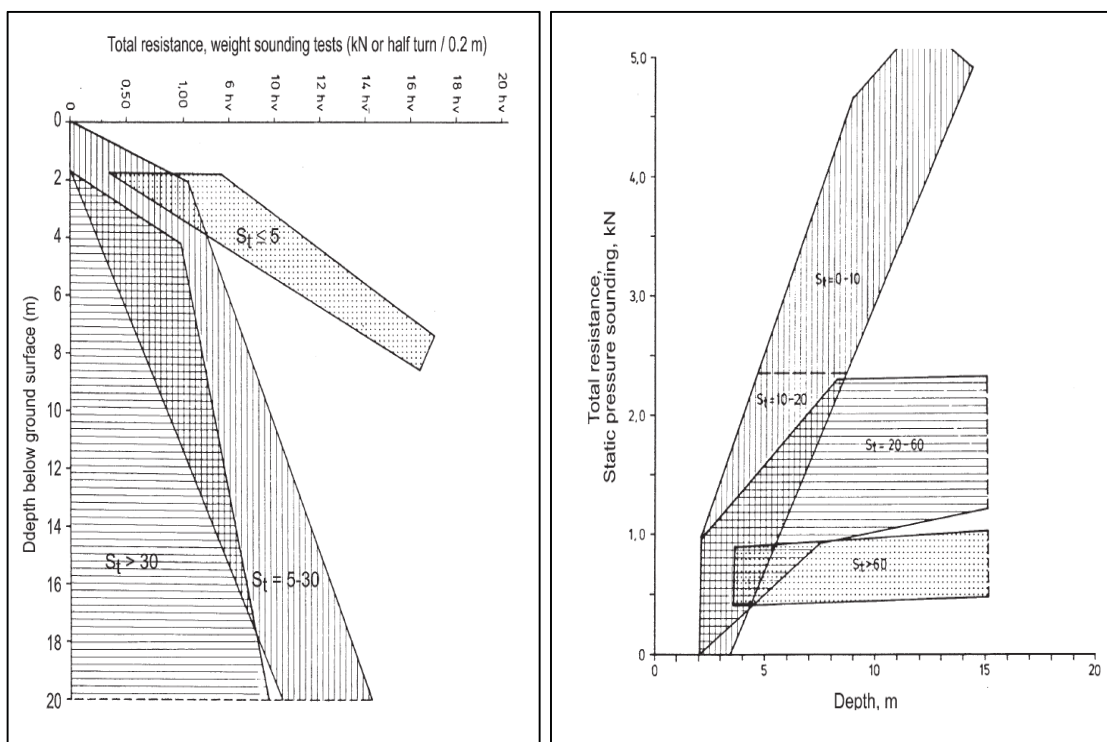
Det finnes i dag ingen spesielt utvalgte metoder for detektering av kvikkleire i Sverige. I de fleste tilfeller vil påvisning av kvikkleire være basert på observasjoner av resultater fra ordinære geotekniske undersøkelser, hovedsakelig rutineundersøkelser i laboratoriet men også

boringer i felt. Omfanget av kvikkleire estimeres fra undersøkelsesresultatene, kombinert med en rekke vurderinger av de stedlige forholdene.

I Sverige er det imidlertid utviklet korrelasjoner mellom sensitivitet og sonderingsmotstand for en grov inndeling i sensitivitetsklasser. Det er ikke gitt noen mer inngående eller detaljerte anbefalinger hvordan denne inndelingen er gjennomført ettersom korrelasjonene er indirekte og påvirkes av jordart, samt sonderingsutstyr og utførelse. En tilnærmet vertikal kurve mellom sonderingskraft og dybde indikerer generelt høysensitiv leire.

Korrelasjoner mellom sonderingsmotstand og sensitivitet ble først undersøkt av Möller & Bergdahl (1982) /18/ for de vanligste undersøkelsesmetodene i Sverige på den tiden. Metodene omfattet dreiesondering og statisk trykksondering. Sistnevnte metode ble tilpasset norsk dreietrykksondering, som var populær på den tiden (Rygg 1978 /19/). I denne metoden kan helningen på motstandskurven indikere sensitiviteten for sedimentene.

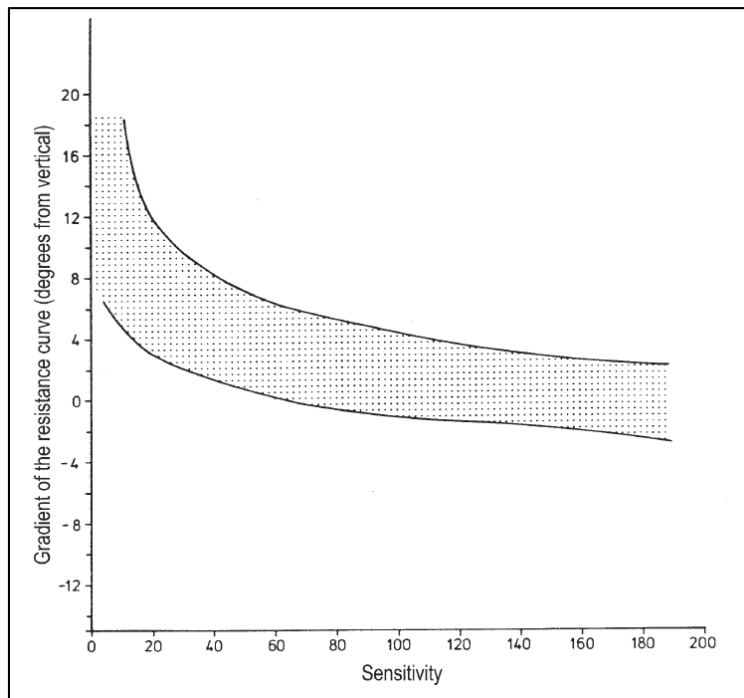
Noen viktige korrelasjoner ble også bestemt i den svenske undersøkelsen. Diagrammer for presentasjon av sonderingsmotstand mot dybde ble utviklet, med foreslåtte omhyllingsflater for materialer med varierende sensitivitet, se Figur 15. Omhyllingsflatene forutsetter at jorden er rimelig homogen i profilet, og at det eksisterer et normalt tørrskorpelag uten andre faste lag over eller i de sensitive lagene som kan forstyrre en jevn friksjonsutvikling. Anvendelsen av disse diagrammene har vært begrenset.



Figur 15. Orienterende tolkningsdiagram for sensitivitet for dreiesondering (Möller & Bergdahl 1982 /18/, etter Rankka m.fl. 2005 /2/).

For dreietrykksondering er det foreslått en annen fremstilling der helningen på kurven nedpressingskraft – dybde relateres til sensitiviteten, se Figur 16. Hvis denne kurven har en helning som er mindre enn 4 grader regnet fra vertikalen, er leiren sannsynligvis meget sensitiv eller kvikk. Dette tilsvarer omtrentlig en økning i nedpressingskraften på 0,07 kN/m. Denne

type korrelasjon er til en viss grad benyttet i subjektive estimater av den relative sensitiviteten, selv om ikke spesifikke grenseverdier har blitt utviklet.



Figur 16. Orienterende sammenheng mellom helning på motstandskurve og sensitivitet (Möller & Bergdahl 1982 /18/, etter Rankka m.fl. 2005/2/).

## 5.7 Anvendte metoder i Canada

Canadiske kvikkleirer er oftest omtalt som Leda leire og Champlain Sea leire etter de viktigste forekomstene, men kvikkleire finnes også i Ottawa Valley regionen, St. Lawrence Valley regionen og langs Saguenay-elven. Den geologiske dannelsen er beskrevet som havavsetninger. I Canada er kvikkleirene vanligvis lokalisert under et topplag av annet materiale.

Proseduren for påvisning av kvikkleireområder kan minne om den som benyttes i Norge. For utvalgte områder er det opprettet et farekart og et avgrensningskart til bruk i arealforvaltningen. Farekartet er delt i to forskjellige kart, et informasjonskart og et aktsomhetskart. På informasjonskartet vises jordart, topografi, skråningsgrenser (skråningsfot og -topp), skråningshøyde og -vinkel, tidligere skredaktivitet, type skråning og morfologi (for eksempel erosjon). I tillegg inneholder kartet informasjon om plassering av og type utførte grunnundersøkelser.

Aktsomhetskartet viser gradering av aktsomhet basert på geologi, geomorfologi og geotekniske egenskaper. Soner som inneholder sensitiv leire er først bestemt ved å identifisere tidligere jordskred ved hjelp av flybilder og Lidar data. Deretter bruker man stort sett kun prøvetaking og laboratorieforsøk for å påvise sensitiv leire. Kriteriene som benyttes er knyttet til fare for retrogressiv bruddutvikling, med flyteindeks  $I_L \geq 1.2$  og omrørt skjærfasthet  $s_r \leq 1$  kPa fra konusforsøk.

I Canada brukes som regel CPTU og prøvetaking i borhull for å vurdere sedimenttypen, i noen grad også Standard Penetration Test (SPT). Leiravsetningene er veldig homogene og varierer svært lite over store områder. Noen få prøvetakingshull og CPTU kan dermed benyttes for å kartlegge store områder. Til nå er det ikke benyttet geofysiske metoder i kartleggingen

ettersom det er lite variasjon i sedimentene. Vingebor har også tradisjonelt vært mye benyttet til bestemmelse av sensitivitet og omrørt skjærfasthet.

## 6. Vurdering av dagens tolkningsprosedyrer ved ulike grunnforhold – eksempler

For å kunne vurdere dagens tolkningsprosedyrer, har vi valgt å trekke frem eksempler på tolkning ved ulike grunnforhold, der en med varierende hell har forsøkt å påvise kvikkleirelag i grunnen. Ved utvalg av eksemplene er det lagt vekt på å belyse vanlig forekommende lagbetingelser og grunnforhold i marine leiravsetninger. De tilfellene vi har eksemplifisert og vurdert er oppsummert i punktene nedenfor:

- Laminert leire med sand- og siltlag
- Sprøbruddsmateriale med tynt topplag
- Sprøbruddsmateriale med fast og mektig topplag
- Løs, vannmettet silt/sand
- Leire med artesisk poretrykk

I tillegg er det sett på noen metodiske effekter som kan påvirke sonderingsresultatene:

- Effekt av spyling i totalsonering
- Effekt av overkonsolidering og naturlig skjærfasthetsvariasjon
- Effekter ved sjøboring

Disse forholdene er beskrevet og vurdert i de følgende kapitler, med enkeltvis presentasjon av de utvalgte eksemplene. Disse dekker definisjonen av sprøbruddsmateriale ( $s_r < 0,5 \text{ kPa} + S_t > 15$ ,  $s_r < 2,0 \text{ kPa}$ ) etter NVEs retningslinjer /20/, og oppfattes foreløpig som likeverdige materialer med hensyn på detekteringspotensiale i de utvalgte metodene.

### 6.1 Tilfelle A: Laminert leire med sand- og siltlag

#### Eksempel A1: Lauvlia, Meråker, Nord-Trøndelag

Terrenget i det undersøkte området består av det relativt flate platået Lauvlimoen med til dels bratte dalskråninger ned mot Stjørdalselva. Dalsidene i bekkedalen er bratte i sør med helning ca. 1:2. Skråningen er opptil 30 m høye og blir slakere mot nord, med helning typisk 1:3.

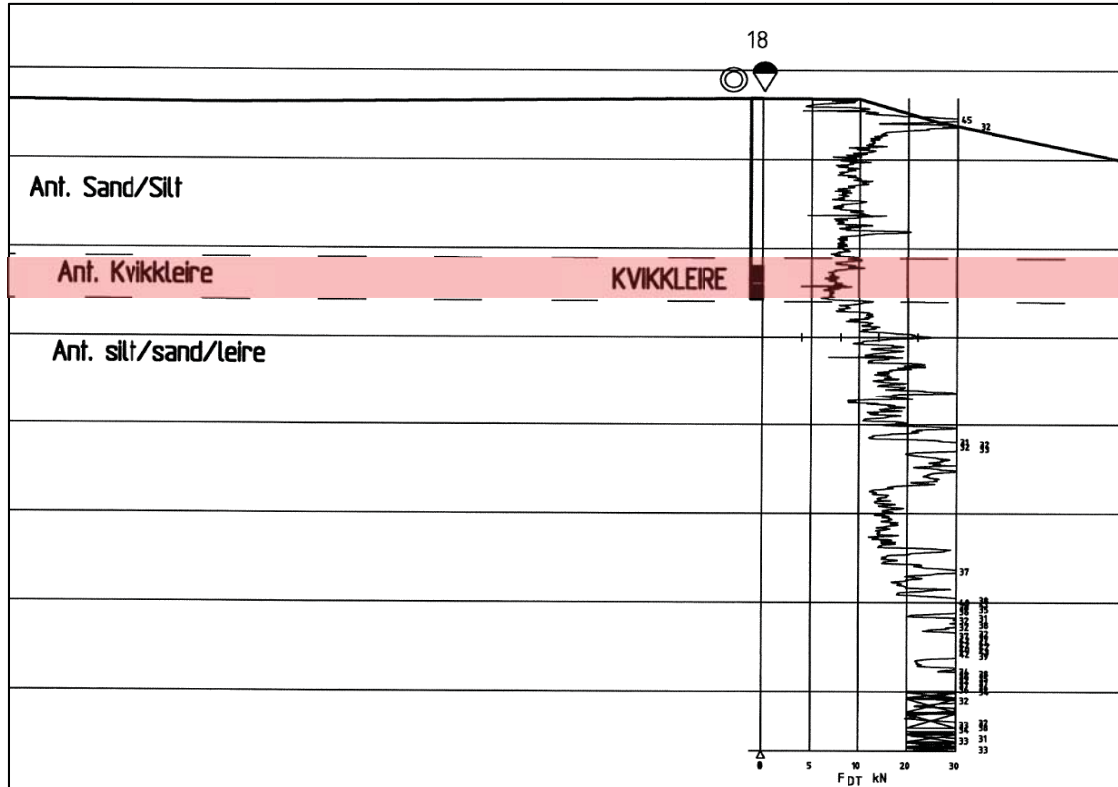
Grunnen består av lagdelte marine avsetninger av leire, silt og sand. Det er registrert kvikkleire i dybden i deler av området. Kvikkleireforekomstene synes å bestå av relativt tynne lag med antatt mektighet på ca. 2-3 m. Boringene indikerer at det ikke er sammenhengende kvikkleireforekomster på området, men at kvikkleire kan finnes på lokalt begrensede områder.

Udrenert skjærfasthet i kvikkleiren ligger mellom 30 og 40 kN/m<sup>2</sup>. Overliggende leire er fast med målt udrenert skjærfasthet i området 40-65 kN/m<sup>2</sup>. De registrerte silt- og sandmassene er lett eroderbare.

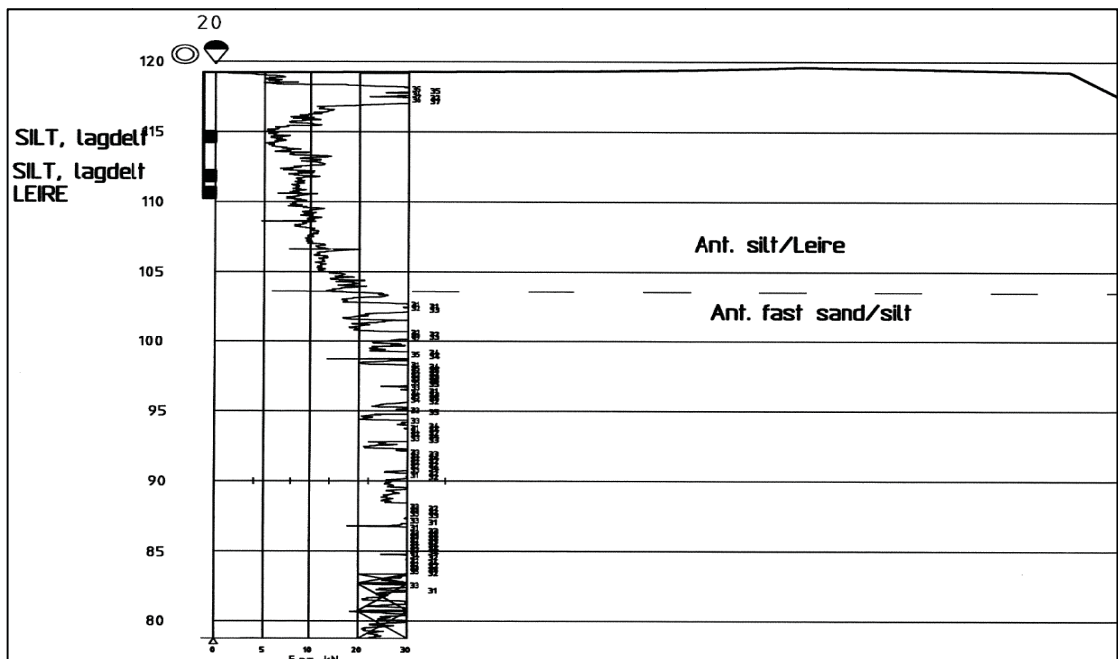
Figur 17 viser et typisk lagdelingsprofil fra området med resultater fra prøvetaking og dreietrykksondering. Grunnen er sammensatt av vekslende lag og linser av sand, silt og leire, noe som gjør sonderingsmotstanden svært variabel og profilene vanskelig tolkbare. Teksturen i materialet kan forklare lokal utvasking av leirlagene på grunn av vanntilførsel gjennom de grovere lagene.

I borpunkt 18 er det påvist kvikkleire i prøven mellom 9 og 10 m under terreng. I dette dybdeintervallet viser også dreietrykkprofilen negativ helning, men med vekslende sonderingsmotstand. Det er imidlertid ingen stor forskjell i kurvehelning i forhold til de deler av profilen som antas å bestå av sandige og siltige masser. Denne observasjonen understøttes

av resultatene fra dreietrykksondering og prøvetaking i borpunkt 20, se *Figur 18*. Her er det ikke påvist kvikkleire i prøvene, men dreietrykkprofilen har flere intervaller med gjennomsnittlig vertikal eller svakt negativ helning.



Figur 17. Lauvliå, Meråker. Sammenligning mellom dreietrykksondering og prøvetaking.



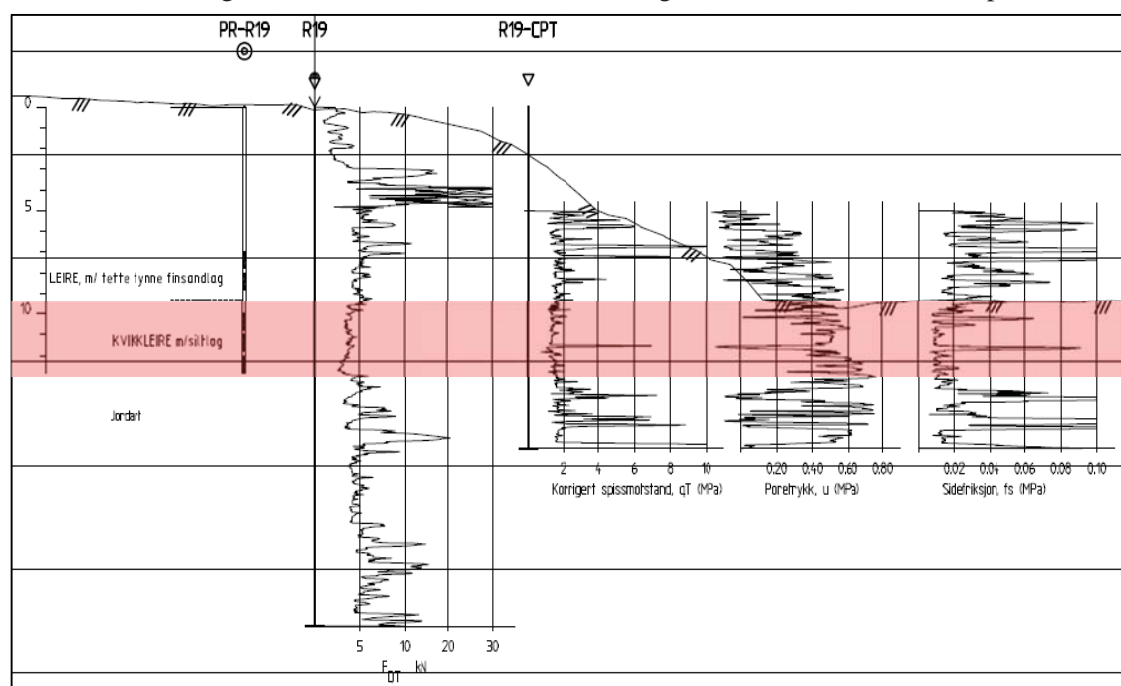
Figur 18. Lauvliå, Meråker. Sammenligning mellom dreietrykksondering og prøvetaking.

### Eksempel A2: Meråker sentrum, Nord-Trøndelag

Området er avgrenset av Stjørdalselva i vest og Nustadfoss i sør. Mot nord og øst følges i stor grad høydekote +110, som omtrent tilsvarer grensen mot dyrket mark. E14 går sentralt gjennom planområdet. Terrenget stiger i hovedsak fra Stjørdalselva og mot øst. Landskapet er terrassert med relativt flate plataer og bratte skråninger mellom terrassene.

Løsmassene består av lagdelte marine avsetninger av silt, sand, grus, leire og kvikkleire. Leir- og kvikkleirelagene er også svært lagdelte (laminerte) med innskutte silt-, og sandlag. Sonderingsresultatene blir derfor vanskelig å tolke med hensyn på løsmasstype.

Sonderingene indikerer et gjennomgående kvikkleirelag ved ca. kote +85 lengst sør og noe stigende mot nord til ca. kote +92. Mektigheten er typisk ca. 5 m, men kan lokalt være opptil 10 m. Overdekningen over kvikkleiren varierer for øvrig mellom ca.5 til 15 m i borpunktene.



Figur 19. Meråker sentrum. Sammenligning mellom dreietrykksondering, CPTU og prøvetaking.

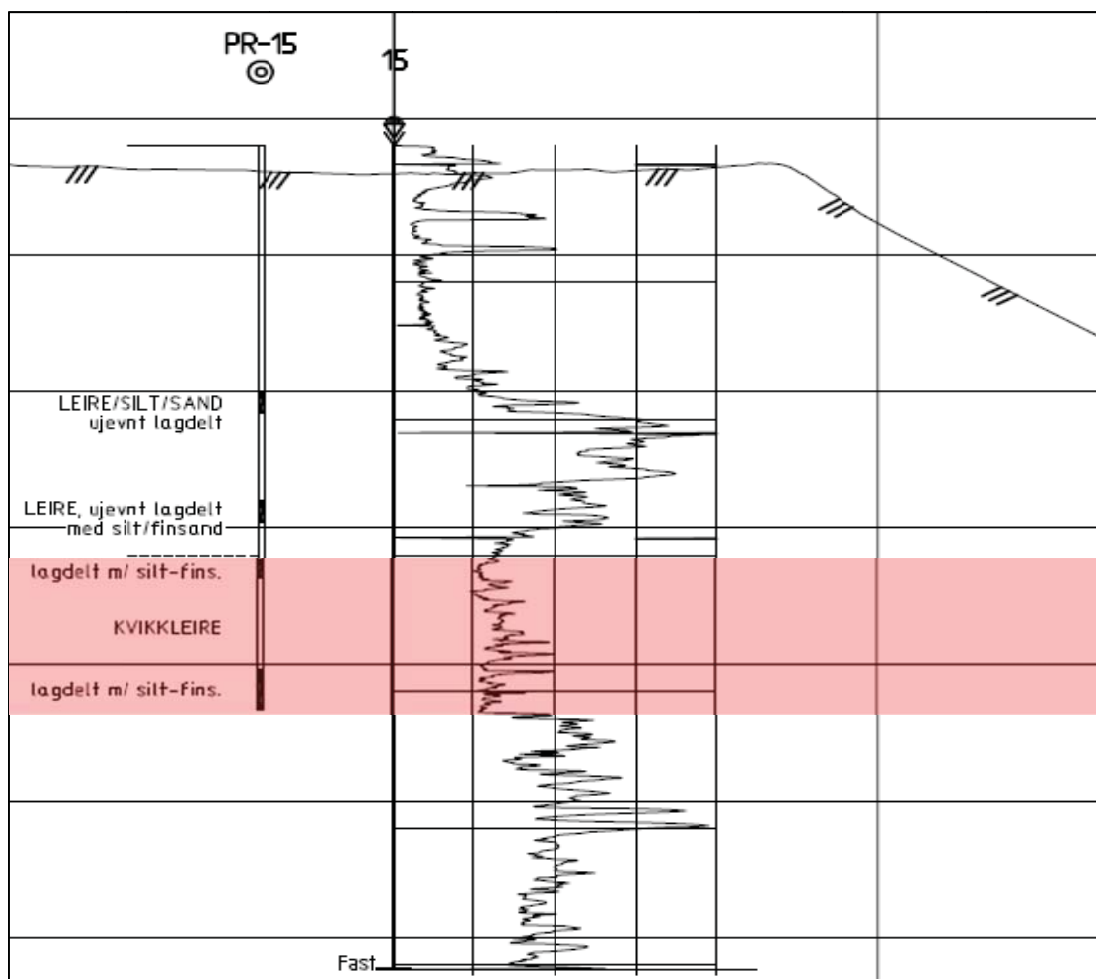
Vanninnholdet i de lagdelte massene varierer mellom 22 % og 41 % og mellom 17 % og 32 % for kvikkleiren. Tyngdetettheten ligger generelt i området 19,5 – 21,0 kN/m<sup>3</sup>. Leiren har en udrenert skjærfasthet mellom 30 og 90 kN/m<sup>2</sup>, med omrørt skjærfasthet mellom 1,2 og 20,0 kN/m<sup>2</sup>. Udrenert skjærfasthet i kvikkleiren er målt til mellom 18,0 og 54 kN/m<sup>2</sup>. Plastisitetsindeksen ( $I_p$ ) er målt til ca. 10 % i leiren og til 3-5 % i kvikkleiren.

Figur 19 viser et typisk lagdelingsprofil fra området med resultater fra prøvetaking, CPTU og dreietrykksondering. Grunnen er sammensatt av vekslende lag og linser av sand, silt og leire, noe som gjør sonderingsmotstanden svært variabel og vanskelig tolkbar. Dette kan også forklare lokal utvasking av leirlagene på grunn av vanntilførsel gjennom sand- og siltlagene.

I borpunkt 19 er det påvist kvikkleire i prøver under ca.9 m. I dette dybdeintervallet viser også dreietrykkprofilen negativ helning ned til ca. 12 m, men med vekslende sonderingsmotstand. Det er imidlertid ingen stor forskjell i kurvehelning i forhold til de deler av profilet med finkornige masser som ikke er klassifisert som kvikkleire. Denne observasjonen understøttes av resultatene fra dreietrykksondering og prøvetaking i borpunkt 15, se Figur 20. Her er det også påvist kvikkleire i prøvene under ca. 18 m, men dreietrykkprofilen viser ingen indikasjon på kvikkleire her.



CPTU profilene viser negativ helning for korrigert spissmotstand  $q_c$ , mens poretrykksforholdet ligger mellom 0,5 og 0,7 i kvikkleiresonen og indikerer således ikke kvikkleire. Sidefriksjonen er forholdsvis høy gjennom hele profilet.



Figur 20. Meråker sentrum. Sammenligning mellom dreietrykkssondering og prøvetaking.

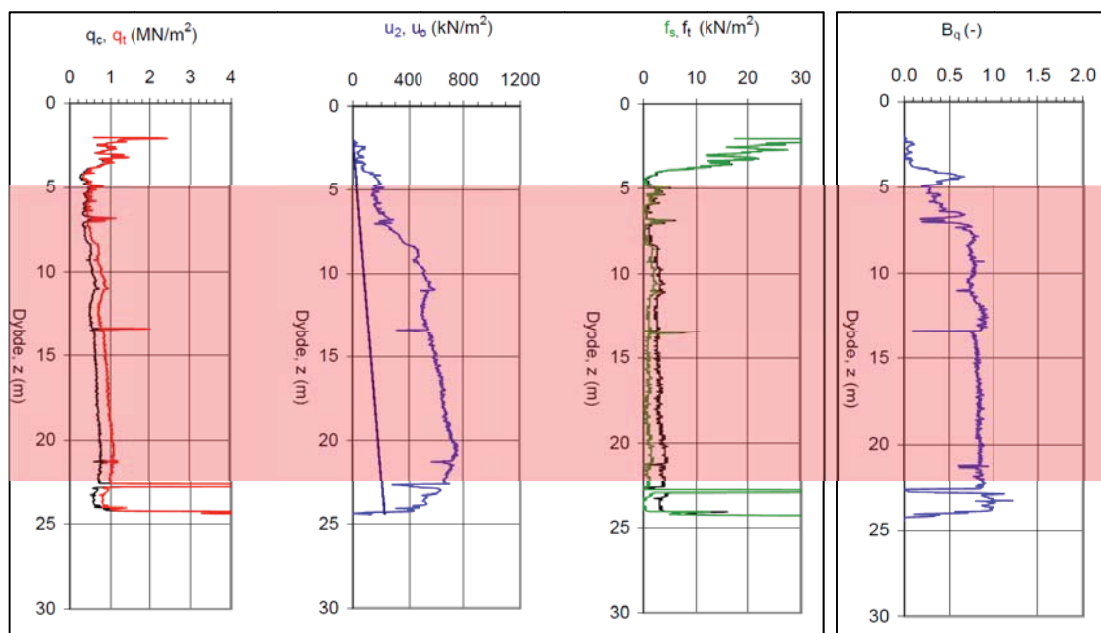
### 6.1.1 Oppsummering med vurdering av observasjoner

Eksemplene viser at situasjoner med laminert leire med silt og sandlag kan være vanskelige å tolke med hensyn på detektering av kvikkleire. De stadig skiftende forholdene med lag og linser av vekselvis fint og grovt materiale er gunstige for vanntilførsel og saltutvasking, og leirlagene ved slike forhold er derfor oftest sensitive eller kvikke.

Ved penetrasjon av sonderingsutstyr vil slike grunnforhold gi svært skiftende penetrasjonsmotstand, noe som medfører sterkt varierende sonderingsprofiler. Dette sees tydeligst på poretrykksregistreringene i CPTU, der innhold av sand- og siltlag lokalt kan gi delvis drenering ved penetrasjon av sonden. Man oppnår derfor vanligvis ikke full udrenert respons, noe som gjør at registrert poretrykksforhold  $B_q$  ikke vil nå opp i de verdier en har ved sondering i homogen, normalt konsolidert kvikkleire.

Dette gjelder også for registrert sidefriksjon, som på grunn av friksjonshylsens lengde på 30 cm vil påvirkes sterkt av sand- og siltlag som veksler med leiren. For vingeboring vil linser av sand og silt i leiren medføre en armeringseffekt som vil påvirke bestemmelsen av både uforstyrret og omrørt skjærfasthet.

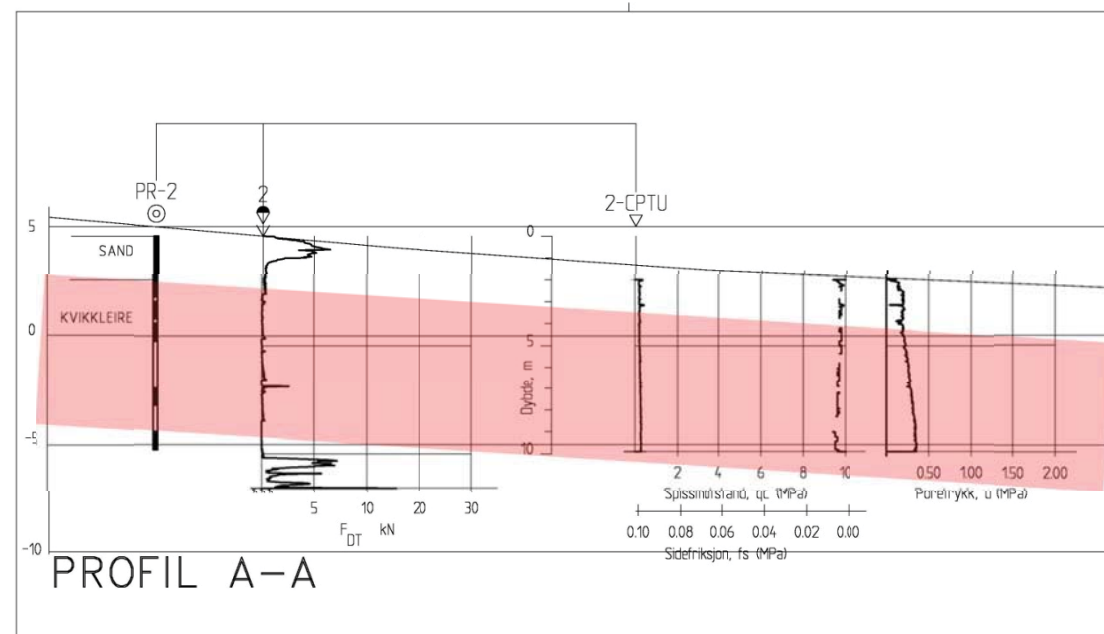




Figur 22. Møllenberg, Trondheim. Resultater fra CPTU.

#### Eksempel B2: Råkvåg, Sør-Trøndelag

Det er svært varierende grunnforhold på området, med kupert bergtopografi og til dels meget bratte fjellpartier. Løsmassene består generelt av sand og silt over leire. Denne er kvikk/sensitiv over store deler av området, se Figur 23. Ned mot bergoverflaten er det stedvis et grovere lag med mektighet opptil ca.2 m, mens det for øvrig er bløt leire ned til antatt berg.



Figur 23. Råkvåg, Sør-Trøndelag. Sammenligning mellom dreietrykksondering, CPTU og prøvetaking.

Leiren er siltig med en del sand- og gruskorn, og har vanninnhold i området 22-35 %, økende i dybden. Leiren er lite til middels plastisk ( $I_p = 5-11\%$ ). Udrenert skjærfasthet er målt med konus og enaksiale trykkforsøk og ligger mellom 18-40 kPa, det vil si bløt til middels fast leire. Omrørt skjærfasthet er målt i området 3-10 kPa, som medfører lav til middels sensitivitet.

Kvikkleiren inneholder sand og gruskorn og har et typisk vanninnhold på ca.25 % - 40 %. Kvikkleiren er lite plastisk ( $I_p = \text{ca.}5\%$ ). Udrenert skjærfasthet er målt med konus og trykkforsøk i området 15-25 kPa, det vil si bløt leire med høy sensitivitet.

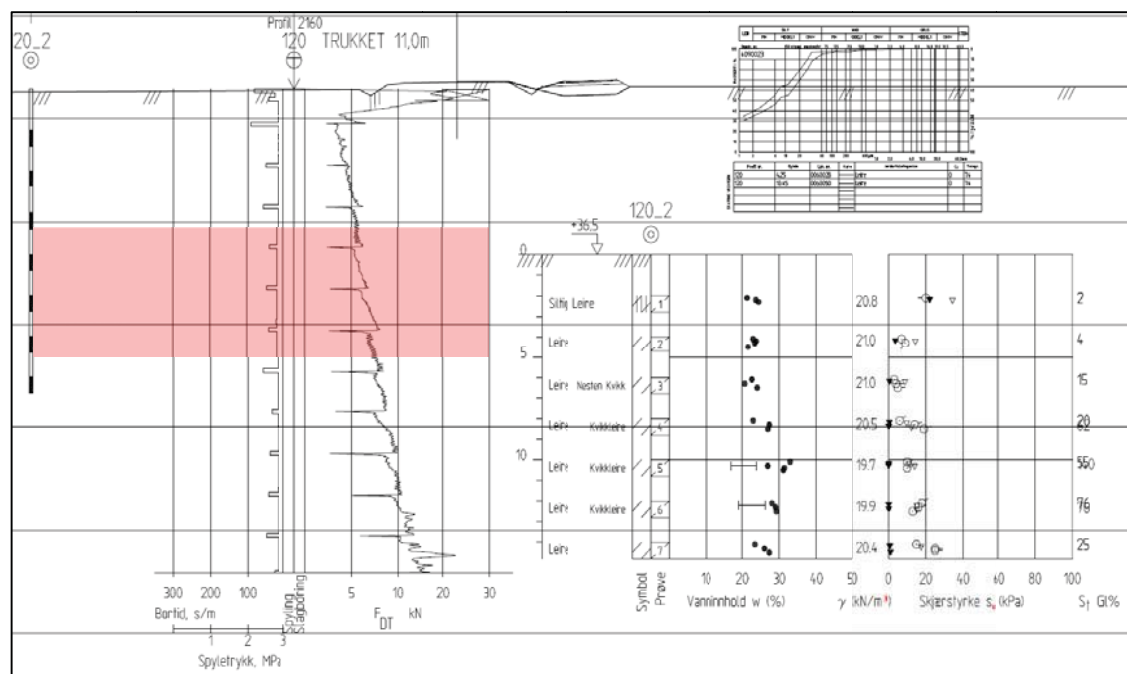
Eksemplet viser godt samsvar mellom vertikal helning på dreietrykkssonderingskurven og laboratorieresultatene, der begge indikerer kvikkleire under ca.2 m. CPTU resultatene er noe mer tvetydige, ettersom poretrykksforholdet  $B_q < 1,0$ , mens netto spissmotstand  $q_n$  er omtrent konstant med dybden. Det ser for øvrig ut til at spissmotstandstallet  $N_m = q_n / (\sigma_{v0}' + a)$  kan gi en klarere markering av kvikkleire enn netto spissmotstand  $q_n$  alene. Friksjonsforholdet  $R_f$  ligger rundt 1,0 % og er forholdsvis lavt.

### Eksempel B3: Holte - Minsås, Verdal, Nord-Trøndelag

Eksemplet er hentet fra en vegtrasé der terrenget i veglinjen stiger jevnt. Ved enden av planområdet ligger terrenget på ca. kote +80. Utsnitt fra kvartærgeologisk kart for planområdet viser at løsmassene stort sett består av hav- og fjordavsetninger i tykt dekke. Langs deler av veglinjen følger vegen overgangen mellom marine strandavsetninger og hav- og fjordavsetninger, samt at det er bart fjell/tynt løsmassedekke på deler av denne strekningen.

Undersøkelsene langs trasen for gang- og sykkelvegen viser generelt liten til middels sonderingsmotstand på strekningen mellom profil 900 og 2300. Basert på rutineundersøkelser på opptatte prøver består grunnen hovedsakelig av bløt til middels fast leire under et noe fastere topplag av tørrskorpeleire eller sandige masser.

I profil 2160 er det påvist kvikk- og høysensitiv leire fra 6 m under terreng og helt ned til prøveserien er avsluttet i 15 m dybde, se Figur 24. Opptatte prøver bekrefter at det er kvikkleire i dette området. Målt udrenert skjærfasthet med konus og enaksiale trykkforsøk ligger hovedsakelig under 20 kPa helt ned til 15 m under terreng. Målt vanninnhold ligger i området  $w = 20 - 35\%$ .



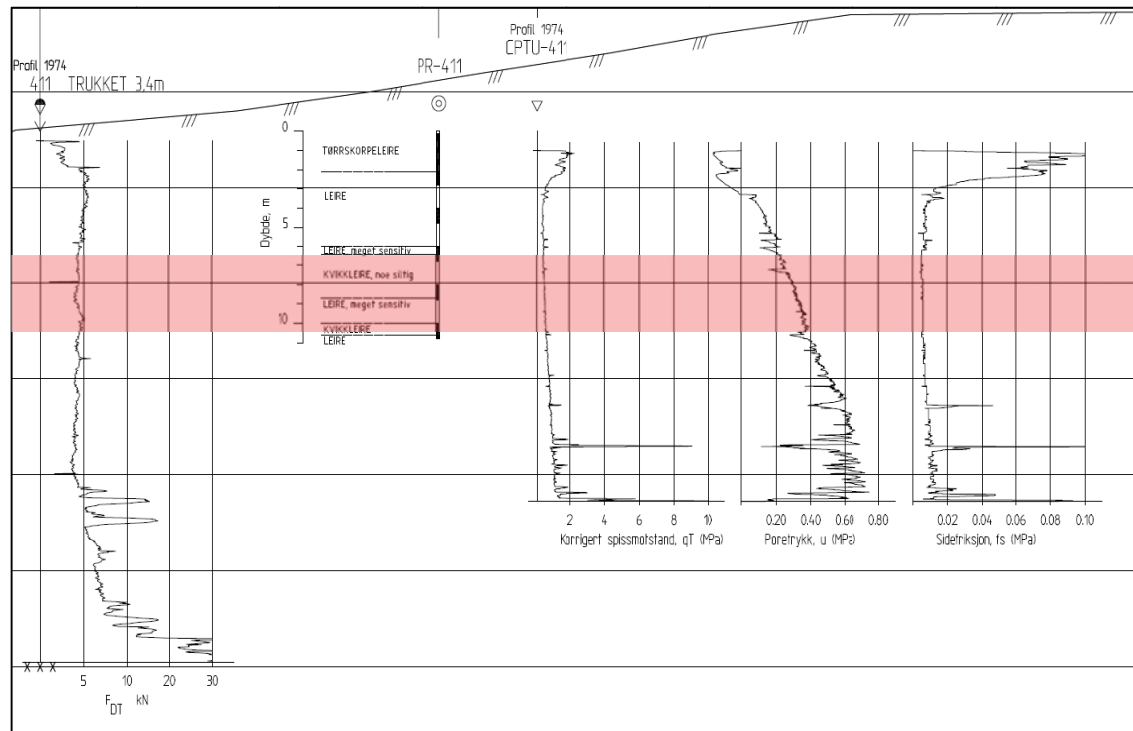
Figur 24. Holte-Minsås, Verdal. Sammenligning mellom totalsondering og borprofil fra prøvetaking.

Det bemerkes at totalsonderingsresultatene ikke indikerer så bløt grunn som påvist ved prøvetakingen. I borhull 120, der prøvetakingen har påvist kvikkleire, framgår ikke dette klart ut fra totalsonderingsprofilene. I gjennomsnitt viser sonderingskurven lineær økning med

dybden, selv om sonderingskurven mellom enkelte stangskifter delvis indikerer vertikal helning.

Vurdering av kvikkleireutbredelse ut fra totalsonderingene er derfor krevende og beheftet med usikkerhet. I dette området er det imidlertid også sonderingsprofiler som viser godt samsvar med laboratoriepåvisning av kvikkleire, se Figur 25. Boring 411 viser at dreietrykkssonderingen gir klar påvisning av kvikkleirelagene, med avtagende motstand med dybden. Det bemerkes imidlertid at motstanden også er avtagende i det ikke-kvikke leirlaget.

Trykksonderingen viser meget høy  $B_q > 1,0$  i kvikkleirelagene, mens netto spissmotstand  $q_n$  viser svakt økende strek. Friksjonsforholdet  $R_f$  varierer rundt 2 % og er forholdsvis høyt.



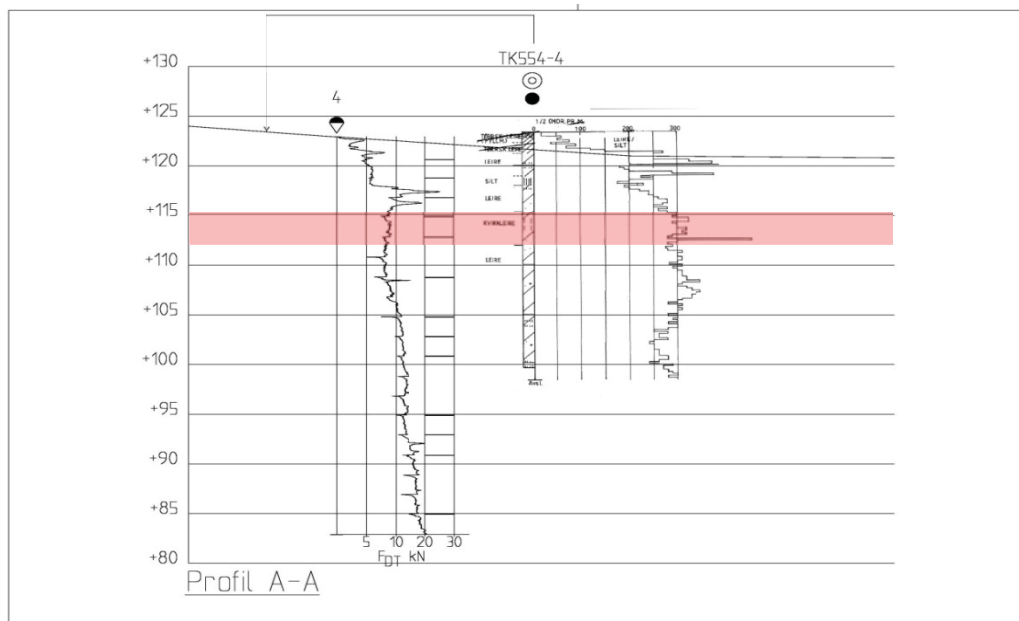
Figur 25. Holte-Minsås, Verdal. Sammenligning mellom dreietrykkssondering, CPTU og prøvetaking.

#### Eksempel B4: Blaklia, Trondheim

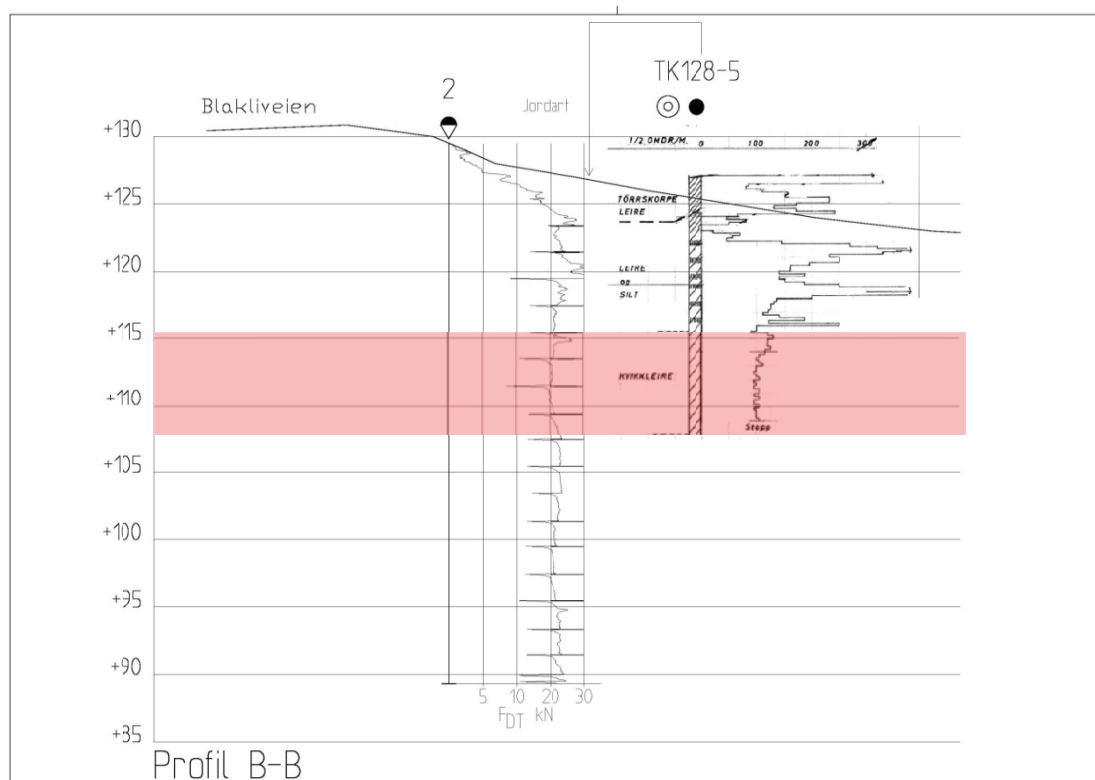
Terrenget er skrånende ned mot et flatere parti. Kvartærgeologisk kart viser at området består av tykke havavsetninger. Grunnforholdene i skråningen består av et 2 - 4 m tykt tørrskorpelag. Videre i dybden påtreffes siltig leire som blir sensitiv/kvikk ca. 6 - 12 m under terreng. Mektigheten på det sensitive laget er ca. 3 - 8 m. Under det sensitive laget er det antatt ikke-sensitiv leire til stor dybde, se Figur 26.

Ute i det flatere partiet består grunnforholdene av et 2-4 m tykt lag av tørrskorpe. Videre i dybden er det påvist lagvis leire og silt til en dybde på ca. 5m. På deler av området blir leiren sensitiv/kvikk i 5 - 8 m dybde. Under det sensitive laget er det igjen ikke-sensitiv leire til stor dybde.

Figur 26 viser sammenligning mellom dreiesondering, dreietrykkssondering og prøvetaking i et utvalgt borpunkt. I dette tilfelle viser dreietrykkprofilen svakt økende sonderingsmotstand i kvikkleiresonen. Dreiesonderingsprofilen viser imidlertid i gjennomsnitt tilnærmet konstant motstand i dette dybdeintervallet og antyder kvikk/sensitiv leire. På den annen side viser dreiesonderingen en markant reduksjon i antall halvomdreininger dypere ned, der laboratorieresultatene viser ikke-sensitiv leire. En tolkning fra dreiesondering ville således uten annen informasjon gi feilaktig tolkning over store deler av dette profilet.



Figur 26. Blaklia, Trondheim. Sammenligning mellom dreiesondering, dreietrykkssondering og prøveserie.



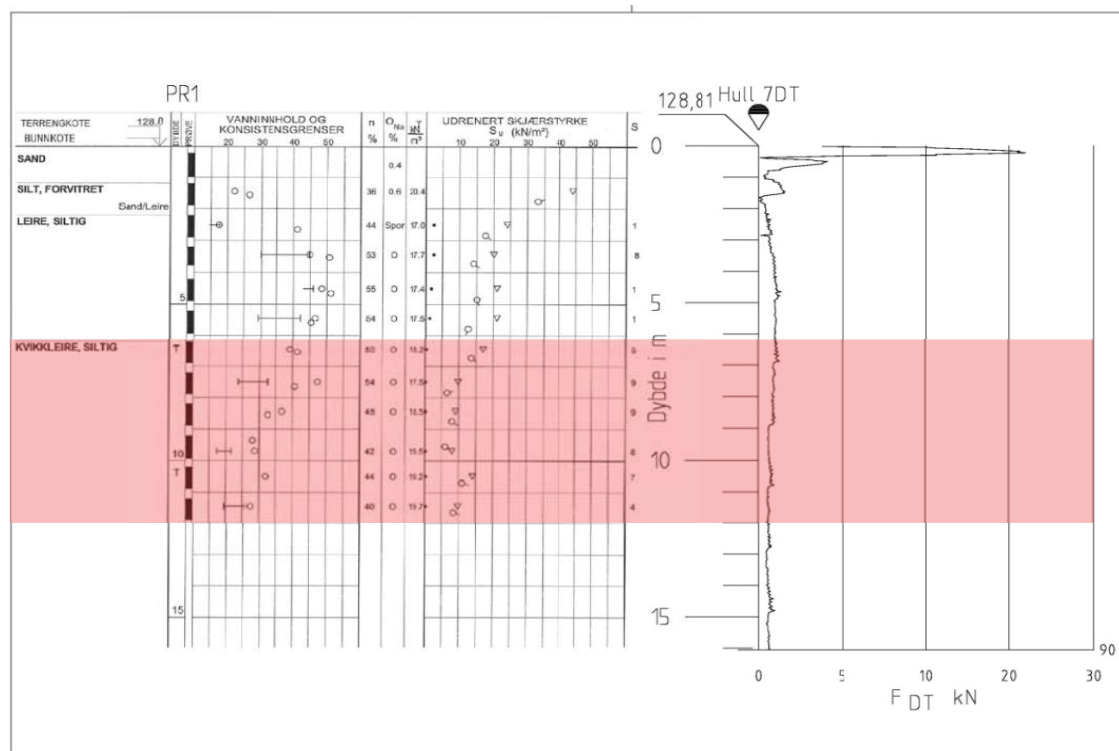
Figur 27. Blaklia, Trondheim. Sammenligning mellom dreiesondering, dreietrykkssondering og prøveserie.

Eksemplet i Figur 27 fra samme område viser derimot godt samsvar mellom laboratorieklassifisering og sonderingsprofilene fra dreiesondering/dreietrykkssondering. Dreiesonderingsprofilen viser avtagende motstand, mens dreietrykk-kurven har vertikal strek. Imidlertid er det ikke så godt samsvar mellom dreietrykkprofilen og laboratorieklassifiseringen i øvrige deler av profilet. Det bemerkes at dreietrykkprofilen indikerer kvikkleire også i laget med leire og silt, mens dreieborkurven noe overraskende viser en helt annen treffsikkerhet her.



### Eksempel B6: Lørenfallet, Romerike

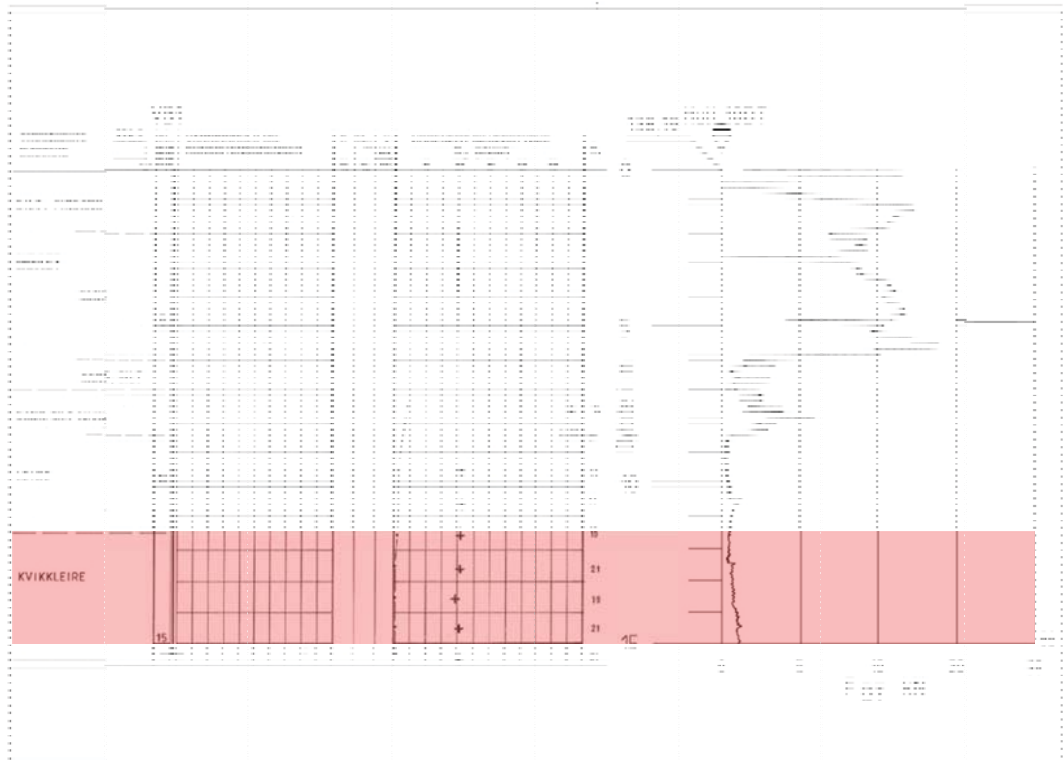
Grunnforholdene på det aktuelle området kan generelt beskrives med et varierende topplag under humus/matjord av sand inntil 5 - 6 m dybde i den sørøstre delen og siltig tørrskorpeleire til 1,5 - 2,5 m i den øvrige og største delen av det undersøkte området. Under topplaget er det betydelig utbredelse av et lag med bløt siltig leire/kvikkleire fra 3 m til mer enn 10 m mektighet. Fra prøveserie PR1, se Figur 28, ble det utført konus- og enaksiale trykkforsøk. Bortsett fra i topplaget, hvor udrenert skjærfasthet varierer mellom 30 og 40 kPa, viser resultatene verdier mellom 6 og 20 kPa, høyt vanninnhold over flytegrensen for materialet og sensitivitet opp mot 100. Det er registrert bløt, sensitiv kvikkleire fra ca. 6 m dybde ned til ca. 12 m. I bunnravedaler som omgir området er det registrert fastere lagring av løsmassene i sonderingspunktene.



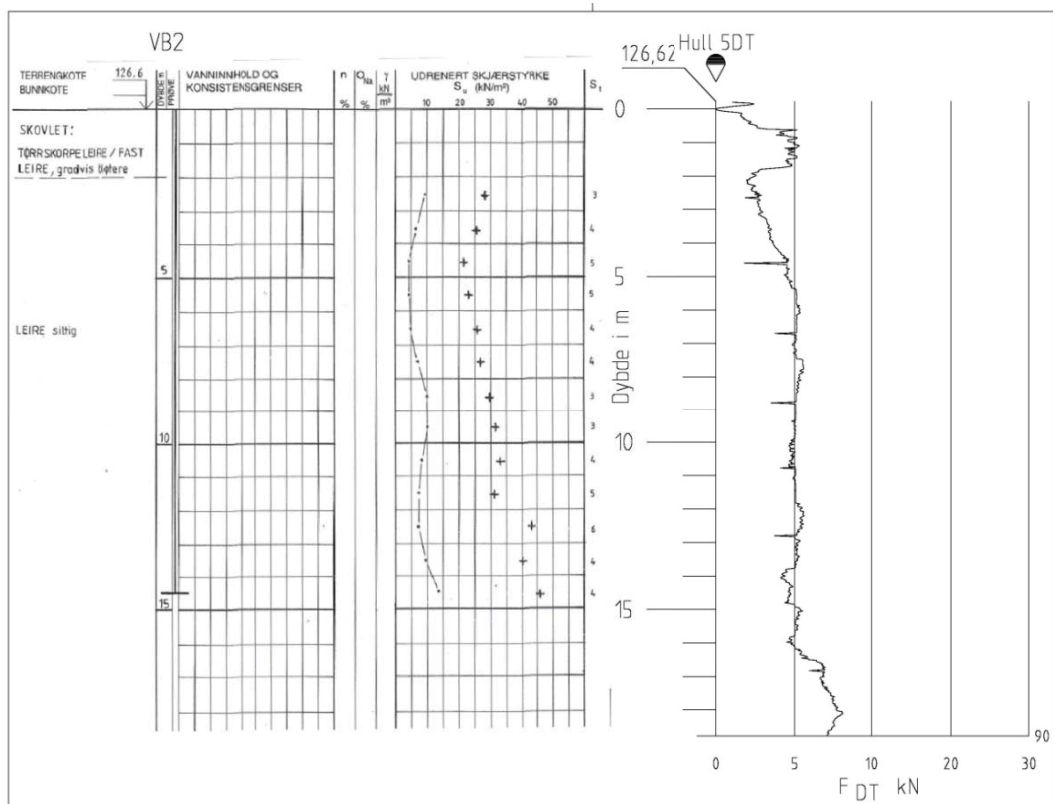
Figur 28. Lørenfallet, Romerike. Sammenligning mellom dreietrykksondering og borprofil fra prøveserie.

Figur 28 viser en sammenstilling av dreietrykksondering og borprofil fra rutineundersøkelser. Det er her meget godt samsvar mellom de to resultatene, og sonderingsmotstanden avtar eller er konstant med dybden i kvikkleirelaget.

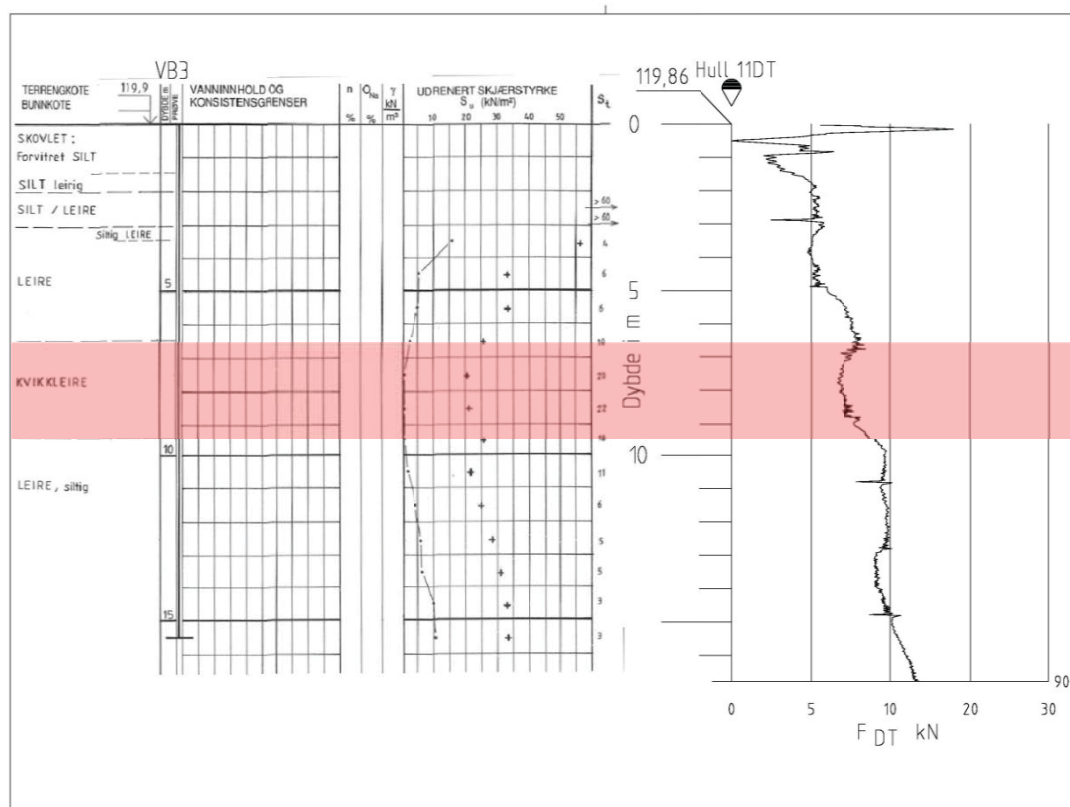
Figur 29 viser et tilsvarende dreietrykkprofil mot resultater fra et manuelt vingeborforsøk. Det er her registrert meget godt samsvar mellom vingeborresultater og dreietrykksonderingsprofilen, med meget lav omrørt vingebor-skjærfasthet. Figur 30 og Figur 31 viser imidlertid eksempler på det motsatte, der sonderingsprofilene ikke stemmer særlig godt med klassifiseringen fra vingeborresultatene.



Figur 29. Lørenfallet, Romerike. Sammenligning mellom dreietrykkssondering og vingebooring.



Figur 30. Lørenfallet, Romerike. Sammenligning mellom dreietrykkssondering og vingebooring.



Figur 31. Lørenfallet, Romerike. Sammenligning mellom dreietrykkssondering og vingeboring.

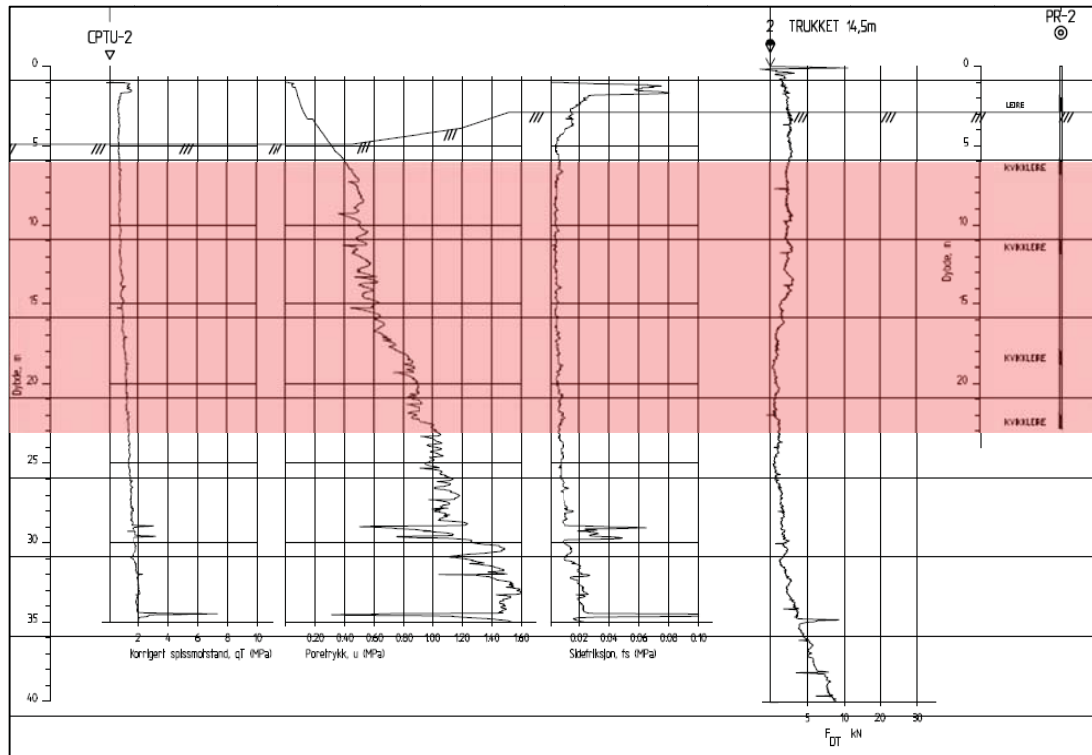
#### Eksempel B7: Fallan, Melhus

Grunnundersøkelsen viser generelt at grunnforholdene i området består av et tynt topplag av matjord/vegetasjonsdekke med mellom 0,5 og 2,0 m tykkelse. Det bemerkes at topplaget er tynt og forholdsvis løst i de fleste borpunktene. Under dette topplaget påtreffes mektige avsetninger av marine sedimenter, med bløt og til dels sensitiv/kvikkleire over store deler av området. Leiren synes å være homogen, men med enkelte siltlag og siltige partier

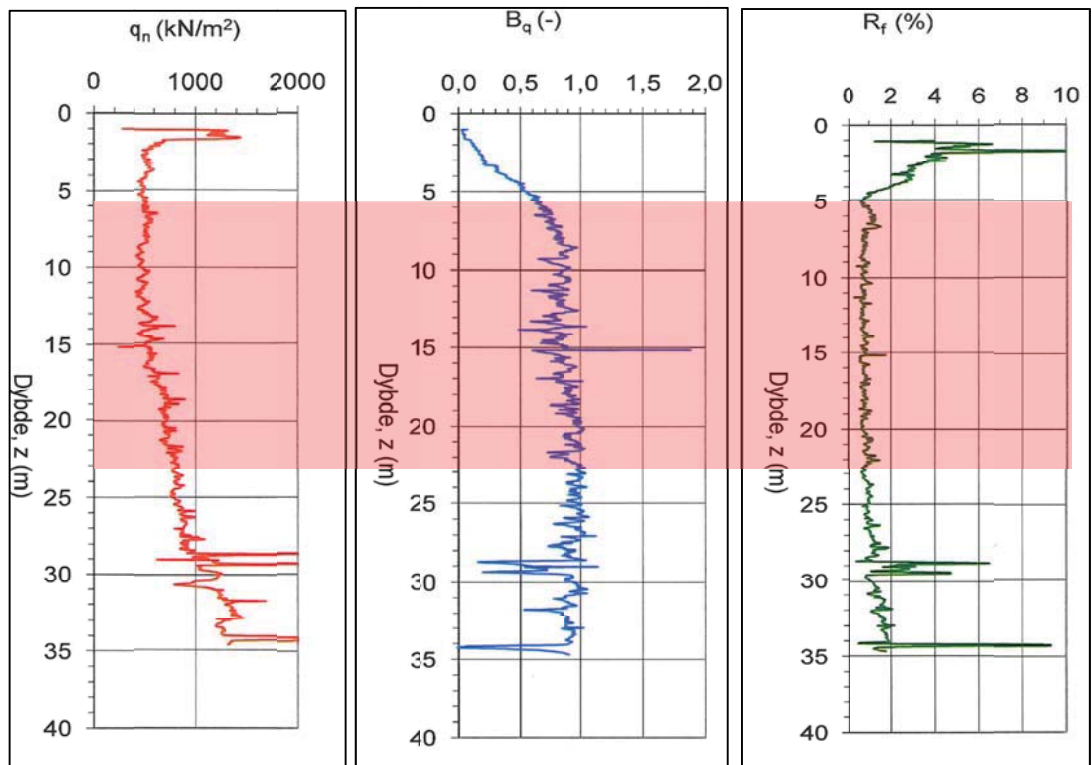
Laboratorieklassifiseringen viser at det i BP 2 er påvist kvikkleire over det meste av profilet. Leiren har et vanninnhold mellom 30 % og 40 %, høyest i grunne prøver. Densiteten av liten prøve varierer mellom  $1,92 \text{ g/cm}^3$  og  $1,96 \text{ g/cm}^3$ . Plastisiteten i leiren varierer mellom ca. 7 og 10 %. Rutinemessig skjærfasthet bestemt ved konus og enaksielt trykkforsøk øker omtrent lineært med dybden, fra ca. 25 kPa i ca. 5 m dybde til ca. 35 kPa. Sensitiviteten ligger mellom 55 og 145. Det bemerkes at prøveforstyrrelse kan ha påvirket verdiene av den udrenerte skjærfastheten og derav sensitiviteten, spesielt i bløte og sensitive lag.

Dreietrykkprofilen viser negativ helning mellom 5 og 25 m, noe som samsvarer meget godt med laboratorieklassifiseringen på opptatte prøver, se Figur 32. Profilen går imidlertid fra vertikal til negativ helning innenfor kvikkleiresonene, noe som ser ut til å falle sammen med at leiren blir litt mer siltig med svakt avtagende vanninnhold.

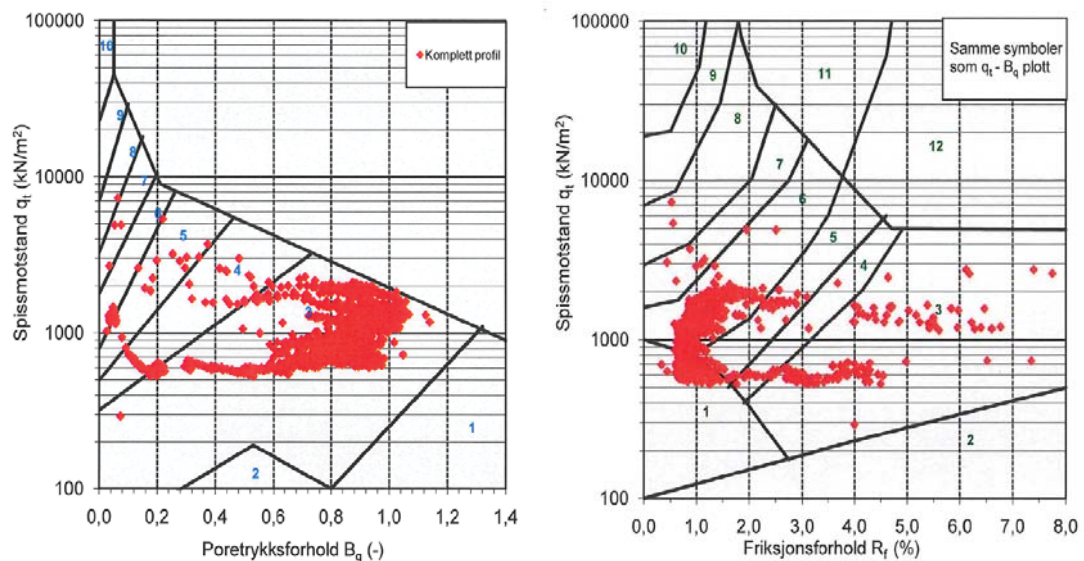
CPTU-resultatene viser ingen spesiell entydig tendens i dette profilet, se Figur 33. Poretrykksforholdet  $B_q = \Delta u/q_n$  ligger nært opptil 1,0 i kvikkleirelagene, noe som er vanlig og forklarlig i normalkonsoliderte og svakt overkonsoliderte kvikkleirer. Dette skyldes i hovedsak kollapsmekanismen som opptrer ved brudd i kvikkleire, kombinert med udrenerte forhold rundt sondespissen. Helningen på netto spissmotstandskurven  $q_n - z$  er vertikal i deler av kvikkleiresonen, men viser stort sett lineært økende tendens. Denne størrelsen ser ikke ut til å være en pålitelig indikator i dette tilfellet. Friksjonsforholdet er jevnt og forholdsvis konstant på ca. 1 %. Ved fullstendig omrøring av kvikkleiren ville dette forholdet gått mot 0, og gir heller ikke en entydig påvisning av kvikkleire.



Figur 32. Fallan, Melhus. Profiltegning med sammenligning mellom CPTU, dreietrykksondring og borprofil fra rutineundersøkelser.



Figur 33. Fallan, Melhus. Sammenligning mellom netto spissmotstand, poretrykksforhold og friksjonsforhold fra CPTU.



Figur 34. Fallan, Melhus. Sammenligning mellom klassifiseringsdiagram basert på spissmotstand, poretrykksforhold  $B_q$  og friksjonsforhold  $R_f$  fra CPTU.

Klassifiseringsdiagrammet i Figur 34 (Robertson & Campanella 1983 /15/) viser at diagrammet basert på poretrykksforholdet  $B_q$  og netto spissmotstand  $q_n$  klassifiserer de fleste registreringer i kategori 3 (leire) og ikke i kategori 1 (sensitiv leire). Diagrammet gir således ikke et riktig inntrykk av kvikkleireforholdene, noe det finnes en rekke eksempler på. Årsakene til dette er tidligere beskrevet og diskutert i kap.5.5.3. Overensstemmelsen er noe bedre for diagrammet med friksjonsforhold  $R_f$  mot netto spissmotstand, men heller ikke her faller tyngdepunktet av registreringer i kategorien sensitiv leire (1).

### 6.2.1 Oppsummering med vurdering av observasjoner

Eksemplene som er samlet i denne rapporten viser at det i de fleste tilfeller vil være godt samsvar mellom tolking av sonderingsprofilene og resultater fra laboratorieklassifisering. Tilfellet med tynt topplag over sprøbruddsmaterialene byr ikke på særlig innvirkning fra topplaget på stangfriksjonen, noe som forenkler tolkingen. Det er likevel slik at nedpressingskraften er en kombinasjon av spisskraft og friksjonskraft, der kun friksjonskraften er direkte avhengig av kvikkleireforholdene. Dette kan delvis forklare eventuelle avvik mellom sonderingsresultat og laboratorieklassifisering, også der grunnforholdene er forholdsvis enkle.

Når det gjelder de enkelte sonderingsmetodene har vi foreløpig ingen sikre holdepunkter hva gjelder sammenligning mellom dreietrykkssondering og totalsondering. Eksemplene viser at begge metoder kan treffe godt med kvikkleireprediksjonen, men det er også flere eksempler på det motsatte. Når det gjelder dreiesondering er utvalget av eksempler meget begrenset, men det forventes at dreiesondering er mer påvirket av topplagets tykkelse og egenskaper enn de andre metodene. Resultatene som er vist i denne kategorien grunnforhold vil derfor ikke nødvendigvis være representative når grunnforholdene blir mer utfordrende.

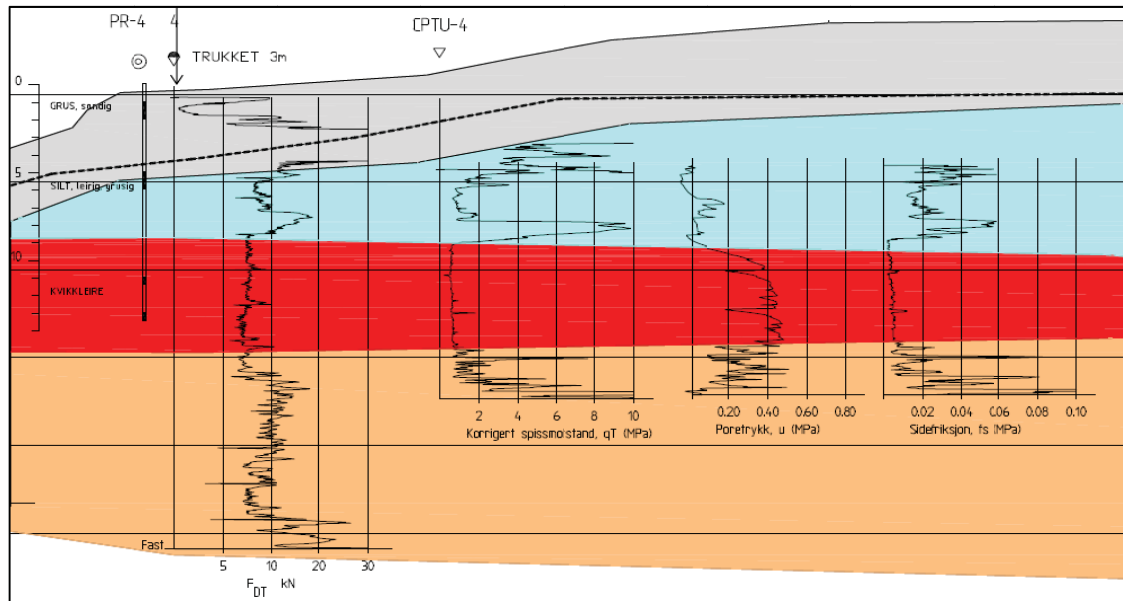
For CPTU er ikke topplagets tykkelse vesentlig for tolkingen ettersom målingene gjennomføres nede på sondespissen. Vanligvis blir det forboret gjennom topplaget før CPTU-sonderingen gjennomføres for å unngå tap av metningsmedium for poretrykksmåling. Det er for øvrig observert at spissmotstandstallet  $N_m = q_n / (\sigma_{v0}' + a)$  gir en klarere markering av kvikkleire enn netto spissmotstand  $q_n$  alene, noe det er ønskelig å vurdere nærmere.



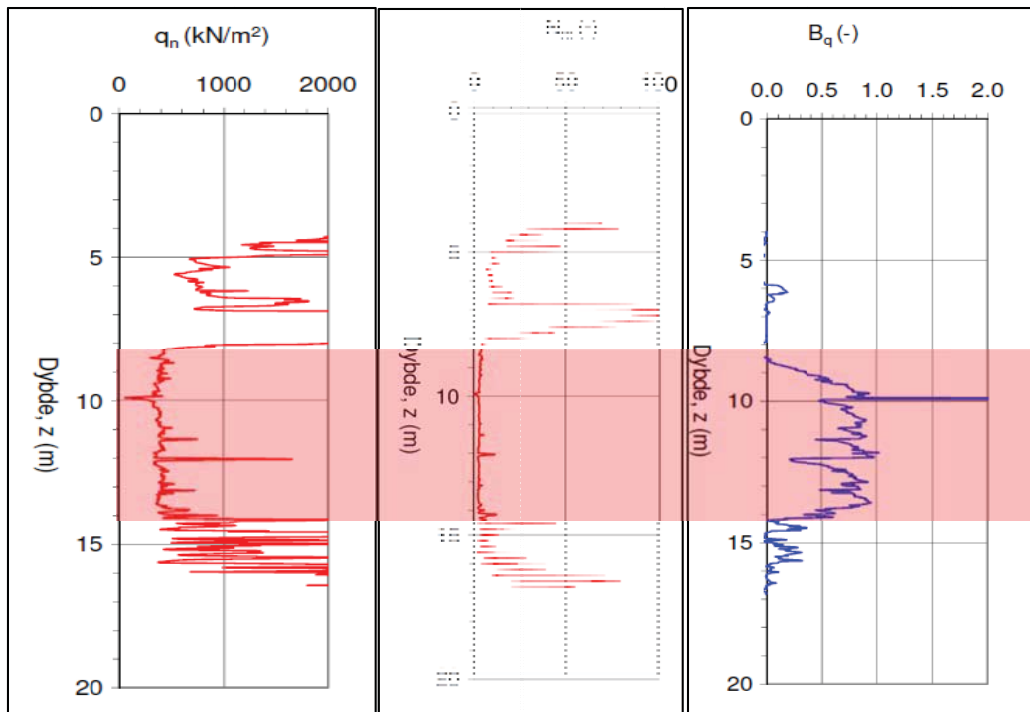
### 6.3 Tilfelle C: Sprøbruddsmateriale under fast og mektig topplag

#### Eksempel C1: Åfjord, Sør-Trøndelag

Grunnforholdene består av et grovt lag av sand og grus med inntil 4-7 m dybde, deretter er det registrert noe finere masser i form av sandig og leirig silt, se Figur 35.



Figur 35. Åfjord, Sør-Trøndelag. Profiltegnning med sammenligning mellom CPTU, dreietrykkssondering og prøvetaking.



Figur 36. Åfjord, Sør-Trøndelag. Sammenligning mellom netto spissmotstand, poretrykksforhold og friksjonsforhold fra CPTU.

Det er avdekket kvikk eller sensitiv leire i elvebunnen langs Norddalselva. De sensitive massene ligger under et tynt lag av grovere masser, som er antatt å være sand. De sensitive massene vurderes å være mektigst under selve elvebunnen, med noe avtakende mektighet



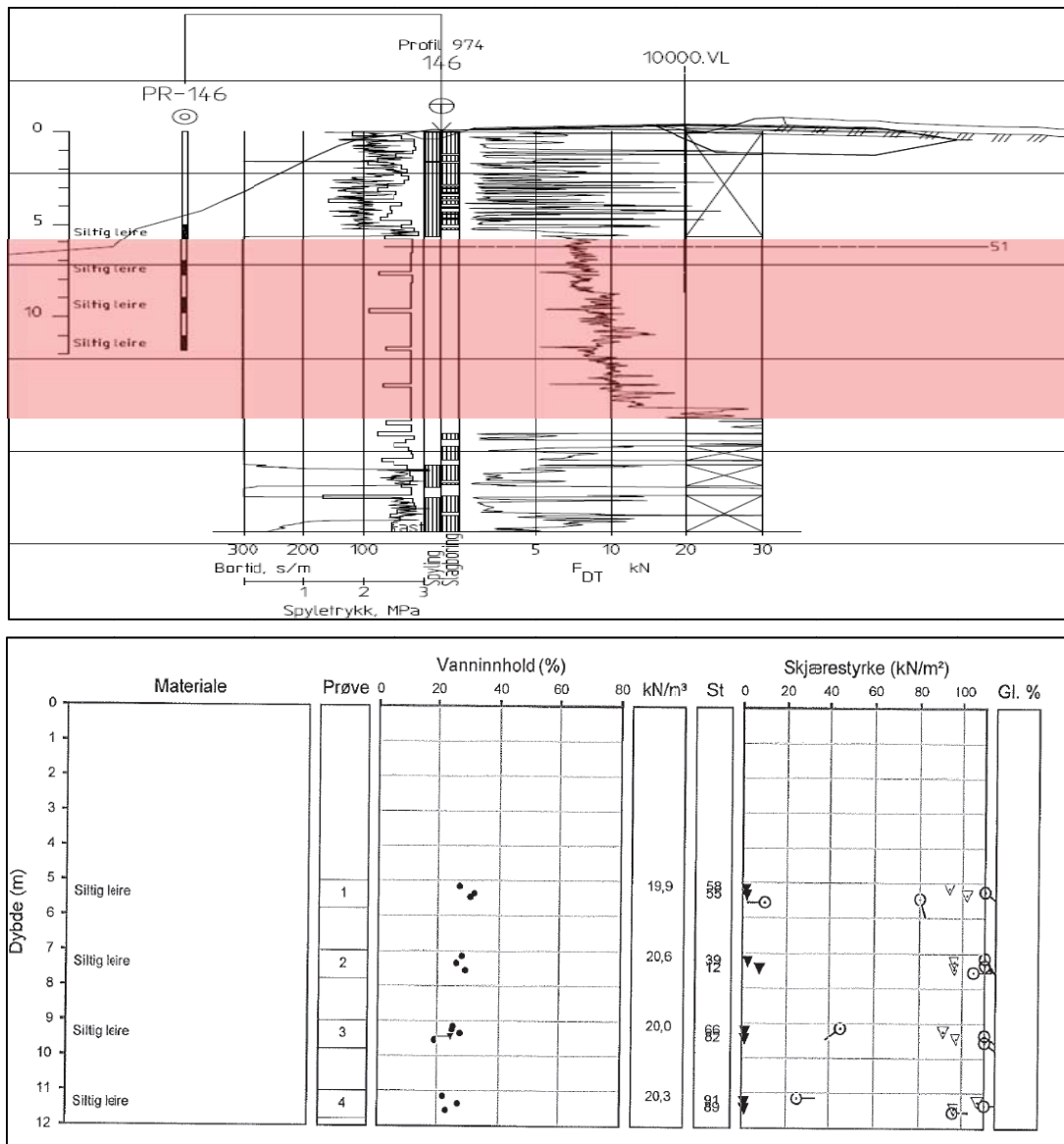
østover. Underliggende lag består av lagdelte masser med silt-, sand- og gruslag. Grunnvannstanden er antatt å ligge ved ca. kote -1,5 langs elvebunnen.

Det er i dette eksempelet godt samsvar mellom resultater fra dreietrykkssonderingen og resultater fra laboratoriet. Kvikkleirelaget påvises med konstant eller svakt avtagende penetrasjonsmotstand i hele laget.

Trykksonderingsresultatene viser også i dette tilfellet en tydeligere markering av kvikkleireklaget ved bruk av spissmotstandstallet  $N_m$  enn med netto spissmotstand  $q_n$ , som vist i Figur 36. Poretrykksforholdet  $B_q$  viser igjen lavere verdier enn forventet for kvikkleire, muligens på grunn av en kombinasjon av overkonsolidering og betydelig innslag av silt i kvikkleiren.

### Eksempel C2: E6 Hage-Gylland, Melhus

Dagens E6 ligger på en elveterrasse og terrenget langs selve veglinja er relativt flatt og ligger mellom kote +54 og +67. Øst for vegen stiger terrenget på, mens elva Gaula renner vest for vegen. Høydeforskjellen mellom elveterrassen som E6 ligger på og bunnen av Gaula, er inntil 10 m.



Figur 37. E6 Hage-Gylland, Melhus. Profiltegning med sammenligning mellom totalsondering og borprofil fra prøvetaking.

Utsnitt fra kvartærgeologisk kart for området viser elveavsetninger i dalbunnen der veglinjen går. På innsida av vegen viser kartet bart berg i dagen på det meste av strekninga. Lenger opp i dalsidene indikerer kartet morenemasser og enkelte partier med breelvvavsetning.

Grunnundersøkelsene langs veglinjen viser generelt meget høy sonderingsmotstand i et øvre topplag. Dette laget består hovedsakelig av fast lagrede sand- og grusmasser med varierende mektighet. Under topplaget er det påvist løsmasser med liten til middels sonderingsmotstand og svak økning av sonderingsmotstanden i dybden. Løsmassene består av sensitive masser med silt og leire i dybden. Det kan tyde på at sonderingsresultatene er noe påvirket av stangfriksjon fra det faste topplaget, noe som gjør at tolking av totalsonderingsresultatene ikke er helt entydig.

Laboratorieundersøkelser på opptatte prøver viser at grunnen under topplaget består av siltig leire og leire. Leiren er middels fast til fast, med udrenert skjærfasthet i området  $s_u = 35-110$  kPa.

Figur 37 viser sammenligning mellom totalsondering og resultater fra laboratorieklassifisering. I dette profilet faller leiren innenfor definisjonen sprøbruddsmateriale med stedvis påvisning av kvikkleire.

### 6.3.1 Oppsummering med vurdering av observasjoner

Eksempelene som er valgt ut i denne kategorien viser at det vil være mer utfordrende å detektere kvikkleire i underliggende lag når dette er dekket av et fast og mektig topplag. Innflytelse av topplaget i form av endret friksjon over tid, blant annet på grunn av partikkelforflytninger, utrømming av borhull, nedrasing av masse og lignende effekter vil kunne ha påvirkning på nedpressingskraften.

Det finnes likevel gode eksempler på at kvikkleirelag lar seg detektere, i hvert fall med bruk av dreietrykk- og totalsondering.

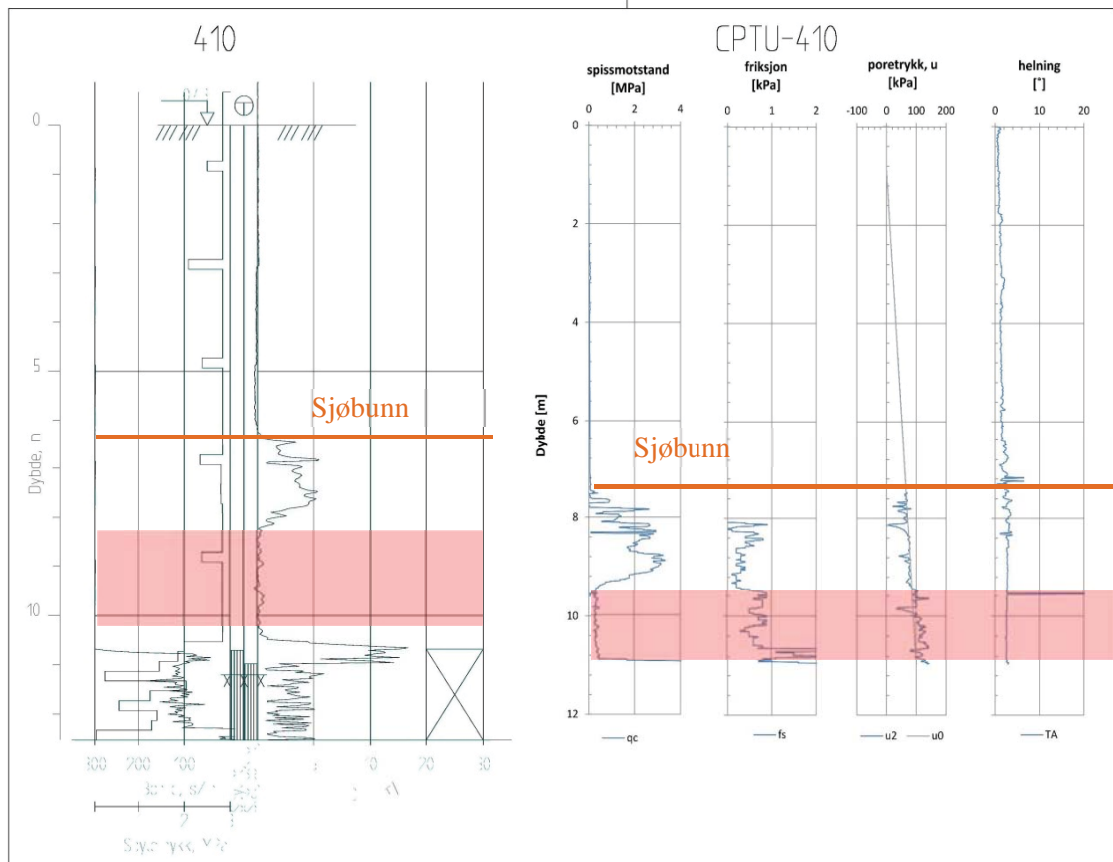
## 6.4 Tilfelle D: Løs og vannmettet silt/fin sand

### Eksempel D1: Myre, Vesterålen

Ved sjøen utenfor Myre havn i Vesterålen er det utført grunnundersøkelser fra båt uten hivkompensasjon. Området som er undersøkt er ut i fra geologiske vurderinger fra NGU avmerket som "Tynn hav-/strandavsetning" på kvartærgeologisk kart. Grunnundersøkelsene i området er primært basert på totalsonderinger, CPTU og noen få punkter med prøvetaking. Figur 38 viser resultater fra borpunkt 410 der det er utført både totalsondering og CPTU.

Merk at dybden for begge sonderinger er gitt som dybden under sonderingsnivå og at sjøtilstanden og starten på sonderingen ikke var lik under utførelsen. Sjøbunn i totalsonderingen starter her på dybde ca. 6,0 m under sjønivå og CPTU ca. 7,6 m.

Det er generelt tatt opp lite prøver i den aktuelle undersøkelsen. De få prøvene som er tatt opp viser imidlertid at grunnen består av friksjonsmasser med stor andel koraller. Kornfordelingsanalyser viser at materialet i området er noe varierende, fra velgradert til ensgradert materiale. Materialet kan klassifiseres som en sandig, grusig jordart med lag av siltig, grusig sand og sandig silt.

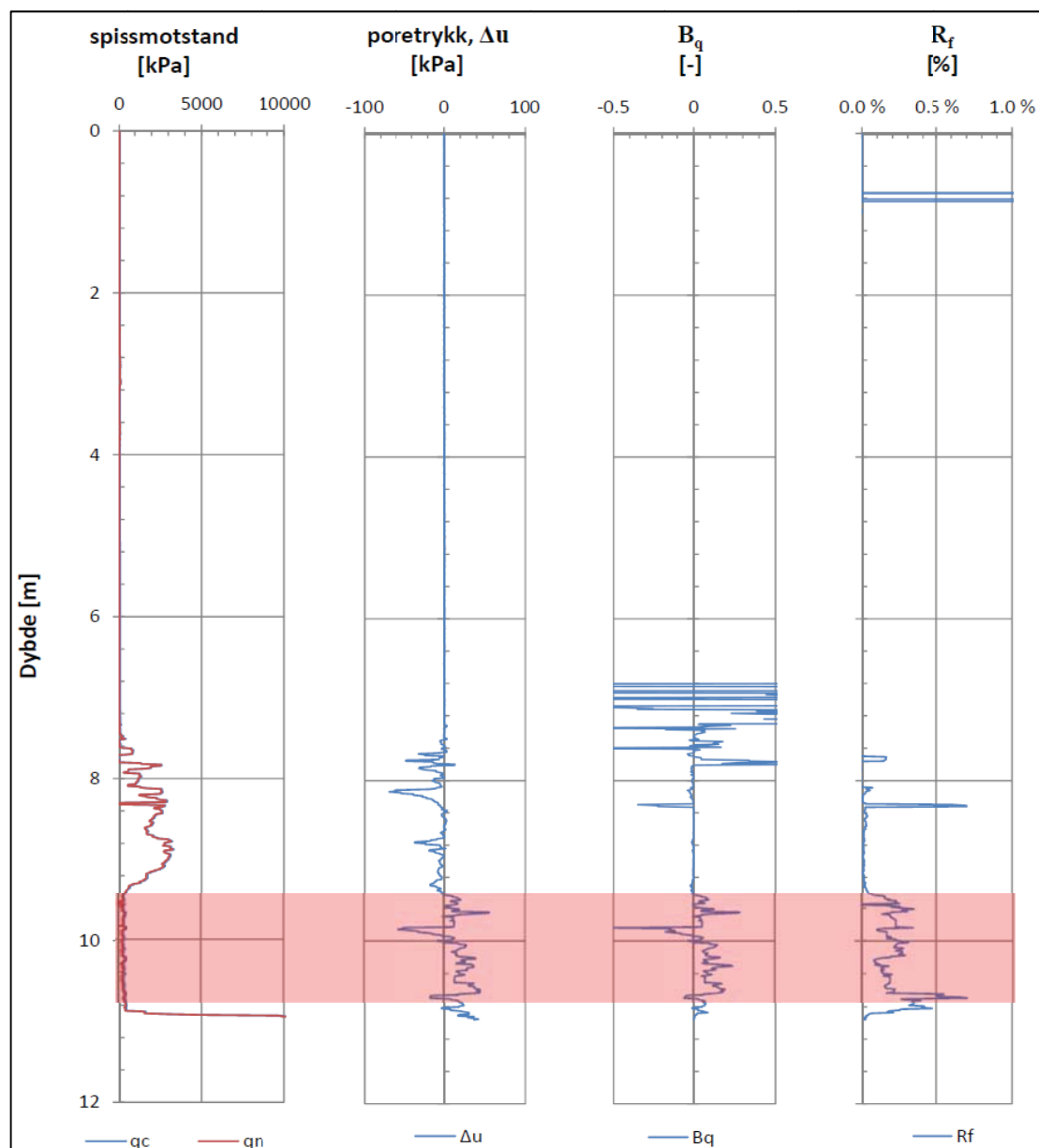


Figur 38. Myre, Vesterålen. Resultater fra totalsondering og CPTU.

Fra totalsonderingen i Figur 38 kan det ses at kurven er vertikal i et lag på ca. 2 m mektighet, som uthevet i tegningen. Spissmotstandskurven fra CPTU er også nær vertikal med relativt lav målt spissmotstand  $q_c \approx 300-400$  kPa. Dette kan samlet indikere sensitive masser. Trykksonderingen medfører imidlertid lite poreovertrykk som vist i Figur 38 og Figur 39. Figur 39 viser at poretrykksforholdet ( $B_q$ ) i dette laget er i størrelsesorden 0 - 0,2. Dette anses ikke som representativt for kvikkleire og det må derfor forventes andre masser i grunnen. Poretrykksforholdet  $B_q$  indikerer likevel at det omtalte laget er mer finkornig enn de overliggende massene.

Sonderingene er utført i en periode med tilnærmet stille sjø, men det antas likevel at det vil være noe dynamikk i både totalsonderingen og i CPTU som kan virke nedbrytende på motstanden i de siltige massene.

Eksempelet viser at totalsonderinger alene kunne ha medført en mistanke om kvikk/sensitiv leire. CPTU-sonderingen anses i dette tilfellet som tilstrekkelig til å avkrefte denne mistanken.



Figur 39. Myre, Vesterålen. Avledede verdier fra CPTU.

#### Eksempel D3: Åfjord, Sør-Trøndelag

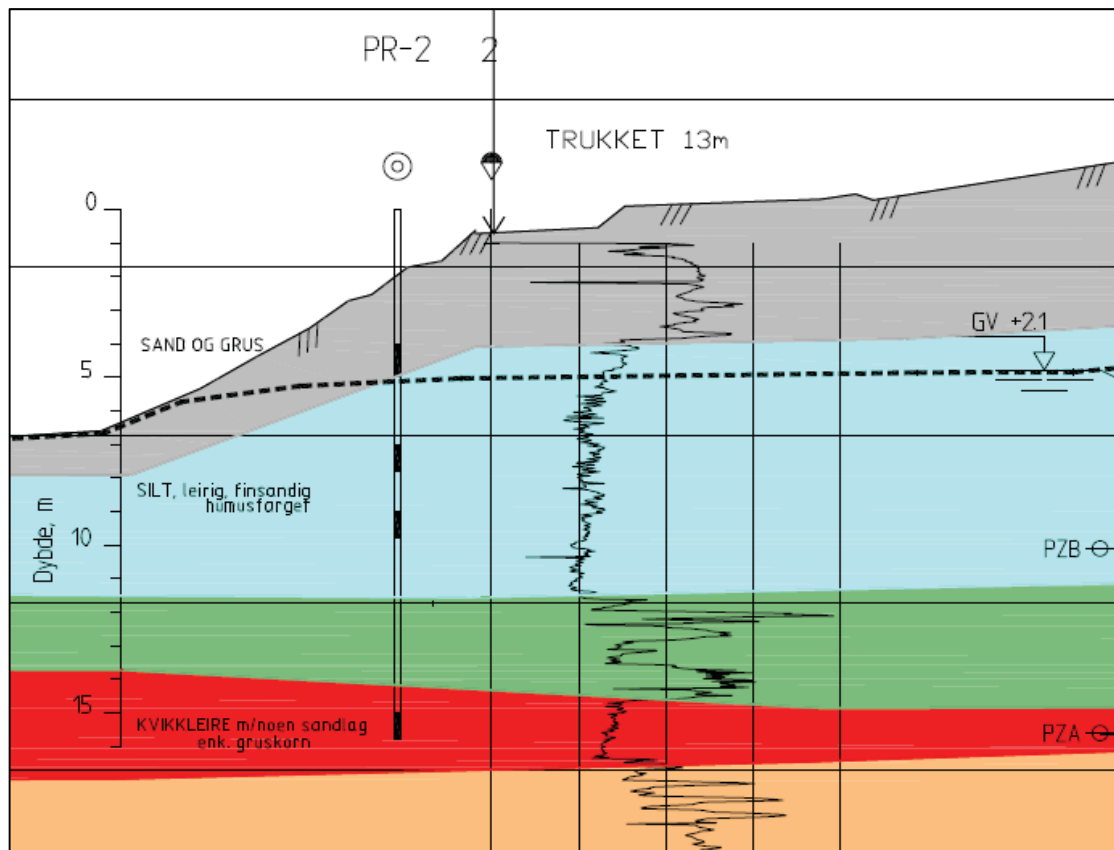
Området og de generelle grunnforholdene er beskrevet under kap. 6.3 Tilfelle C Sprøbruddsmateriale under fast og mektig topplag. I dette tilfellet fokuseres på sonderingsmotstanden i siltlaget under topplaget av sand og grus, se Figur 40. Åfjord, Sør-Trøndelag. Profiltegning med sammenligning mellom dreietrykksondering og prøve-taking.

(lyseblå farge). Siltlaget ligger stort sett under grunnvannsspeilet, er av leirig karakter og noe humusfarget. Sonderingsprofilen fra dreietrykkprofilen viser konstant eller svakt synkende tendens i siltlaget og laget kunne lett bli vurdert som sensitivt materiale fra sonderingen.

#### 6.4.1 Oppsummering med vurdering av observasjoner

Sonderingene i begge de to utvalgte eksemplene viser at kurvene i gjennomsnitt har vertikal eller avtagende strek, noe som skulle indikere kvikk eller sensitiv leire. En leirig silt vil ha stor vannbindende evne, spesielt hvis den inneholder noe organisk materiale og i utgangspunktet er

løst lagret (normalkonsolidert). Dette kan forklare den avtagende sonderingsmotstanden med dybden, ved at silten kollapser med stort overskudd av vann ved penetrasjon av boret, ikke ulikt oppførselen til kvikkleirene.



Figur 40. Åfjord, Sør-Trøndelag. Profiltegnning med sammenligning mellom dreietrykksondering og prøvetaking.

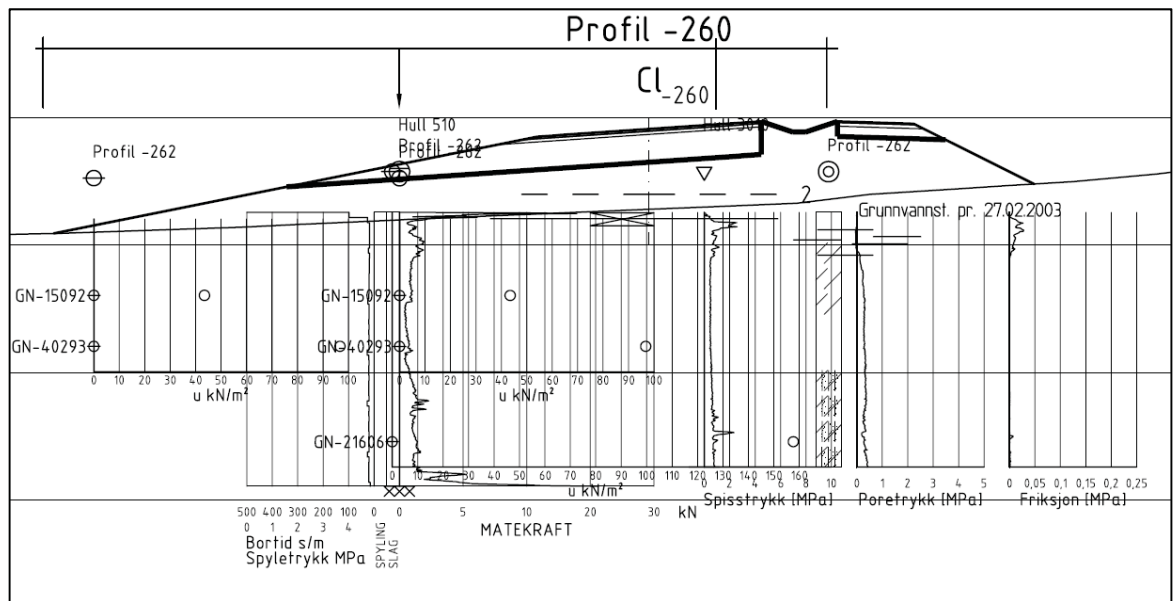
Som vist i eksempelet fra Myre i Vesterålen vil bruk av CPTU være en sikrere metode i denne type materialer ettersom poretrykksresponsen vil være klart større i (kvikk)leire enn i silt/sand, selv om friksjonsforhold og spissmotstand vil kunne være ganske like i størrelse og oppførsel. Dette eksempelet er meget illustrerende i forholdet til vår anbefaling om å se resultatene fra flere metoder samlet for å kunne vurdere kvikkleireforholdene på best mulig grunnlag.

## 6.5 Tilfelle E: Leire med artesisk poretrykk

### Eksempel E1: FV17 Spillumsstranda, Namsos

Hele planområdet er generelt preget av mektige hav- og fjordavsetninger, bestående av bløt og middels fast leire. I strandsonen fra Mettebekken og utover mot det oppmudrede området på Spillumsstranda er det registrert bløt og sensitiv leire på det sørligste partiet, se Figur 41. Det er videre registrert meget høye poreovertrykk i dybden på et parti ved den søndre delen av strandsonen, tilsvarende omtrent 8-9 m stighøyde over terreng. I området for planlagt bru over Kvernbekken er det registrert bløt og middels fast leire under et topplag av silt og sand. Registrerte dybder til berg varierer mellom 14 og 21 m.

I området mellom Kvernbekken og det oppmudrede området på Spillumsstranda er det registrert et topplag av sand og silt med gradvis økende mektighet mot nord. Under dette laget er det registrert bløt og middels fast leire med middels sensitivitet.



Oppdr.nr.: VD693C		Prosjekt: SPILLUM-METTED		Prøveserie: 510 cl		Analyseår: 2003		Prøvetaker: 54 mm						
Dybde i m	Materiale	Pr-øve	Vanninnhold %		$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	St	Skjærstyrke kN/m <sup>2</sup>						Gl. %	
			20	40			20	40	60	80	100	120		
1	Leire	1			20.5	5								
2		2			19.8	13								
3		3			19.2	10								
4		4												
5		5												
6	Siltig. Sandig Leire	6			20.5	7								
7		7			20.4	10								
8		8			20.2	9								
9		9			20.0	12								
10	Siltig. Sandig Leire													

Figur 41. Spillumsstranda, Namsos. Profiltegning med sammenligning mellom totalsondering, CPTU, borprofil fra prøvetaking og poretrykksmåling.

Dette eksemplet er inkludert for å demonstrere effektene av artesiske vanntrykk i grunnen. I utgangspunktet er dette ofte en sterkt tilskyndende faktor for kvikkleiredannelse, men det kan også ha innflytelse på de registreringer som gjøres ved boring som vist her. Laboratorieresultatene fra det utvalgte profilet viser helt klart at det ikke er påvist sprøbruddsmateriale i dette profilet. Totalsonderingen kan imidlertid tolkes som kvikkleire i deler av profilet på grunn av delvis konstant eller avtagende penetrasjonsmotstand, mens CPTU-sonderingen viser svært lav netto spissmotstand, omtrent konstant eller avtagende med dybden. Sidefriksjonen er nær eller lik 0 i omtrent hele profilet, noe som vanligvis er en klar indikasjon på kvikkleire. Imidlertid er poretrykksresponsen lav, med  $B_q$  rundt 0,5. Det siste forholdet kan være påvirket av dårlig metning av poretrykksmåleren.

### 6.5.1 Oppsummering med vurdering av observasjoner

Artesisk poretrykk vil føre til reduserte effektivspenninger i profilet, og i det aktuelle eksemplet fra Spillumsstranda er effektivspenningene stedvis  $< 10$  kPa i profilet. Dette kan forklare den lave motstanden som er registrert, spesielt for spissmotstand og sidefriksjon i CPTU-sonderingen. Poretrykksnivået ved artesiske poretrykk trenger imidlertid ikke å medføre høye verdier for poretrykksforholdet  $B_q$ , ettersom dette primært viser poreovertrykket som



respons på penetrasjon av sonden og i mindre grad er påvirket av det ambiente poretrykket i grunnen.

Eksemplet illustrerer også nytten av å gjennomføre omfattende poretrykksmålinger i situasjoner med artesisk overtrykk for å få best mulig grunnlag for tolkning av grunnundersøkelsene og de etterfølgende stabilitetsberegningene.

## **6.6 Tilfelle F: Andre forhold**

### **6.6.1 Effekt av spyling ved totalsondering**

Ved penetrasjon av faste og eventuelt steinrike lag brukes oftest totalsondering med spyling, ramming og økt rotasjon. Dette er en effektiv metode som gjør metoden til en svært fleksibel sonderingsmetode, spesielt i lagdelte og faste masser. Imidlertid kan bruk av spyling ha utilsiktede effekter i overgangen mellom faste lag og underliggende bløte masser. Spylingen foregår med relativt høyt trykk, og kan påvirke egenskapene i det øverste laget et stykke under laggrensen. Påvirkningen kan medføre redusert fasthet i det bløtere laget, noe som medfører lav penetrasjonsmotstand med dybden før den begynner å øke igjen. Dette kan i gitte tilfeller gi et sonderingsprofil som kan minne om kvikkleirenes.

Det er i slike tilfeller viktig å kontrollere om totalsonderingen er gjennomført med spyling nær overgangen til de bløtere massene, noe som vil fremgå av sonderingsprofilen.

### **6.6.2 Effekt av overkonsolidering og skjærfasthetsvariasjon**

Det må bemerkes at variasjoner i total nedpressingskraft ikke er relatert til stangfriksjon alene, ettersom store variasjoner i spisskraft vil påvirke nedpressingskraften. Den store reduksjonen i spisskraft etter at borstengene har penetrert tørrskorpelaget vil derfor umuliggjøre en sikker tolkning av grunnforholdene i det bløtere laget som ofte påtreffes under tørrskorpen. Det samme problemet oppstår når fastere eller mer overkonsoliderte lag påtreffes i et leirsediment. En tilnærmet konstant eller avtagende penetrasjonsmotstand kan også opptre når boret penetrerer jordlag med kontinuerlig avtagende plastisitet, for eksempel varvige eller siltige bunnlag, der også spisskraften vil reduseres.

### **6.6.3 Effekt av redusert stangfriksjon**

En feilkilde som påvirker tolkningen er at stangfriksjonen i en avstand fra spissen vil kunne endre seg betydelig ettersom borstrengen roteres. Dette kan oppstå hvis den høye friksjonen som oppstår ved penetrasjon av grove eller tørre jordarter reduseres ved gjentatt rotasjon av stengene, endringer i partikkelbevegelse mot stengene (for eksempel stein). Bevegelser i stangsystemet («wobbling») kan også føre til en reduksjon av friksjonen mot stengene ved at borhullet øker i diameter. Videre vil en lokal endring av stengenes diameter (friksjonsring, tilleggsmodul CPTU) kunne føre til en endring av friksjonsmønsteret langs stengene slik at penetrasjonskraften blir påvirket.

### **6.6.4 Effekt ved sjøboring**

Sonderinger som er utført ved tilnærmet stille sjø vil være likeverdige med borer på landjorden. For CPTU vil til og med forutsetningene kunne være bedre ettersom man unngår mettetproblematikk ved at poretrykksmåleren kan mettes av vanntrykket. Tilsvarende vil temperaturen i sonden hurtigere kunne utjevnes før start av sonderingen.

Ulempen ved sjøboring er først og fremst den dynamikk som vil oppstå ved økende bølgehøyde. Dette vil kunne føre til ujevn aksialbelastning på borstrengen, hvis denne ikke er hivkompensert. Sjøgangen vil dermed føre til sekvenser med øket ytre pålastning og avlastning, som vil forstyrre registreringen av den naturlige penetrasjonsmotstand i jorden. De

størrelser som potensielt sett påvirkes mest vil være spissmotstand i CPTU og total nedpressingskraft i dreietrykk- og totalsondering.

På bakgrunn av dette må profiler fra sjøboring tolkes med en viss kritisk tilnærming, spesielt hvis borloggen viser urolig sjø ved utførelsen.

## 7. Sammenligning av påvisningsmetodene

Forutsatt bruk av likt sonderingsutstyr og forsøksmetode i et undersøkelsesområde kan det i mange tilfeller oppnås et godt bilde på den relative sensitiviteten av jordlagene ved å studere sonderingskurvene. Helningen på motstandskurvene kan også bli omtrentlig kalibrert mot sensitivitetsverdier fra laboratorieundersøkelser på opptatte prøver, eventuelt verdier av omrørt skjærfasthet alene, se kap.8.2.1. Det bemerkes imidlertid at sensitiviteten bestemt på laboratorieprøver kan være for lav på grunn av prøveforstyrrelse.

Det er mulig å benytte alle typer sonderingemetoder som baserer seg på en konstant penetrasjonsrate for borstrengen, og der penetrasjonskraften på toppen av stangsystemet eller et annet relevant mål for sonderingsmotstanden registreres. Penetrasjonslengden per takskifte for nedpressingskraften bør være minst 2 meter for å redusere effekten av de tiksotropiske effektene som oppstår hver gang nedpressingen blir avbrutt for montering av nye stenger.

Dreiesondering representerer det enkleste utstyret og den mest oversiktlige feltprosedyren. Den vridde spissen medfører en betydelig omrøring ved direkte nedpressing og rotasjon av stangsystemet. Siden diameteren på spissen er betydelig større enn stangdiameteren ( $\phi 35 \text{ mm} > \phi 25 \text{ mm}$ ) vil spissen ha en viss friksjonsreducerende effekt i borhullet. Metodens fortrinn er at den tydelig tilkjenner bløte lag ved at stangsystemet synker for sin egen vekt i bløte eller sensitive partier.

Dreietrykksondering gjennomføres med  $\phi 55 \text{ mm}$  spiss og  $\phi 36 \text{ mm}$  stangdiameter. Utstyret er tyngre enn dreiesondering og gjennomføres på kortere tid med 3 m/min penetrasjonshastighet. Stigningen på den vridde spissen sammen med rotasjonshastigheten er tilpasset penetrasjonshastigheten, og borstengene skrur derved nedover i grunnen. Omrøring av jorden og den relative ekspansjonen av borhullet er derved redusert. På den annen side medfører dette at kun en del av friksjonen langs stengene registreres som en vertikal kraft.

Totalsondering gjennomføres med samme penetrasjons- og rotasjonsrate som dreietrykksondering, men utstyret er tyngre og gjennomføres med større krone og stenger ( $\phi 57 \text{ mm}/\phi 45 \text{ mm}$ ). Oppløsning i boringen vurderes å være tilsvarende som for dreietrykksondering, men reduksjon av stangfriksjon antas å være større på grunn av den noe større borkronen. Den roterende kronen medfører også en viss omrøring av massene, men det er usikkert hvor stor denne effekten er.

### Måling av totalkraft

Både dreie-, dreietrykk- og totalsondering måler et uttrykk for den totale penetrasjonskraften. Imidlertid er den omrørte skjærfastheten, og derfor indirekte sensitiviteten, kun avhengig av stangfriksjonen. Ved start av forsøket og i overflatenære lag er stangfriksjonen liten og nedpressingskraften utgjøres hovedsakelig av spisskraften. Dette endrer seg gratis med økende dybde og på store dyp er stangfriksjonen dominerende. I homogene leirprofiler er friksjonen oftest størst nær spissen, med mindre friksjonsreducerende effekter inntreffer på grunn av den noe større spissdiameteren. Friksjonen i lagene nærmere overflaten reduseres ofte gradvis på grunn av den stadig økende omrøringen fra stangsystemet. Noe reduksjon av friksjonen kan også skje på grunn av utvidelse av borehullet på grunn av kast i borstengene, spesielt i friksjonsjordarter.

På den annen side vil vann migrere bort fra omrøringssonen, noe som medfører en stadig økende omrørt skjærfasthet. Ved studier av total nedpressingskraft mot dybde antas det ofte at

de nevnte effekter er neglisjerbare, samt at variasjon i spissmotstand i leiren på grunn av teksturen i leiren er liten. Dette er ikke alltid tilfellet, spesielt ikke i overgangssoner mellom tørrskorpelag/andre faste lag og underliggende bløte eller sensitive leirlag. Overgang til siltige eller varvige leirer kan også gi feilaktig tolkning av grunnforholdene.

#### Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)

CPTU er en vesentlig mer komplisert metode som krever nøyaktige forberedelser før forsøk. Metoden gir imidlertid et vesentlig mer detaljert bilde av grunnforholdene, både hva angår lagdeling og jordart i lagene. Penetrasjon av stangsystemet finner sted uten rotasjon av stengene, og metoden gir derfor ofte begrenset omrøring av materialene. Sidefriksjonen måles på en 30 cm lang instrumentert friksjonshylse plassert like bak den koniske spissen.

Den totale nedpressingskraften måles vanligvis ikke i en CPTU. Dette kan imidlertid gjøres ganske enkelt hvis boreriggen er generelt utstyrt for ulike sonderingsmetoder der den totale nedpressingskraften måles (f.eks. totalsondering). I dette tilfellet kan vekten av borstengene og spisskraften trekkes fra den totale kraften, og friksjonskraften langs stangoverflaten bestemmes som en funksjon av nedpressingsdybde. Dette vil sannsynligvis kunne forbedre CPTU-metodens bestemmelse av kvikkleire i det en får en sikrere omrøring av materialet, og en bedre bestemmelse av reell omrørt skjærfasthet langs stengene. Feilkilder knyttet til redusert friksjon langs borstengene kan også unngås ved å benytte trykksondering, kombinert med måling av total nedpressingskraft. Forutsatt at en tilstrekkelig nøyaktig sonde benyttes, kan spisskraft og lokal sidefriksjon på spissen registreres, og reell stangfriksjon kan utledes.

Ved CPTU der både spissmotstanden og nedpressingskraften registreres, kan man skille mellom spissmotstand og stangfriksjon. Dette løser problemet med dreietrykk- og totalsonderinger, der konstant eller fallende motstand kan forårsakes av lavere spissmotstand med dybden. Metoden gir derfor et mer pålitelig bilde av friksjonsbidraget i forhold til disse to sonderingsmetodene.

#### Vingeboring

Vingeboring er den eneste in situ metoden som kan benyttes til bestemmelse av den uforstyrrede og den omrørte skjærfastheten i en leire. Bestemmelsen av den omrørte fastheten blir imidlertid ofte utelatt på grunn av tidshensyn og usikkerheter knyttet til målingen.

Den nødvendige nøyaktigheten for måling av den uforstyrrede udrenerte skjærfastheten oppgis ofte til  $\pm 1$  kPa. For å oppnå denne nøyaktigheten må torsjonsmomentet måles ved hjelp av en slippkobling mellom stengene og vingeboret. Dette gjelder også for vingeborutstyr som benytter ytterrør rundt stengene. For en nøyaktig bestemmelse av den omrørte skjærfastheten kreves en nøyaktighet som er minst 10 ganger bedre enn for bestemmelse av udrenert skjærfasthet. Dette er normalt ikke oppnåelig med dagens utstyr, men elektriske vingebor er dog bedre enn de manuelle. Det manuelle utstyret krever demontering/montering av måleinstrumentet for å røre om vingen. Dette tar noe tid og tiksotropiske effekter vil kunne påvirke fasthetsforholdene i den omrørte sonen rundt vingen.

Studier som sammenligner omrørt skjærfasthet fra vingebor med tilsvarende fra konus er blant annet utført i Sverige (Göta Älv investigation in soft sensitive Swedish clays, Statens offentliga utredningar 1962). Disse og flere andre studier viser at vingeborforsøk kan overestimere omrørt skjærfasthet, særlig i kvikkleirer.

#### Laboratoriebestemmelse med konus

Den vanlige metode for bestemmelse av omrørt skjærfasthet er å benytte konusforsøk i laboratoriet. Forsøket kan benyttes til bestemmelse av både uforstyrret og omrørt fasthet, slik at sensitiviteten kan bestemmes. På grunn av prøveforstyrrelse gir dette imidlertid ikke alltid det riktige inntrykket av leirens sensitivitet.

Bestemmelsen av den omrørte skjærfastheten for kvikkleirer er påvirket av en del usikkerheter, blant annet lokale inhomogeniteter og luftflommer i den omrørte leiren, mekaniske slitasje eller skader på konusspissen, tidsgap og tiksotropieffekter mellom omrøring og måling, samt ulikt kalibreringsgrunnlag for omrørt konus blant brukerne.

## 8. Forslag til mulig videre utvikling i NIFS

### 8.1 Etablering av utvalgte forsøksfelt

Utvalget av eksempler i denne rapporten har hatt som formål å kunne evaluere ulike metoder for påvisning av kvikkleire. For dette formålet ble profiler fra ulike områder utvalgt for å demonstrere tilfeller der detektering var vellykket, men også tilfeller der det ikke var samsvar mellom påvisning fra sonderingene og verifiserende forsøk i laboratoriet.

Det foreslås i det videre arbeid å utvide disse eksemplene og bearbeide resultatene tilsvarende det som er gjort for svenske forhold (Rankka m. fl. 2005 /2/), se kap. 8.2.1. Videre foreslås det å etablere 3-4 nasjonale forsøksfelt med ulike typer sensitiv eller kvikk leire i grunnen. Det må her satses på en regional fordeling med minst ett forsøksfelt i Østlandsområdet og ett i Trøndelag, der en søker å dekke forskjeller i forkonsolidering og kornfordeling i leirene. Forsøksfeltene må være godt dokumenterte med hensyn på grunnforhold, grunnvannsforhold, geologisk opprinnelse, mineralsammensetning og porevannskjemi.

Det bør gjennomføres sammenlignende undersøkelser med ulike typer utstyr, slik at man kan oppnå gode referansemålinger for de ulike metodene:

- **Sonderinger**
  - Dreietrykkssondering
  - Totalsondering
  - Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU)
  - R-CPTU med resistivitetmåling
- **Prøvetaking**
  - Stempelprøvetaking (φ54 mm, φ76 mm, φ95 mm)
  - Blokkprøvetaking
- **In situ målinger**
  - Elektrisk vingebor
- **Spesielle målinger**
  - 2D resistivitet
  - Grunnseismiske målinger (MASW, CSW)

I tillegg vil disse områdene kunne bli ressursområder med hensyn på øvrige forskningsaktiviteter knyttet til oppførsel av kvikkleire. Det bør søkes et samarbeid med institusjoner/firma som allerede har etablert slike nasjonale forskningsfelt i sprøbruddsmaterialer.

### 8.2 Dreietrykk-/totalsondering – aktuelle utviklingsoppgaver

Stangfriksjonen er ofte den dominerende komponenten i sensitive materialer, bortsett fra ved små penetrasjonsdybder. Det må derfor forventes at det er mulig å oppnå god korrelasjon mellom penetrasjonskraften målt på toppen av stengene og den omrørte skjærfastheten for leiren. Denne korrelasjonen kan forventes å være avhengig av stangdiameteren på borutstyret,

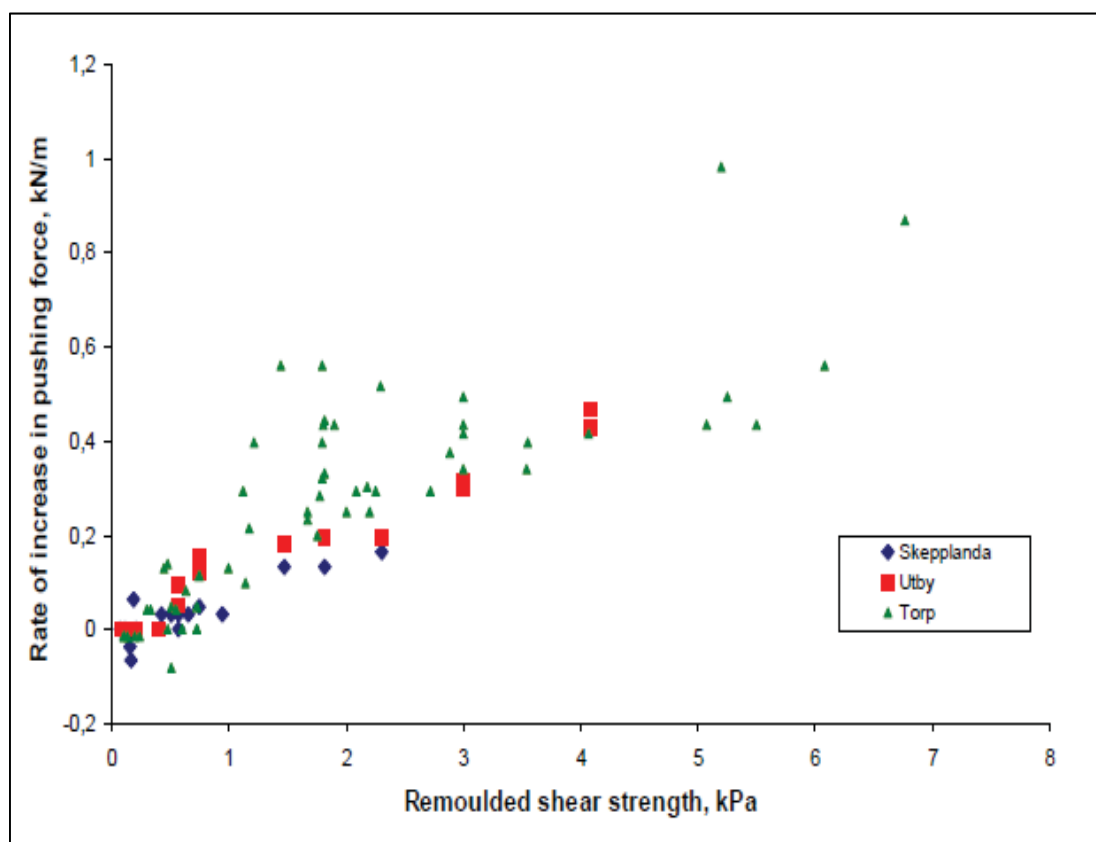
spissens utforming, forholdet mellom spissdiameter og stangdiameter, nedpressingsprinsipp (rotasjon, trykk, slag) og penetrasjonsrate. Korrelasjonen baserer seg også på at slaglengden ved nedpressingen er lang nok til å eliminere de tiksotropiske effekter som oppstår ved montering av nye stenger.

### 8.2.1 Systematisering av tidligere erfaringer

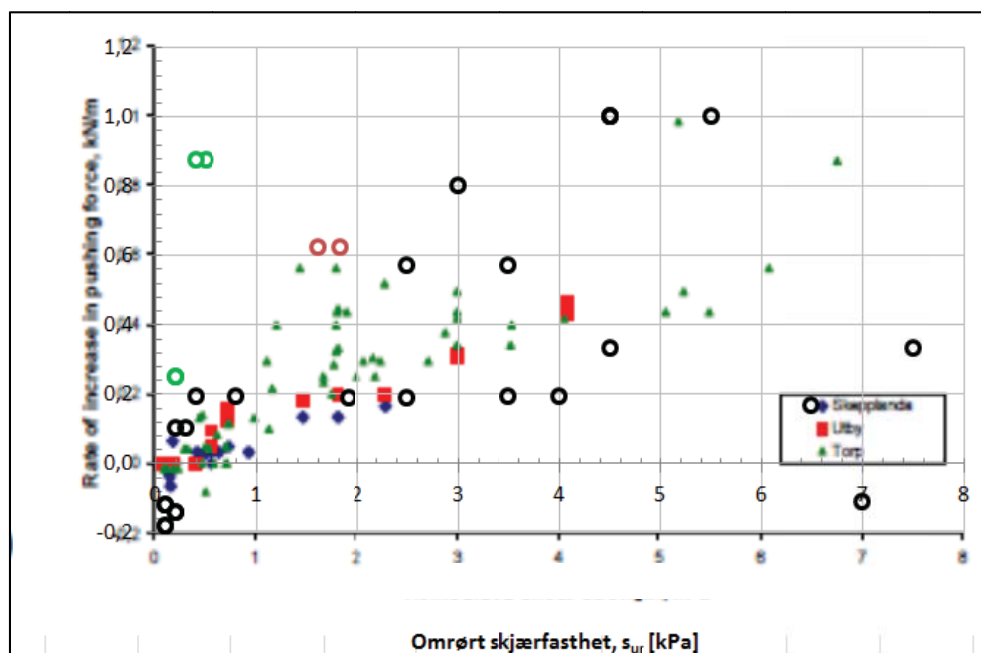
Rankka m.fl. (2005) /2/ har sammenstilt endring av sonderingsmotstand fra dreietrykksonderinger og totalsondering mot omrørt skjærfasthet for å kunne vurdere sammenheng og spredning mellom dataene, se Figur 42. Den generelle helningen av registrert sonderingsmotstand for sonderingskurven er sammenlignet for det området som anses representativt for de prøvesylindrene som er analysert i laboratoriet.

Tilsvarende sammenstillinger er utført for totalsondering og for friksjonsregistrering i CPTU. Resultater fra studiet viser en generell korrelasjon mellom helningen på kurven mellom nedpressingskraft mot dybde og materialets sensitivitet i tilsvarende dybde. En mulig bedre korrelasjon vil kunne oppnås ved en korrelasjon mot materialets omrørte skjærfasthet som sikrere lar seg bestemme i laboratoriet.

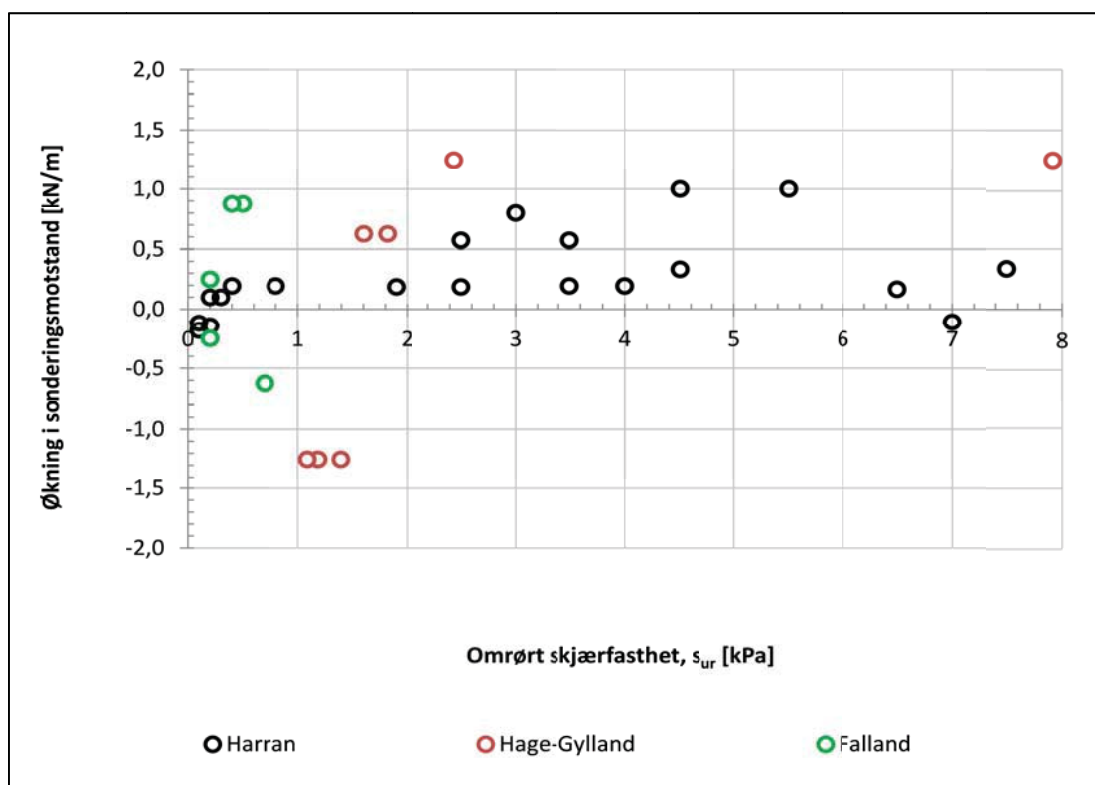
Den samme fremgangsmåten er gjennomført med utvalgte dreietrykksonderinger fra noen utvalgte Multiconsult prosjekter i Midt-Norge (for SVV ved E6 Harran, E6 Hage-Gylland og E6 Fallan). Resultatene er plottet i Figur 43 og vist separat i Figur 44. Det bemerkes at resultatene er hentet fra noe lagdelte profil med en del innslag av blant annet silt, noe som gjør sonderingsprofilene noe uryddige.



Figur 42. Helning på dreietrykksondering mot omrørt skjærfasthet (SGI rapport nr. 65/22/).

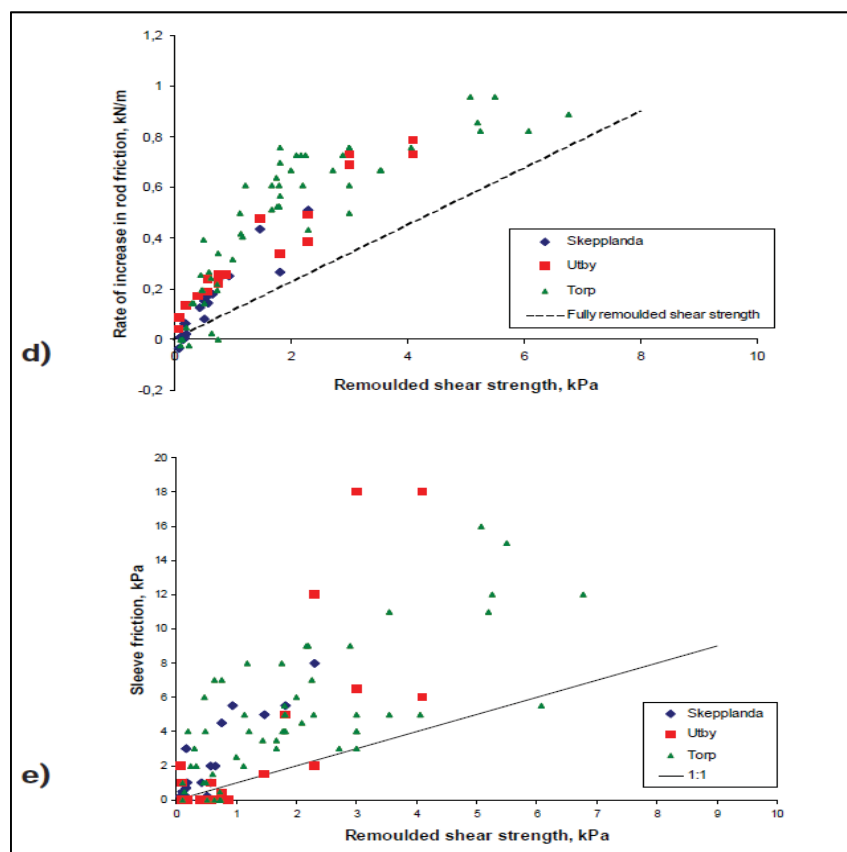


Figur 43. Helning på dreietrykksondering mot omrørt skjærfasthet fra utvalgte eksempler (Multiconsult 2011 /23/), sammenlignet med svenske erfaringer (Rankka m.fl.2005 /2/).



Figur 44. Helning på dreietrykksonderingskurve mot omrørt skjærfasthet for utvalgte eksempler i Midt-Norge (Multiconsult 2012 /23/).





Figur 45. Sammenheng mellom friksjonsrate og omrørt skjærfasthet i svenske leirer (Rankka m. fl. 2005 /2/).

Sammenstillingene av norske data som er gjort i dette prosjektet, viser noenlunde samme tendens som erfaringene fra Rankka m.fl. (2005) /2/. Som det fremgår av Figur 44 så er det imidlertid noe sprik mellom resultatene, spesielt for høyere verdier av omrørt skjærfasthet. Tilsvarende observasjoner er også gjort i de svenske sammenstillingene, se Figur 45. En større og bredere anlagt systematisering av norske data kan med fordel utføres som en oppgave i videreføringen av NIFS-prosjektet. Problemstillingen ligger spesielt godt til rette for gjennomføring av studentoppgaver.

Resultatene fra svenske sammenstillinger mellom sidefriksjon og stangfriksjon i CPTU viser klare og lineære korrelasjoner mellom korrigert stangfriksjon og omrørt skjærfasthet. Spredningen er større for målt sidefriksjon på selve CPTU sonden. Dette kan forklares med en noe unøyaktig måling av den størrelsen, delvis på grunn av generell målenøyaktighet og at målingene vanligvis ikke korrigeres for poretrykkseffekter. I tillegg vil jorden langs friksjonshylsen vanligvis ikke oppnå full omrøring ved penetrasjonen, i motsetning til materialet oppover langs borstengene. Dette vil imidlertid kunne variere noe blant leirene, og sannsynligvis spiller kornfordeling og plastisitet en viktig rolle for dette forholdet. I denne rapporten er dette forholdet bare eksemplifisert gjennom sammenhengen mellom omrørt skjærfasthet og økning i sonderingsmotstand for dreietrykksondering. I en foreslått videreføring av dette arbeidet bør tilsvarende gjøres for nedpressingskraft i totalsondering, for poretrykksforhold  $B_q$  og spissmotstandstall  $N_m = q_n / (\sigma_{vo}' + a)$  i CPTU. Spesielt det siste forholdet synes å ha et visst potensiale for påvisning av kvikkleire.

Nedpressingskraften under sondering består av to komponenter, spisskraft og friksjonskraft, samt bidraget fra borutstyrets egenvekt. Det er imidlertid bare stangfriksjonen som er relatert

til materialets sensitivitet, eller mer presist materialets omrørte skjærfasthet. Kvikkleirene med lavest omrørt skjærfasthet gir svært liten eller ingen økning i nedpressingskraft eller stangfriksjon mot dybden. Det er imidlertid ikke mulig å skille stangfriksjonen fra spisskraften, bortsett fra ved CPTU. I mange tilfeller vil imidlertid spissmotstanden (som antas å ha mindre effekt på større dyp) og vekten av borutstyret delvis motvirke hverandre.

Siden det ikke eksisterer en direkte sammenheng mellom nedpressingskraft og sensitivitet (eller omrørt skjærfasthet), er det en forholdsvis stor spredning i sensitivitet for ethvert helningsforhold i sonderingskurvene, kanskje unntatt de med negativ eller nær konstant helning. Det synes derfor ikke enkelt å bestemme en enkel matematisk sammenheng for disse korrelasjonene på dagens erfaringsgrunnlag.

### **8.2.2 Bruk av alternative prosedyrer ved gjennomføring**

Som vist i denne rapporten så finnes det eksempler på at sonderinger har konstant eller avtakende motstand som gir mistanke om kvikk/sensitiv leire, uten at prøvetaking bekrefter dette. Vice versa kan prøvetaking påvise kvikk/sensitiv leire der sonderinger viser økende motstand og ikke gir mistanke om kvikk/sensitiv leire. Opptak av prøver vil nok uansett være å foretrekke ut fra tekniske hensyn. Prøvetaking kan imidlertid være økonomisk ugunstig og dermed oppstår et insentiv for mer rasjonelle sonderingsmetoder.

#### Innvirkning av stangfriksjon

Det er ofte stangfriksjon i overliggende lag som gjør det vanskelig å detektere underliggende lag med kvikk/sensitiv leire. For å kunne utføre en sikrere bestemmelse av massenes beskaffenhet vil det være gunstig å kontrollere denne stangfriksjonen. Dette kan man se for seg gjort med flere metoder. Det som kan synes enklest i forhold til dagens utstyr og metoder, er å forbore et større hull med auger dersom det er relativt grunt til de sensitive massene. Eventuelt kan det settes ned foringsrør dersom dette er nødvendig for å holde borhullet stabilt. Slike sonderinger bør i tilfelle være klart merket i opptegningen i den geotekniske datarapporten. Av praktiske og økonomiske hensyn vil det antagelig være en begrenset dybde av slike faste lag overliggende kvikk/sensitiv leire der denne metoden vil være hensiktsmessig. Dersom den sensitive leiren ligger dypt kan det være andre metoder som er mer hensiktsmessig. Dette kan for eksempel være å utføre en ekstra sondering i et nabohull ved å kjøre stangsettet opp og ned i de faste massene for å utvide hullet slik at stangfriksjonen reduseres, og deretter foreta ny sondering i hullet og sammenligne med sonderingen som først ble utført.

### **8.2.3 Modifisering av utstyr**

For rene oppdrag med kvikkleirekartlegging kan det av økonomiske årsaker være aktuelt å benytte metoder som er mer spesifikt rettet mot å påvise sensitive masser enn hva en dreietrykk- eller totalsondering i utgangspunktet er. Da kan man tenke seg modifiseringer av eksisterende utstyr eller utvikling av mer innovative metoder.

Av modifisert utstyr kan man i enkleste form tenke seg en enkel sonderingsmetode med større arealforhold mellom spiss og stenger enn dreietrykksonderingen allerede har. Det antas at dette kan være med på å påvirke stangfriksjonen slik at denne blir mest mulig følsom for kvikkleirepåvisning. Vurderinger av dette kunne vært interessant som en mulig forskningsstudie, der det utføres modifiserte sonderinger på steder det allerede er utført vanlig sondering. Både lokasjoner med vanskelige og enklere grunnforhold burde da sammenlignes.

En annen modifisering av dagens utstyr vil være å instrumentere spissen i dreietrykk- eller totalsondering med en kraft- eller trykkmåler for bedre å kunne bestemme stangfriksjonen. Dette kan synes å være noe likt en CPTU, men her er idéen at sonden fortsatt skal rotere, slik at omrøringseffekten kommer tydelig fram når man penetrerer det sensitive laget. For å lage et

slikt utstyr økonomisk lønnsomt vil det være avhengig av å være et robust system som krever lite vedlikehold og at de målte resultatene kommer tydelig fram. For eksempel kan stangsystemet benyttes for å overføre akustiske signaler på samme måte som det gjøres ved CPTU.

En tredje metode kan være å installere en friksjonshylse et stykke bak dreietrykksspissen eller totalsonderingskronen som registrerer endringer i rotasjonsmoment. Dette kan gi en indikasjon på omrøringseffekten i dybden, og være et hjelpemiddel for vurdering av kvikk/sensitiv leire. Det antas at denne metoden må kobles opp med akustisk overføring.

Utvikling av idéer som dette passer godt å videreføre i NIFS-prosjektet, gjerne som en aktivitet på etablerte forsøksfelt, se kap.8.1.

### **8.3 Vinge boring – mulige utviklingsoppgaver**

Selv med sine ulemper har vingeboret flere sterke sider som kan utnyttes i forbindelse med kvikkleirekartlegging og relaterte problemstillinger. Med videre utvikling som skissert i dette kapitlet kan vingeboret gi:

- Pålitelig udrenert skjærfasthet til stabilitetsanalyser
- Omrørt skjærfasthet til kvikkleireklassifisering
- Kvantifisering av arbeidssensitivitet, dvs. hvor mye arbeid som skal til for å omrøre en leire

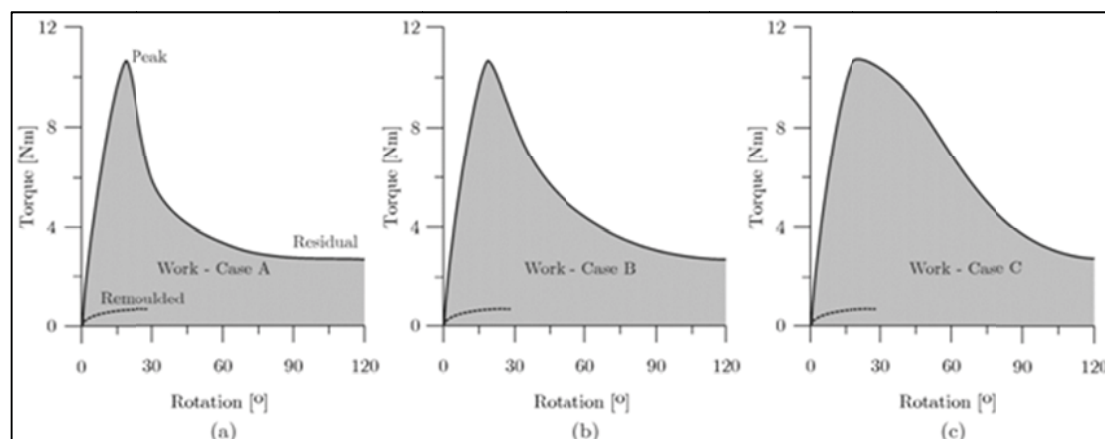
Dette vil bidra til et bedre grunnlag for å vurdere muligheten for og omfanget av et kvikkleireskred.

#### **8.3.1 Arbeidskurve fra vingeborforsøk**

Arbeidskurven fra et vingeborforsøk sier noe om potensiell sprøbrudd-oppførsel til materialet. Dette må ses i sammenheng med faren for en retrogressiv (bakovergrepene) skredutvikling i et kvikkleireområde, som er et tema som fortjener oppmerksomhet og videre vurderinger. Det er her naturlig å kombinere slike betraktninger med “Quickness-testen” til Thakur & Degago (2012) /24/, som allerede er en igangsatt aktivitet innen NIFS. Korrelasjoner og sammenligninger med DSS og CAUa arbeidskurver fra treaksialforsøk kan også inngå. Man kan her se for seg kriterier for hva som er kritisk i forhold til mulige kvikkleireskred, og skredutbredelse basert på tidligere lokale skredhendelser.

Når det gjelder utvikling av et retrogressivt skred er det flere faktorer som er avgjørende. For eksempel så må leiren ha en svært lav omrørt skjærfasthet, og skredmassene må kunne forlate skredgropen slik at veggene i skredgropen er mest mulig frie. I denne sammenhengen er det relevant å se på hvor mye arbeid som må til for å omrøre leira. Man kan forvente at en siltig, sandig leire vil ha svakere kornbindinger, og dermed mindre motstand mot omrøring, enn en jordart med høyt leirinnhold. Det er dermed større mulighet for at skredmassene blir flytende i det første tilfellet, noe som igjen øker muligheten for en utvidet retrogressiv skredutvikling.

Dette er aspekter som kan undersøkes ved hjelp av vingeborforsøk, men mekanismene er også relevante i forhold til omrøring ved første gangs penetrasjon av en trykksonde (CPTU). Hvis man logger hele moment-rotasjonskurven til over 90°, og ikke bare maksimum og omrørt torsjonsmoment, er det mulig å tolke hvor mye arbeid som skal til for å forstyrre materialet.



Figur 46. Idealiserte arbeidskurver fra vingebor. Eksempelene a-c har samme maksimum, residual og omrørt verdi, men arbeidet som skal til for å nå disse verdiene er forskjellig.

Dette er eksemplifisert i Figur 46, hvor tre idealiserte arbeidskurver fra vingeborforsøk er vist. De tre tilfellene har samme maksimum, residual og omrørt verdi, det som skiller dem er arbeidet som trengs for å nå residual og omrørt skjærfasthet. Mens tilfelle (a) viser en leire som raskt mister sin fasthet, og dermed krever lite arbeid for å bli omrørt, viser tilfelle (c) et materiale som krever mer arbeid. I et retrogressivt skred, vil materiale (a) ha størst potensiale for en omfattende skredutvikling. En slik tolkning av arbeidskurven gir informasjon utover maksimum og omrørt fasthet som kan være verdifull for å vurdere muligheten for et kvikkleireskred, for eksempel i forbindelse med kartlegging av faresoner.

Det er i denne sammenhengen verd å merke seg at residual fasthet som målt ved ca 90° rotasjon ikke nødvendigvis er det samme som omrørt fasthet målt etter 25 manuelle rotasjoner. Dette kommer av tidseffekter knyttet til lokal drenasje fra bruddsonen rundt vingeboret. Dette fører igjen til en rate-avhengighet av arbeidskurven. Dette understreker viktigheten av konsistent utførelse av vingeborforsøk hvis vurderinger av arbeidskurven skal gjøres.

### 8.3.2 Anisotropiforhold fra vingeborforsøk

Anisotropi, både når det gjelder fasthet og stivhet, er et kjent fenomen i sensitive leirer. Det er i denne sammenheng relevant å se på hva som virkelig måles når man utfører et vingeborforsøk. Hovedandelen av skjærmotstanden kommer fra de vertikale sidene på vingeboret. Denne utgjør 86-94 % av det målte torsjonsmomentet, avhengig av hvilke antagelser man gjør (Chandler, 1988 /25/). Videre argumenterer Wroth (1984) /26/ at bruddmoden rundt omkretsen av vingeboret kan tilnærmes et DSS (Direct Simple Shear) forsøk. Det er likevel ikke rett frem å sammenligne  $s_{uD}$  fra DSS laboratorieforsøk og  $s_{uV}$  fra vingebor, og i mange tilfeller vil  $s_{uV}$  være lavere enn  $s_{uD}$ . Denne forskjellen øker for lavere  $I_p$  og OCR på grunn av anisotropi mellom horisontal- og vertikalplan. Aas (1967) /27/ undersøkte anisotropi ved å benytte vingebor med forskjellig geometri. Han fant at overkonsoliderte leirer gav verdier for  $s_{horisontal}/s_{vertikal}$ -forholdet rundt 1, mens normalkonsoliderte leirer gav  $s_h/s_v$ -verdier i området 1.5-2. DiBiagio & Aas (1967) /28/ fant vingebor og in-situ direkte skjærforsøk til å gi samsvarende verdier for en svakt overkonsolidert kvikkleire med  $I_p$  på ca. 15-20 %, mens vingeboret var lavere enn DSS in situ med en faktor på 1.5-2.0 for en normalkonsolidert kvikkleire med  $I_p$  i området 5-6 %. Soydemir (1976) /29/ undersøkte disse forholdene direkte ved å utføre DSS-forsøk i ulike retninger, relativt til opprinnelig horisontal verdi. For lav-plastiske leirer nærmer forholdet  $s_{DSS,h}/s_{DSS,v}$  seg 2, mens for  $I_p > 50\%$  er forholdet rundt 1.

Vingeboret måler dermed i all hovedsak fasthet på et vertikalplan, som for lav-plastiske leirer ikke vil gi samme motstand som i et horisontalplan. Dette er noe av forklaringen for hvorfor vingebor ofte gir svært lave skjærfasthetsverdier i sensitive lav-plastiske leirer.

### **8.3.3 Korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet bestemt ved treaksialforsøk og vingebor**

Udrenert skjærfasthet målt med vingebor er beheftet med flere usikkerheter, som diskutert i kap.5.4.3. Spesielt gjelder dette effekter rundt installasjon av vingeboret, bruddforhold rundt vingen samt anisotropiforhold mellom fastheten på horisontale og vertikale plan. For å bedre tolkningsgrunnlaget kan man se for seg en korrelasjon mellom  $s_{uV}$  og  $s_{uA}$  funnet fra CAUa treaksialforsøk på høykvalitets blokkprøver. Slike korrelasjoner er allerede etablert for CPTU-sonderinger (bl.a. Karlsrud m.fl. 1996 /30/, 2005 /31/). Dette datasettet kan utvides videre til også å gi korrelasjoner mot vingebor-resultater. Det anbefales foreløpig å separere korrelasjonen på OCR og  $I_p$ , da dette er styrende parametere for vingeboret.

Disse aktivitetene foreslås å omfatte nye vingeborforsøk på etablerte forsøkssteder med blokkprøveresultater, sammenligning med eksisterende og eventuelt reviderte CPTU-korrelasjoner. Dette kan gjennomføres innenfor allerede igangsatte eller nye aktiviteter i NIFS-prosjektet.

### **8.3.4 Bestemmelse av omrørt skjærfasthet fra vingebor**

På grunn av usikkerhetene knyttet til tolkning av omrørt skjærfasthet fra vingeborforsøk, er det relevant å undersøke korrelasjonsgrunnlaget mellom denne verdien og omrørt skjærfasthet fra konusforsøk i laboratoriet. Dette vil øke påliteligheten ved detektering og klassifisering av kvikkleire ved hjelp av vingeborresultater. Data for slike korrelasjoner vil allerede være tilgjengelig fra tidligere utførte grunnundersøkelser der vingebor og indeksforsøk er utført, men det bemerkes her at eldre vingeborresultater oftest er målt med manuelt vingebor der man ikke har særlig kontroll med intern friksjon i stangsystemet.

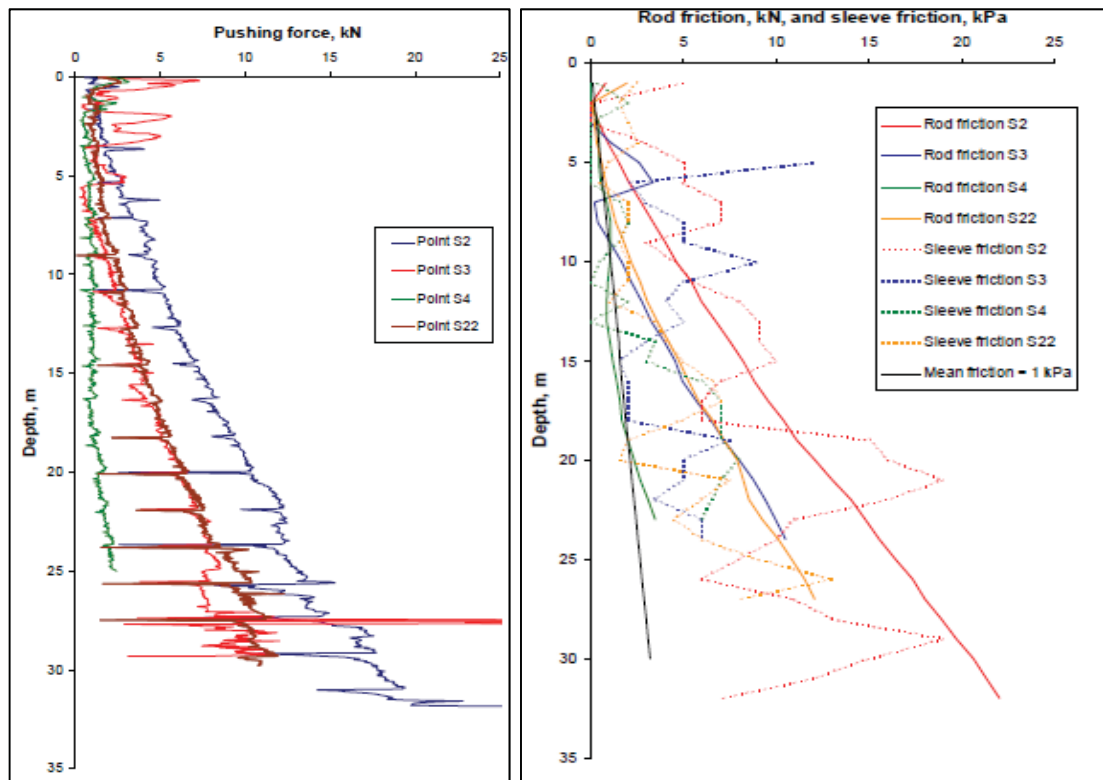
Datasettet kan utvides med undersøkelser utført i forbindelse med NIFS-aktiviteter, men det bør da prioriteres å benytte elektrisk vingebor med friksjonskontroll i nye målinger. Dette gir en noe mer pålitelig bestemmelse av spesielt den omrørte skjærfastheten.

Det er også relevant å undersøke i detalj datagrunnlaget for tabellene som benyttes ved tolkning av konusforsøk i laboratoriet ved lave skjærfastheter ( $s_r < 1$  kPa), da det her er forskjeller i tilgjengelige kalibreringstabeller.

## **8.4 Trykksondering med poretrykksmåling (CPTU) – mulige utviklingsoppgaver**

### **8.4.1 Systematisering av tidligere erfaringer**

Det foreligger i dag en stor mengde data fra CPTU i sprøbruddsmateriale. Som tidligere nevnt er erfaringene med detektering av kvikkleire fra CPTU-resultater imidlertid noe variable. Forklaringen til dette er i hovedsak at de registreringene som utføres i CPTU ikke er unikt avhengige av om leiren eller kvikk eller ikke. Spenningshistorie, plastisitet, samt det benyttede sondedesignet, påvirker de målinger som gjøres og de egenskaper som avledes fra dem. Dog bør det ikke være uprøvd å systematisere erfaringene med metoden ytterligere for klarere å kunne forstå sammenhengene. Til dette kreves gjennomgang av en rekke kvalitetsmessig tilfredsstillende CPTU data i kvikke og sensitive leirer, på lik linje med de eksemplene som er samlet i denne rapporten.



Figur 47. Sammenligning mellom totalsondering, stangfriksjon og sidefriksjon (etter Rankka m.fl. 2005 /2/).

Gjennom litteraturstudier og behandling av eksempler i dette studiet, pekes det spesielt på behovet for følgende systematiseringer:

Sammenligning mellom stangfriksjon  $Q_f$  og sidefriksjon  $Q_{sleeve}$

Den totale nedpressingskraften måles vanligvis ikke i en CPTU. Dette kan imidlertid gjøres ganske enkelt hvis boreriggen er utstyrt for å håndtere sonderingsmetoder der den totale nedpressingskraften måles ved hjelp av en lastcelle på riggen (f.eks. totalsondering). I dette tilfellet kan vekten av borstengene og spisskraften trekkes fra den totale kraften, ettersom spissmotstanden mot sonden registreres. Den totale friksjonskraften langs stangoverflaten kan da bestemmes som en funksjon av nedpressingsdybde, ved at vekten av borstengene og spisskraften trekkes fra den totale nedpressingskraften, se Figur 47. Stangfriksjonen vil vanligvis være noe mindre enn den sidefriksjonen som måles langs friksjonshylsen på grunn av ufullstendig omrøring. Omrøringen vil gradvis være mer fullstendig oppover langs borstrengen, etter hvert som det penetreres dypere. Friksjonen kan enklest bestemmes som den gjennomsnittlige friksjonen langs borstrengen, men det vil også være mulig å bestemme friksjonsøkning per meter borstang.

Dette vil sannsynligvis kunne forbedre prosedyrene ved bestemmelse av kvikkleire fra CPTU, i det en får en sikrere omrøring av materialet og en bedre bestemmelse av reell omrørt skjærfasthet langs stengene. Forutsatt at en tilstrekkelig nøyaktig sonde benyttes, kan spisskraft og lokal sidefriksjon på spissen registreres, og reell stangfriksjon kan utledes. Det anbefales å se nærmere på denne muligheten i noen tilfeller der total nedpressingskraft ved utførelse av CPTU er kjent.

Det er også ønskelig å gjennomgå de mest aktuelle identifiseringsdiagram for trykksonderingsresultater for å se hvilke som gir best resultat for kvikkleirer. Identifikasjonsdiagrammer utviklet av Robertson & Campanella (1983 /21/, 1989 /32/) er de mest benyttede nasjonalt og internasjonalt, men dette gir ikke særlig god klassifisering i



kvikke/sensitive leirer. Et annet og muligens bedre alternativ vil være å utvikle et eget nasjonalt identifikasjonsdiagram for sprøbruddsmaterialer, eventuelt utvidet til også å inkludere resultater fra resistivitetsmåling.

#### Korrelasjoner mellom omrørt skjærfasthet og sidefriksjon

Det foreligger i dag flere korrelasjoner mellom målt sidefriksjon fra CPTU og sensitivitet for leire. Den mest benyttede er korrelasjonen foreslått av Rad & Lunne (1986) /33/:

$$S_t = N_s/R_f \quad (3)$$

der:

$N_s$  = tolkningsfaktor  $7 \pm 2$

$R_f$  = friksjonsforhold =  $f_s/q_n$

$f_s$  = målt eller korrigert sidefriksjon

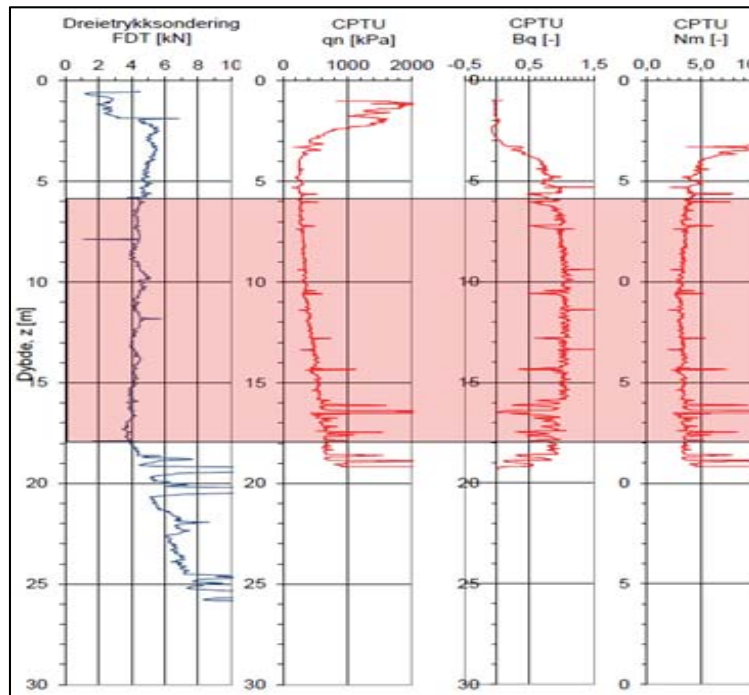
$q_n$  = netto spissmotstand

Erfaringene med korrelasjonen er variable. Den viktigste forklaringen for dette er først og fremst manglende omrøring av jorden langs friksjonshylsen, da dette vil gi for høy sidefriksjon  $f_s$ . Sannsynligvis ville man oppnå bedre samsvar mellom beregnet og målt sensitivitet ved å benytte en korrigert stangfriksjonskurve, der den gjennomsnittlige friksjonen langs stangsystemet representerer en fullstendig omrørt tilstand, se foregående vurdering vedrørende stangfriksjonen. Dette kan være en videre oppgave i NIFS, der det gjennomføres nye korrelasjoner mot omrørt skjærfasthet fra konusforsøk i laboratoriet, kombinert med gjentatte penetrasjonssyklus med stangsystemet i en CPTU. På denne måten kan det etableres sikrere korrelasjoner gjennom en ny tolkningsfaktor basert på omrørt skjærfasthet i stedet for sensitivitet.

#### Systematisering av kurvehelning for spissmotstandstallet $N_m$ mot dybde

Gjennom de tross alt fåtallige eksempler presentert i denne rapporten er det observert at spissmotstandstallet  $N_m = q_n/(\sigma_{vo}' + a)$  synes å gi en klarere og mer entydig informasjon om eventuelle kvikkleirelag ved at den negative kurvehelningen blir forsterket i kvikkleire. Resultatene i Figur 48 viser et eksempel på dette, der  $N_m - z$  kurven har en klart avtagende kurvehelning, mer i tråd med nedpressingskraften fra dreietrykksonderingen. Netto spissmotstand  $q_n$  viser i dette tilfellet lineært økende motstand og gir ingen god pekepinn på kvikkleireforekomst. Det er således godt samsvar mellom  $N_m$ - og  $B_q$ - kurven og dreietrykksonderingen kurven i forhold til påvisning av sprøbruddsmateriale.

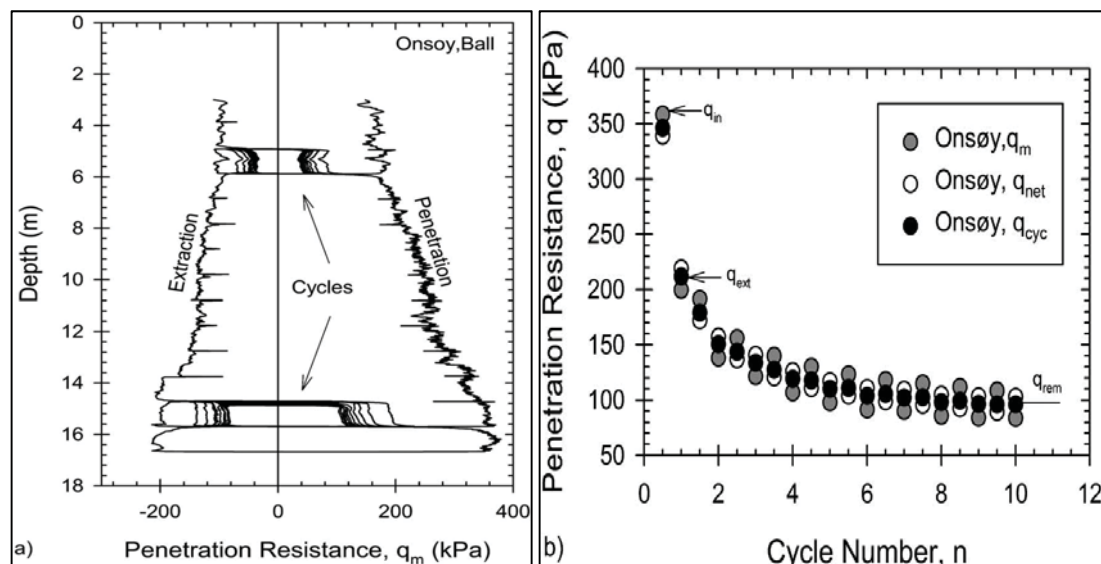
Denne observasjonen kan forklares ved at normaliseringen mot effektivt overlagingstrykk  $\sigma_{vo}'$  vil dempe effekten av økende spenning mot dybden, noe som ellers vil medføre en økning av sonderingsmotstanden med dybden. Denne hypotesen krever selvfølgelig mer utførlig dokumentasjon i en mer omfattende studie, som for øvrig vil ligge godt til rette for studentoppgaver innenfor NIFS.



Figur 48. Sammenligning mellom dreietrykkssondering og CPTU-parametrene netto spissmotstand  $q_n$ , poretrykksforhold  $B_q$  og spissmotstandstall  $N_m$ .

#### 8.4.2 Bruk av alternative prosedyrer ved gjennomføring

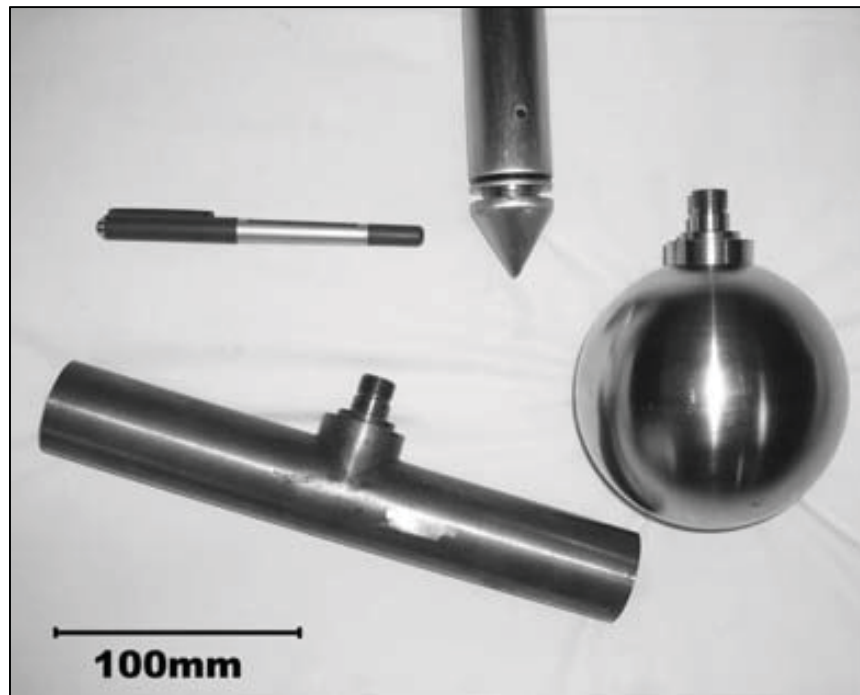
Omrørt skjærfasthet kan måles ved CPTU ved å påføre sonden sykliske opp-ned bevegelser rundt den aktuelle måledybden. Friksjonen vil reduseres for hver penetrasjonssyklus, men når etter hvert en stabil verdi som kan tolkes som den omrørte skjærfastheten. En kurve som illustrerer fasthetsreduksjonen ved gjentatte sykluser er vist i Figur 49.



Figur 49. Resultater fra sykliske CPTU-forsøk i Onsøy leire (Lunne m.fl.(2005) /34/).

Antall sykluser for å oppnå en stabil verdi for den omrørte skjærfastheten synes å være avhengig av sensitivitet og strain-softening rate for leiren. Et typisk antall på 10 repeterte sykluser synes å gi tilfredsstillende grad av omrøring for måling av den omrørte skjærfastheten, men et betydelig mindre antall kan være tilstrekkelig i svært sensitive leirer. Studier utført av Yafrate

og DeJong (2005) /35/ og numeriske analyser utført av Randolph (2004) /36/ indikerer at en syklisk penetrasjonsdistanse på 1-2 sondediametre er tilstrekkelig for omrøring av massene. Det vil være en fordel å benytte alternative spissgeometrier, for eksempel T-bar og piezoball, hvis det skal benyttes sykling for bestemmelse av fullstendig omrørt friksjon. Disse geometriene vil for det første føre til en mer effektiv omrøring enn den konvensjonelle sondespissen. Dernest vil de kunne gi mindre spredning i tolkningsfaktorene for bestemmelse av udrenert skjærfasthet fra CPTU.



Figur 50. Ulike typer alternative spisser i CPTU (T-bar (t.v.) og piezoball (t.h.))

Ved bruk av T-bar og piezoball, som avbildet i Figur 50, vil en distanse på ca. 20-25 cm være tilstrekkelig for syklingen. I praksis benyttes vanligvis en syklisk penetrasjonsdistanse som er betydelig høyere enn dette.

#### 8.4.3 Detektering av kvikkleire – bruk av kunstig intelligens

I geoteknikken er nøyaktig bestemmelse av lagdeling og jordart svært viktig i designprosessen. Laggrenser kan forårsake anisotrop jordresponns og definere mulige glideplan som kan forårsake utglidninger. Til profileringsformål benyttes i dag hovedsakelig tyngre sonderingsmetoder som dreietrykk- og totalsondering, sammen med trykksondering med poretrykksmåling. Med bakgrunn i disse metodene oppnås som regel en god forståelse av grunnforholdene, men eksemplene i denne rapporten viser at detektering av kvikkleire ofte ikke gir et entydig og godt samsvar med laboratoriemålinger. Samtidig er det de senere årene lansert nye metoder til dette formålet, blant annet 2D resistivitetsmålinger og nedhulls resistivitetsmålinger med bruk av R-CPTU.

En god kartlegging av kvikkleireforekomster krever også en grundig forståelse av de topografiske, geologiske og hydrogeologiske forhold i et område. Kombinasjonen av all geo-relatert kunnskap gir som regel en betydelig bedre forståelse av grunnforholdene enn det hver av kunnskapsbærerne kan gi alene. Dette ligger godt til rette for en videre

utvikling basert på ekspertsystemer eller bruk av kunstig intelligens. Nettverk basert på kunstig intelligens (Artificial Neural Networks, ANN) som metode er godt tilpasset en modellering av de fleste komplekse geotekniske problemer som viser stor variasjon. Metodikken har vært benyttet innen en rekke geotekniske problemer fra først på 1990-tallet. Kurup og Griffin (2006 /37/, 2010 /37/) blant andre benyttet ANN til prediksjon av jordartsoppbygging (kornfordeling) og prekonsolidering fra CPT data, som viser at denne metoden er godt egnet til denne type matematiske analyser.

Geotekniske egenskaper og oppførsel av jord er styrt av faktorer som mineralogi; struktur og tekstur, kornfordeling og porevannets sammensetning. Samvirket mellom disse faktorene er vanskelig å etablere ved tradisjonelle statistiske metoder alene ettersom faktorene kan være påvirket av hverandre. Ved bruk av kunstig intelligens kan det utvikles metodikk for å vurdere en rekke jordartsegenskaper som også kan ta hensyn til innbyrdes sammenhenger. For påvisning av kvikkleire kan en slik vurdering baseres på informasjon om geologisk opprinnelse, lokal beliggenhet og topografi, lagdeling fra sonderinger, helningsindeks på sonderingskurve, forkonsolidering og spenningshistorie.

En mulig videreføring av aktiviteten i NIFS er å gjennomføre en innledende vurdering av en slik metodisk bruk av kunstig intelligens, gjerne i samarbeid med en aktivitet innenfor probabilistisk bruk av grunnundersøkellesdata. Oppgaven må først klargjøre en del fundamentale forutsetninger for en slik metodikk, før det eventuelt bygges opp et sett med nødvendig informasjon som kan inngå i en detekteringsmodell for kvikkleire.

## **8.5 Måling av spesifikk resistivitet (R-CPTU) – mulige utviklingsoppgaver**

Det er i senere tid blitt forsket på bruk av resistivitetskartlegginger og R-CPTU for påvisning av områder med mulig kvikk eller sensitiv leire. Resistivitetsmålinger baserer seg på at man kan identifisere forekomster av ulike løsmasser og grunnfjell fra materialenes elektriske ledningsevne. Ledningsevnen i en mett leire vil korrelere med saltinnholdet, og på bakgrunn av dette kan man identifisere leirer der saltinnholdet er lavt med muligheter for forekomst av kvikkleire.

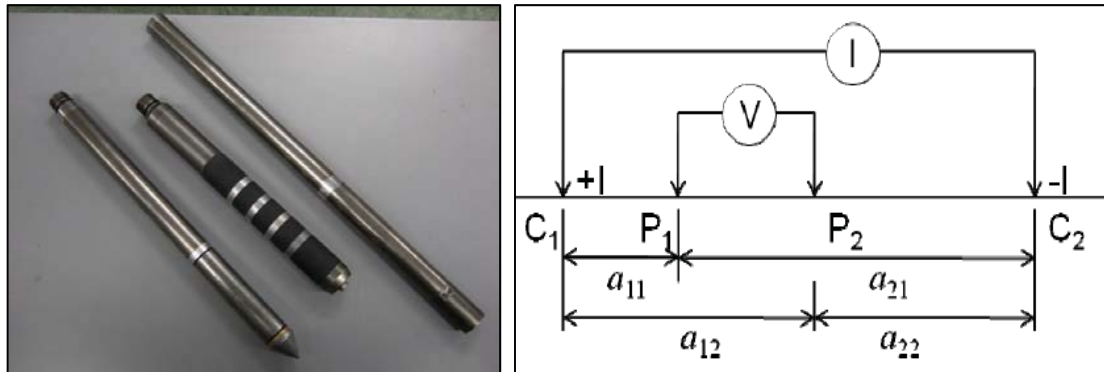
Bruk av R-CPTU kan kombineres med to-dimensjonale elektriske resistivitetsmålinger på overflaten, se blant andre Solberg m.fl. (2008) /39/, Aasland (2010) /40/ og Rømoen (2010) /41/. I Norge pågår det for tiden forskning på bruk av resistivitetsmålinger for kartlegging av kvikkleire både hos NGU og NGI, og flere andre firma og institusjoner tar nå disse metodene i praktisk bruk.

To-dimensjonal resistivitetskartlegging med overflatemåling har vist seg som en lovende metode for å påvise områder med mulig kvikkleire (Solberg m.fl. 2008 /39/). Metoden vil i mange prosjekter kunne være en verdifull innledende sonderingsmetode i forkant av tradisjonelle geotekniske undersøkelser, men tolkningen av metoden alene gir ingen entydig tradisjonelle geotekniske undersøkelser, men tolkning av resultatene alene gir ingen entydig bestemmelse av kvikkleire.

### **8.5.1 Bakgrunn for og utførelse av R-CPTU**

Resistivitet er et mål på materialenes evne til å hindre elektrisk strømgjennomgang. Resistiviteten  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ) er definert ved elektrisk feltstyrke  $E$  (V/m) over strømdensiteten  $J$  ( $\text{A}/\text{m}^2$ ) og kan beregnes fra strømmengde, en geometrifaktor og målt spenning. Resistiviteten kan måles ved punktmåling i jorden, som for R-CPTU, eller ved en overflatemåling der en oppnår et 2-dimensjonalt profil for et større område. Den målte elektriske ledningsevnen gir informasjon om jordlagene og kan i denne konteksten gi informasjon om grunnvannets saltinnhold og indikerer således graden av utvasking i marine leirer. Ledningsevnen (konduktiviteten), den inverse av resistiviteten, er målt i mS/m, og denne verdien må justeres

med en lokal kalibreringsverdi. Den beregnede resistiviteten fra målingene er en tilsynelatende resistivitet som vil være identisk med den reelle resistiviteten i grunnen om materialet er homogent. Hvis grunnen er inhomogen beregnes den tilsynelatende resistiviteten fra et vektet gjennomsnitt av resistiviteten i de enkelte lag.



Figur 51. R-CPTU med resistivitetsmodul og prinsipiell elektrodekonfigurasjon.

Et eksempel på en elektrisk resistivitetsadapter for CPTU er vist i Figur 51 (Geotech). Adapteren er montert på en ordinær 10 cm<sup>2</sup> trykksonde like bak friksjonshylsen. Adapteren inneholder en oppsetting med fire ringelektroder, tilsvarende en Wenner konfigurasjon med lik avstand mellom elektrodene. Diameteren på modulen er 44 mm, altså noe større enn selve sonden. Resistivitetsadapteren kan anvendes sammen med et trådløst dataoverføringssystem, eventuelt at dataene lagres i et minnekort i selve trykksonden. Dette gjør kabel opp til overflaten overflødig, noe som bidrar til en meget rask og effektiv sondering.

I selve resistivitetmålingen tilføres en elektrisk strøm mellom de to ytre elektrodene og potensialet måles mellom de to andre, se Figur 51. Datapunkt blir logget for hver 2. cm i sonderingen. Fra sensitiviteten i punktelektrode teori er det gitt at hovedmengden av strømmen går innenfor 2 elektrodeavstander ut til siden. Dette indikerer at bidraget horisontalt fra sonden er svært begrenset i utstrekning.

I bergarter og løsmasser er porevannet den primære lederen, mens mineraler og bergartskorn i seg selv er dårlige ledere. På grunn av dette vil mengden porevann og sammensetningen av dette påvirke materialets resistivitet i stor grad. I leire kan dette benyttes som en indikasjon på saltinnhold, siden porevannet i marine leirer inneholder salt fra havvannet leirpartiklene ble avsatt i. Resistiviteten er imidlertid også avhengig av faktorer som vanninnhold, leirinnhold, organisk innhold og mineralogisk sammensetning.

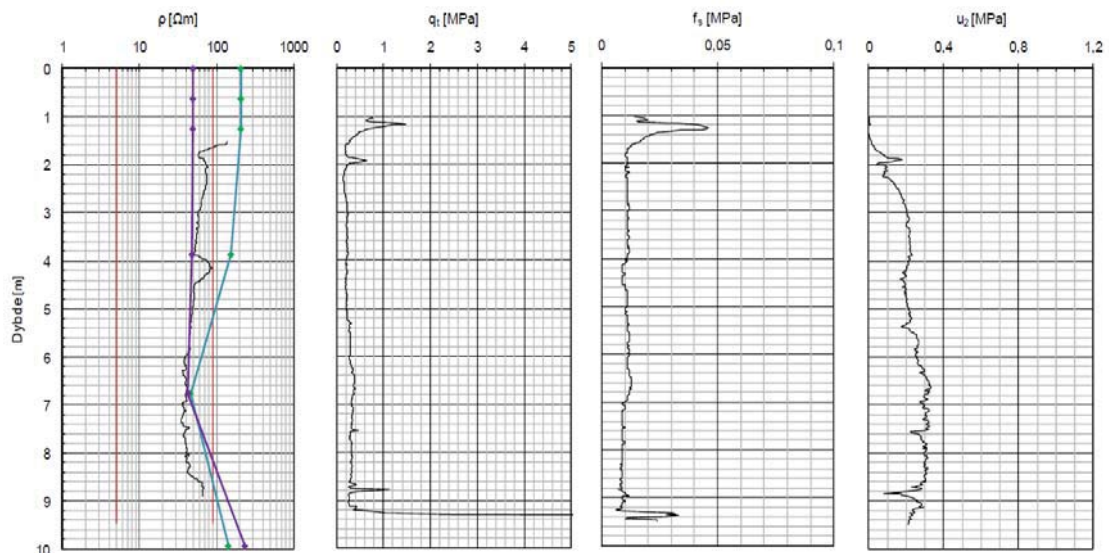
I kvikkleireavsetninger er saltinnholdet lavere enn i intakt marin leire grunnet utvasking av saltet i porevannet. Resistiviteten vil derfor være høyere i kvikkleire enn i intakt marin leire. Med resistivitetmåling som en tilleggsfunksjon til den konvensjonelle CPTU-sonden, vil R-CPTU-sonden bli et nyttig verktøy i kartlegging av kvikkleireforekomster, og man vil på et tidlig tidspunkt i grunnundersøkelserprogrammet kunne få en sikrere indikasjon på kvikkleire. Figur 52 viser et eksempel på R-CPTU måling fra Rissa (Aasland (2010) /40/).

Det er imidlertid flere faktorer enn ledningsevnen til porevannet som påvirker resistiviteten i en leire. Etter Fukue m.fl. (1999) /42/ er resistiviteten i løsmasser avhengig av blant annet:

- Metning
- Resistivitet av porevannet
- Porøsitet
- Form, størrelse og fordeling av jordpartikler



- Elektriske egenskaper for jordpartiklene og tykkelse av det elektrisk dobbeltlaget rundt leirpartiklene
- Ionekonsentrasjon og fordeling i det elektriske dobbeltlaget og porevannet
- Resistiviteten er temperaturavhengig og temperaturvariasjoner i grunnen vil kunne påvirke måleresultatet



Figur 52. Eksempel på R-CPTU profil fra Rissa, inklusive sammenligning med 2D resistivetsmålinger (etter Aasland 2010 /40/).

I motsetning til overflatebaserte målinger vil det ved sonderinger være noe omrøring av leiren i målevolumet, noe som kan redusere den målte resistiviteten. Et annet punkt for diskusjon er om bløte leirmasser kan klebe seg fast til sonden og forstyrre måleresultatet nedover i et sonderingshull. Leirinnholdet, muligens også mineralogien, kan også påvirke målt resistivitet i en leire. Hvis kornskjellet med antall leirpartikler påvirker motstanden, vil en fet leire med høyt leirinnhold kunne ha lavere resistivitet etter at den er utvasket enn en mager leire. Dette kan være en forklaring på at de fetere svenske leirene generelt har lavere resistivetsverdier for utvaskede leirer enn norske. En videre konsekvens av dette er at det vil være lettere å differensiere mellom salt og utvasket materiale i en mager leire.

Konduktiviteten i porevannet er en viktig faktor for ledningsevnen i leirer og denne størrelsen er sterkt korrelert med saltinnholdet. Egenskapene til leirpartikler gjør at de elektriske egenskapene til leire er mer komplekse enn i andre jordarter. Generelt er resistiviteten i leire lavere enn forventet ut fra ledningsevnen i porevannet på grunn av relativt god ledningsevne mellom porevann og leirpartikler. I tillegg vanskeliggjøres egenskapene ved at konduktiviteten i intakte leireprøver vil være redusert av kjemiske bindinger mellom leirpartiklene. Ved omrøring brytes disse bindingene, og en omrørt leire vil lede dermed bedre enn en uforstyrret prøve (Fukue m.fl. 1999 /42/).

Ideelt ville man ønsket å koble resistivitet mot sensitivitet eller omrørt skjærfasthet, antatt at høyere resistivitet betyr mer utvasket leire og dermed høyere sensitivitet. Det ble imidlertid ikke funnet noen direkte sammenheng mellom sensitivitet og resistivitet i undersøkelser utført av Schälín & Tornborg (2009) /43/. Det samme gjaldt korrelasjonen mellom omrørt skjærfasthet og resistivitet. Aasland (2010) /40/ konkluderte med de samme erfaringer fra resistivetsmålinger i Rissa leire. Resistivetsmålinger for kartlegging av kvikkleire bør derfor



foreløpig sikte seg inn på en separasjon mellom salt og utvasket leire, snarere enn en bestemmelse av de nevnte geotekniske parametre.

I følge Rømoen m.fl. (2010) /41/ har arbeid med å etablere representative resistivitetsintervall for jordtyper foregått i mange år i Norge og Sverige. Intervaller, inndeling av jordtyper og målemetoder varierer imidlertid mellom studiene. Basert på overflateresistivitet og geotekniske sonderinger fra Buvika i Sør-Trøndelag, med henvisninger til tidligere arbeid av Berger (1980 /44/, 1983 /44/ Berger, B. (1980): "Rapport om vertikale elektriske sonderinger i Verdal". NTH Norges Tekniske Høgskole, Trondheim, Norge. /45/), Calvert & Hyde (2002) /46/ og Rankka m.fl. (2005) /2/, foreslo Solberg m.fl. (2008) /39/ et intervall for kartlegging av kvikkleire.

Tabell 1. Resistivitet i ulike materialer (Solberg m.fl. 2008 /39/).

Jordart	Resistivitet ( $\Omega\text{m}$ )	Merknad
Saltholdig, marin leire	1 – 10	
Utvasket leire, mulig kvikk leire	10 – 80	Dette kan også være siltige masser eller leire som har passert det kvikke stadiet
Tørrskorpeleire, grove materialer, sand og grus	> 80	
Berg	Flere 1000	

Saltinnholdsmålinger utført av Söderblom (1969) /47/ tydet på at leire med resistivitet over 5-10  $\Omega\text{m}$  er representativ for mulig kvikkleire, mens Schälin & Tornborg (2009) /43/ rapporterer om funn ned mot 3  $\Omega\text{m}$  i sulfatholdig kvikkleire. Lundström m.fl. (2009) /48/ mente at leirer med resistivitet over 5  $\Omega\text{m}$  også kan være kvikke. Rømoen m.fl. (2010) /41/ henviser blant annet til vertikale elektriske sonderinger utført av Berger (1980) /44/ i Verdal og har nyansert resistivitetsintervallene for leire og silt noe:

- 1-20  $\Omega\text{m}$ : Leire, salt
- 20-90  $\Omega\text{m}$ : Leire, utvasket
- 70-300  $\Omega\text{m}$ : Leire, tørrskorpe
- 50-200  $\Omega\text{m}$ : Silt, mett
- 200-1000  $\Omega\text{m}$ : Sand, mett

Rømoen m.fl. (2010) /41/ kombinerte videre data fra grunnundersøkelser med R-CPTU fra fem ulike lokaliteter i Norge med andre studier fra Skandinavia og fant et mulig kvikkleire-intervall på 5-90  $\Omega\text{m}$ . Rømoen m.fl. (2010) /41/ foreslår videre å benytte lokale korrelasjoner mellom resistivitet og forekomst av kvikkleire for å begrense intervallet, og dermed stramme inn tolkningene. Et empirisk sammensatt resistivitetsintervall for hver lokalitet kan imidlertid kreve et stort datagrunnlag, avhengig av hvilket sikkerhetsnivå man ønsker å legge seg på.

### 8.5.2 Kombinasjon mellom R-CPTU og 2D måling av resistivitet

Bruk av 2D resistivitetsmålinger for detektering av kvikkleire er i hovedsak aktuelt for undersøkelser av store områder eller korridorer i terrenget. 2D resistivitetskartlegging kan påvise lag med salte eller utvaskede marine sedimenter med relativt god sikkerhet, og dette kan i enkelte tilfeller begrense behovet for sonderinger. Det er likevel påvist overlapp mellom resistivitetsintervallene i marin leire og silt, så det vil være behov for bruk av andre metoder som på annet grunnlag kan skille mellom disse jordartene.

Overflatemålinger gir kontinuerlig informasjon om grunnforholdene mens sonderinger kun gir punktinformasjon med muligheter for å overse bortgjemte lommer av kvikkleire. Denne

informasjonen er likevel viktig for å kalibrere tolkningen av resistivitetsdataene og den generelle bestemmelsen av geotekniske parametre. Resistivitetsmålinger på overflaten er best tilpasset undersøkelser utenfor tettbygd strøk ettersom kabler, ledninger og andre installasjoner i grunnen kan forstyrre målingene.

Det generelle prinsippet for måling av overflateresistivitet er å benytte et linjeutlegg med lik avstand mellom elektroder som stikkes ned i grunnen. I målingen påføres elektrisk strøm mellom to av disse elektrodene, mens det elektriske potensialet måles mellom ett eller flere par naboelektroder. De målte potensialene påvirkes av påført strømstyrke og ledningsevnen i jordlagene. Influenssone med tanke på dybde og volum avgjøres av innbyrdes avstand mellom elektrodene og deres posisjon. Ved å utføre målinger for et stort antall elektrodeavstander oppnås et sett med data som gjør det mulig å tolke og presentere et bilde av den elektriske motstand i grunnen langs målelinjen. Et FEM-program benyttes i tolkning av målte data. Dette sammenligner måleverdiene med en teoretisk modell-løsning (pseudo-seksjon) som representerer den underliggende grunnen. Avviket mellom målt og teoretisk verdi minimaliseres ved beregningen slik at man oppnår god overensstemmelse med målte data.

Kvaliteten på målte data avhenger av grunnens homogenitet og oppnådd kontakt mellom elektrodene og grunnen. Best resultat oppnås i naturlig mettete grunn, spesielt i leirprofiler med tynt tørrskorpelag. Utførelse i fyllinger, veger med grove masser og lavt grunnvannsnivå gir sjelden gode resultater, spesielt hvis grunnen inneholder kabler, ledninger, peler og nedgravde konstruksjoner. Leirsedimenter med tykke tørrskorpelag gir også dårligere tolkning. Begrensningen i tolkningen er forutsetningen om at grunnen under målelinjen på overflaten har de samme egenskapene i horisontal retning. Dette er ikke et stort problem ved homogene grunnforhold, men usikkerheten øker rimeligvis ved variabel geologi i området.

Det er noe usikkert om målt resistivitet med 2D overflatemåling gir samsvarende verdier målt med R-CPTU i et gitt nivå. Målemetodene er forskjellige og det er derfor forventet noe avvik mellom størrelsesordenen på verdier målt med metodene. R-CPTU gir en lokal måling i motsetning til den overflatebaserte kartleggingen hvor målingene er påvirket av store volum. Samtidig er samsvar mellom metodene viktig for et felles tolkningsgrunnlag og eventuell kombinert bruk av resultater fra R-CPTU og 2D resistivitetskartlegging.

Direkte sammenligninger viser imidlertid at det kan oppnås godt samsvar mellom resistivitetsverdier funnet ved 2D-overflatemåling og R-CPTU (Aasland (2010) /40/). For de enkleste og mest homogene grunnforholdene er det overraskende godt samsvar mellom R-CPTU og overflatemålt resistivitet. Samsvaret avtar som man kunne forvente med økende kompleksitet av de geologiske forholdene. Schälin & Tornborg (2009) /43/ fant 2-3  $\Omega\text{m}$  i lavere resistivitet ved bruk av R-CPTU.

For videre arbeid med resistivitetsmålinger innenfor NIFS prosjektet er det først og fremst viktig å få oppsummert og systematisert erfaringene som er gjort med R-CPTU og 2D resistivitetsmålinger så langt. Dette gjelder ikke minst hvorvidt måleresultatene er kompatible og gir rimelig samsvar i tolkningen. Videre er det viktig å sammenstille erfaringer med generell tolkning av kvikkleire fra CPTU og sammenligne dette med resistivitetsdata. Bruk av R-CPTU vil kunne styrke detektering av kvikkleire ved denne kombinasjonen av resistivitet og tolkede mekaniske parametre ettersom metodene benyttet hver for seg har visse svakheter i den retning. En kombinasjon med 2D-overflatemålinger vil i tillegg kunne gi kontinuerlig informasjon langs målelinjen, noe som kan forbedre tolkningen av enkeltprofiler med bruk av CPTU/R-CPTU. Det vil også kunne være en fordel å gjennomføre nedhulls resistivitetsmåling med R-CPTU på utvalgte lokasjoner i et målenett for å forbedre tolkningen av overflatemålingene.

Kombinasjon av resistivitetsmåling og en forbedret tolkning av side- og stangfriksjon som beskrevet i kap.8.4.1 vil også være en interessant kombinasjon. Her kan det være et praktisk problem at enkelte resistivitetsadaptore har et større tverrsnitt enn sonderingsstengene, noe som igjen kan påvirke friksjonsmålingene.

## 9. Oppsummering

Metodene som anvendes i kartlegging av kvikkleire må velges med utgangspunkt i et kostnytte behov, anvendeligheten av metode i forhold til de rådende grunnforhold og øvrig bruk av måledataene i et aktuelt prosjekt. Tradisjonelle sonderingsmetoder er i mange tilfeller tilstrekkelige for påvisning av kvikkleire. Det er imidlertid vist i denne rapporten at disse metodene kan gi feilaktige konklusjoner om kvikkleireforekomster i begge retninger, det vil si at de ikke kan påvises sikkert fra sonderingene alene.

Det synes ikke å være nevneverdige forskjeller mellom dreietrykksondering og totalsondering i påvisningspotensiale, mens dreiesondering vil kunne gi rimelig gode påvisninger på grunne dyp, noe avhengig av tørrskorpens tykkelse og mektigheten på kvikkleirelaget. Selv om denne metoden benyttes lite nå vil den være et godt supplement på steder der det er dårlig fremkommelighet for tynge borerigger.

CPTU har også visse begrensninger i bestemmelse av kvikkleirer, til tross for at denne metoden måler både motstand, friksjon og drenasjeegenskaper for materialene. En videreutvikling av metoden med måling av totalkraft og separasjon av stangfriksjon fra spisskraft og vektlegging av detektering av dimensjonsløse forhold ( $N_m$ ,  $B_q$ ,  $R_f$ ) vil trolig forbedre påvisningspotensiale betydelig, uten at tilleggskostnadene er særlig store. Dette vil imidlertid medføre noe mer tolkningsinnsats i forhold til de enklere sonderingsmetodene, noe som vil oppveies av en tryggere påvisning av sprøbruddsmaterialene. CPTU gir i tillegg et bredt datagrunnlag for tolking av geotekniske parametre som i enkelte tilfeller kan medføre mindre behov for prøvetaking og kostbare laboratorieundersøkelser.

I scenariet med utvidet bruk av CPTU i kvikkleirekartlegging er det mulig å integrere resistivitetsmålinger, enten ved hjelp av R-CPTU eller målinger med elektrodeutlegg på overflaten (2D-resistivitetsmåling). At metodene måler like verdier legger grunnlaget for at det kan brukes et felles tolkningsgrunnlag, og at metodene kan kombineres i kartleggingen. Ved disse målingene er det strengt tatt kun ledningsevnen eller resistiviteten som måles, noe som understreker viktigheten av en grunnleggende forståelse hva som måles i forhold til påvisning av et sprøbruddsmateriale. Resistivitetsspekteret som dekker utvaskede leirer er forholdsvis stort, og tolkningsmuligheten avhenger av hvilken nedre grense for kvikkleire som velges. Lokale forhold og stedsspesifikke kriterier bør kunne legges inn i tolkningsforutsetningene for å oppnå best mulig tolkning av resistiviteten. Det er derfor et betydelig behov for videreutvikling av resistivitetsmålinger, ikke minst for å forbedre tolkningsprosedyrene i skjæringspunktet mellom mekaniske parametre og resistivitet.

Videre oppgaver innenfor dette delprosjektet i NIFS bør etter SINTEF/Multiconsults mening finne sin forankring i ett eller flere av de tema som er beskrevet over, gjerne flere tema i kombinasjon innenfor et større anlagt forskningsprogram. Vi ser frem til å kunne bidra til denne utviklingen i samarbeid med øvrige aktører i NIFS-prosjektet.

## 10. Referanser

- /1/ Statens Vegvesen (2012): "Grunnundersøkellesmetoder for kartlegging av kvikkleire". Grunnlagsdokument for NIFS-prosjektet.
- /2/ Rankka K., Andersson-Sköld Y., Hultén C., Larsson R., Leroux V. & Dahlin T. (2005): "Quick clay in Sweden". Rapport 65, SGI Statens Geotekniska Institut, Linköping, Sverige.
- /3/ Torrance, J.K. (1976): "A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays". Géotechnique, 24(2).
- /4/ Rosenquist, I. (1978): "A general theory for the sensitivity of clays". Proceeding of the interdisciplinary conference held at the University of Luleå. Permout Press.
- /5/ Hansbo, S. (1975): "Jordmateriallära". Almqvist & Wiksell, Uppsala, Sverige.
- /6/ Bjerrum, L. (1955): "Norske marine leirers geotekniske egenskaper". NGI Norges Geotekniske Institutt. Publikasjon 7. Oslo, Norge.
- /7/ Statens Vegvesen (2010): "Geoteknisk felthåndbok - råd og metodebeskrivelser". Håndbok 280.
- /8/ Norsk Geoteknisk Forening (1989): "Veiledning for utførelse av dreiesondering". Norsk Geoteknisk Forening, melding nr. 3, rev.1.
- /9/ Norsk Geoteknisk Forening (1989a): "Veiledning for utførelse av dreietrykksondering". Norsk Geoteknisk Forening, melding nr. 7, rev.1.
- /10/ Norsk Geoteknisk Forening (1994): "Veiledning for utførelse av totalsondering". Norsk Geoteknisk Forening, melding nr. 9.
- /11/ Cadling, L. & Odenstad, S. (1950): "The vane borer, an apparatus for determining the shear strength of clay soils directly in the ground". Proceedings 2, SGI Statens Geotekniska Institut, Stockholm, Sverige.
- /12/ Norsk Geoteknisk Forening (1989b): "Veiledning for utførelse av vingeboring". Norsk Geoteknisk Forening, melding nr.4, rev.1.
- /13/ Norsk Geoteknisk Forening (2010): "Veiledning for utførelse av trykksondering". Norsk Geoteknisk Forening, melding nr. 5, rev. 2.
- /14/ Aas, G. (1976): "Totalspenningsanalyser – prinsip og grunnlag". NIF Norske Sivilingeniørers Forening, kurs i Jordartsegenskaper, Gol, Norge.
- /15/ Robertson, P.K. & Campanella, R.G. (1989): "Design manual for use of CPT and CPTU". University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- /16/ Sandven, R. (1990): "Strength and deformation properties of fine grained soils obtained from piezocone tests". Dr.ing. avhandling 1990:3, NTH Norges Tekniske Høgskole, Trondheim, Norge.
- /17/ Sandven, R. (2012): "Sund, Rissa. Tolkning av nye grunnundersøkelser. Bestemmelse av design-parametre". Multiconsult rapport r414792-2, Trondheim, Norge.
- /18/ Möller, B. & Bergdahl, U. (1982): "Estimation of the sensitivity of soft clays from static and weight sounding tests". Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European symposium on penetration testing, ESOPT 2, Amsterdam, Vol. 1.
- /19/ Rygg, N. (1978): "Dreietrykksondering: Tolkning av sonderingsresultat". Vegdirektoratet, Veglaboratoriet, Intern rapport nr. 816, Oslo, Norge.
- /20/ NVE Norges Vassdrags- og Elektrisitetsvesen (2008): "Retningslinjer for planlegging og utbygging i fareområder langs vassdrag, vedlegg 1: Vurdering av områdestabilitet ved utbygging på kvikkleire og andre jordarter med sprøbruddegenskaper". NVE Retningslinjer 2008/1.
- /21/ Robertson, P.K. & Campanella, R.G. (1983 a,b): "Interpretation of cone penetration test. Part I: Sand, Part II: Clay". Canadian Geotechnical Journal, vol.20 (4).
- /22/ Statens Geotekniska Institut (2004): "Quick clay in Sweden". SGI Statens Geotekniska Institut, rapport nr.65, Linköping, Sverige.
- /23/ Multiconsult (2012): "Helning på dreietrykksonderingskurve mot omrørt skjærfasthet fra utvalgte eksempler, sammenlignet med svenske erfaringer". Sammenstilling av sonderings- og laboratorieresultater fra E6 Harran, E6 Fallan og E6 Hage-Gylland. Internt notat (upublisert).

- /24/ Thakur, V. & Degago, S. (2012): "*Quickness of sensitive clays*". Géotechnique letters, vol. 2, July-September.
- /25/ Chandler, R.J. (1988): "*The in-situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane*". Vane shear strength testing in soils: Field and Laboratory studies. ASTM STP 1014, Philadelphia, USA.
- /26/ Wroth, C.P. (1984): "*The interpretation of in situ soil tests*". 24. Rankine lecture, Geotechnique, vol.34 (4).
- /27/ Aas, G. (1967): "*Vane tests for investigation of anisotropy of undrained shear strength in clay*". Proceedings. Geoteknisk konferanse: Shear strength properties of soils and rock, Oslo, Norge.
- /28/ DiBiagio, E. & Aas, G. (1967): "*The in situ undrained shear strength measured on a horizontal failure plane by large-scale direct shear tests in quick clay*". Proceedings. Geoteknisk konferanse: Shear strength properties of soils and rock, Oslo, Norge.
- /29/ Soydemir, C. (1976): "*Strength anisotropy observed through simple shear tests*". Lauritz Bjerrum Memorial Volume, NGI Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge.
- /30/ Karlsrud, K., Lunne, T. & Brattlien, K. (1996): "*Improved CPTU correlations based on block samples*". NGM Nordisk Geoteknikermøte 1996, Reykjavik, Island.
- /31/ Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, D.A. & Strandvik, S. (2005): "*CPTU correlations for clays*". Proceedings, 16th ICSMGE, Osaka, Japan.
- /32/ Robertson, P.K. (1990): "*Soil classification using the cone penetration test*". Canadian Geotechnical Journal, vol. 27(1).
- /33/ Rad, N.S. & Lunne, T. (1986): "*Correlations between piezocone results and laboratory soil properties*". Rapport 52155-39, NGI Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge.
- /34/ Lunne, T., Randolph, M.F., Chung, S.F., Andersen, K.H., & Sjursen, M. (2005): "*Comparison of cone and T-bar factors in two onshore and one offshore clay sediments*". Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG 2005, Gourvenec & Cassidy (red), Perth, WA, Australia.
- /35/ Yafrate, N.J. & DeJong, J.T. (2005): "*Considerations in evaluating the remoulded undrained shear strength from full flow penetrometer cycling*". Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG 2005, Gourvenec & Cassidy (red), Perth, WA, Australia.
- /36/ Randolph, M.F. (2004): "*Characterisation of soft sediments for offshore applications*". Keynote lecture, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conference on Site Characterisation, vol.1, Porto, Portugal.
- /37/ Kurup, U. & Griffin, E.P. (2006): "*Prediction of soil composition from CPT data using general regression neural network*". Journal of Computing in Civil Engineering, vol.20.
- /38/ Kurup, P.U., Griffin, E.P. & Tumay, M.T. (2010): "*Novel methodologies for soil characterization from CPT data*". 2<sup>nd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- /39/ Solberg, I.L., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Hansen, L., Rokoengen, K. & Sandven, R. (2008): "*Resistivity measurements as a tool for outlining quick-clay extent and valley-fill stratigraphy: A feasibility study from Buvik, central Norway*". Canadian Geotechnical Journal, vol. 45.
- /40/ Aasland, R. (2010): "*Kartlegging av kvikkleire med 2D resistivitet og R-CPT i Rissa*". Masteroppgave, vår 2010, NTNU Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- /41/ Rømoen, M., Pfaffhuber, A.A., Karlsrud, K. & Helle, T.E. (2010): "*Resistivity of marine sediments retrieved from R-CPTU-soundings: A Norwegian case study*". Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- /42/ Fukue, M., Minato, T., Horibe, H. & Taya, N. (1999): "*The micro-structures of clay given by resistivity measurements*". Engineering Geology, vol. 54.
- /43/ Schälin, D. & Tornborg, J. (2009): "*Evaluation of CPT-R and resistivity measurements in quick clay area*". Chalmers University, Göteborg, Sverige.
- /44/ Berger, B. (1980): "*Rapport om vertikale elektriske sonderinger i Verdal*". NTH Norges Tekniske Høgskole, Trondheim, Norge.
- /45/ Berger, B. (1983): "*Geofysiske metoder anvendt i ingeniørgeologiske undersøkelser*". Dr.ing.avhandling, NTH Norges Tekniske Høgskole, Trondheim, Norge.
- /46/ Calvert, H.T. & Hyde, C.S.B. (2002): "*Assessing landslide hazard in the Ottawa valley using electrical and electromagnetical methods*". Proceedings of the symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Las Vegas, EEGS.



- /47/ Söderblom R (1969): "Salt in Swedish clays and its importance for quick clay formation". Proceedings nr. 22, SGI Statens Geotekniska Institut, Stockholm, Sverige.
- /48/ Lundström, K., Larsson, R. & Dahlin, T. (2009): "Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods". Landslides, vol.6 (1).

### Øvrig litteratur

Dahlin T., Leroux V., Larsson R. & Rankka, K. (2005): "Resistivity Imaging for Mapping of Quick Clays for Landslide Risk Assessment". Near Surface 2005, Palermo, Italy.

Donohue S., Long, M., O'Connor, P., Helle, T.E., Pfaffhuber A. & Rømoen, M. (2009): "Geophysical mapping of quick clay - A case study from Smørgrav, Norway". Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Dublin, Ireland.

Helle, T.E., Pfaffhuber, A.A., Rømoen, M., Løken, T. & Karlsrud, K. (levert til publisering): "Resistivity logging (R-CPTU) to delineate quick clay, assessed by geochemical analysis: A Norwegian case". Innsendt manuskript til Canadian Geotechnical Journal 2010.

L'heureux, J.S. (2012): Personlig kommunikasjon.

Leroueil, S., Hamouche, K., Ravenasi, F., Boudali, M., Locat, J., & Virely, D. (2003): "Geotechnical characterization and properties of a sensitive clay from Quebec". Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Tan et al. (eds.), Balkema, vol. 1.

Lo, K.Y., Bozozuk, M. and Law, K.T. (1976): "Settlement analysis of the Gloucester test fill". Canadian Geotechnical Journal, vol.13 (4).

Lunne, T., Long, M., & Forsberg, C.F. (2003): "Characterization and engineering properties of Onsøy clay". Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Tan m.fl. (red), vol.1, Balkema.

Lunne, T., Robertson, P.K. & Powell, J.J.M. (1997): "Cone Penetration Testing in geotechnical practice". ISBN: 0-751-40393-8, Chapman & Hall, London, England.

Løfaldli, M., Løken, T., Rise, L. & Rokoengen, K., (1981): "Kvartærgeologisk undersøkelse av kvikkleireskredet i Rissa ved Trondheimsfjorden". ISSN: 0332-5288.

Milsom, J. (2002): "Field Geophysics" (3. utgave). John Wiley & Sons.

Norges Geotekniske Institutt (2009): "SIP 12 – Resistivity anisotropy in quick clay". NGI number:200910103-00-24R.

Ottesen, H.(2009): "CPTU med resistivitetmålinger". Masteroppgave, NTNU Norges Teknisk-naturvitenskapelige Universitet, Trondheim, Norge.

Statens Vegvesen (2010): "Håndbok 016 Geoteknikk i vegbygging".

Statens Vegvesen (2005): "Håndbok 014 Laboratorieundersøkelser".

### Datarapporter for utvalgte eksempler

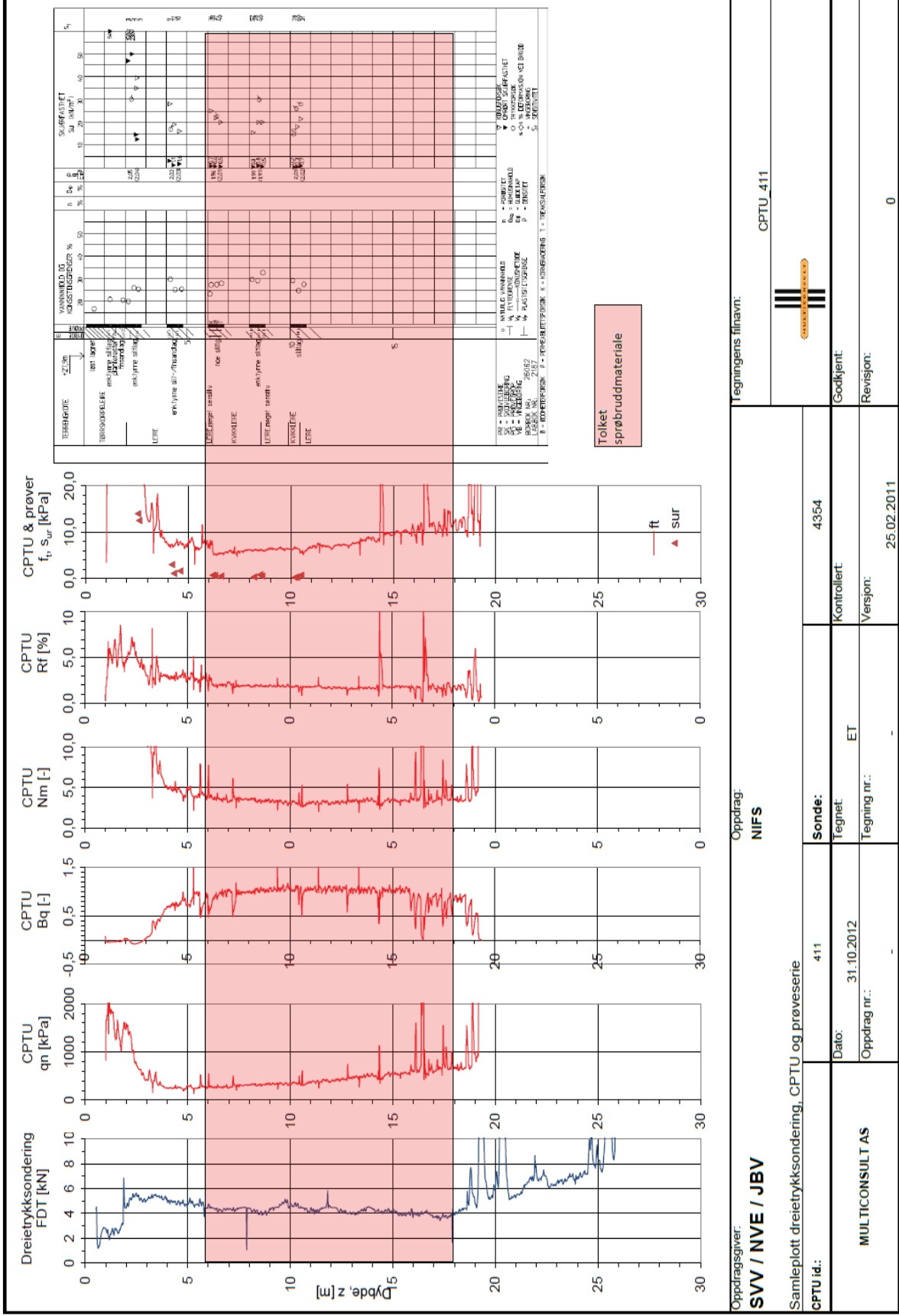
Rapport nr.	Oppdrag	Utførende	Oppdragsgiver
113251	Huseby, Lørenfallet	Multiconsult Oslo	Privat
414049	E6 Harran	Multiconsult Trondheim	Statens vegvesen Midt
414622	E6 Haga-Skjerdingsstad	Multiconsult Trondheim	Statens vegvesen Midt
413725	Varghiet Skoger, Råkvåg	Multiconsult Trondheim	Privat
412380	E6 Møllenberg	Multiconsult Trondheim	Statens vegvesen Midt
415436	Blaklia, Trondheim	Multiconsult Trondheim	SINTEF



413710	FV17 Holte-Minsås, Verdal	Multiconsult Trondheim	Statens vegvesen Midt
414653	Åfjord sentrum, S-Trøndelag	Multiconsult Trondheim	Åfjord kommune
415342	E6 Hage – Gylland	Multiconsult Trondheim	Statens vegvesen Midt
411544	Lauvliå, Meråker	Multiconsult Trondheim	NVE Midt
413692	Meråker sentrum	Multiconsult Trondheim	NVE Midt
412074	Spillumsstranda, Namsos	Multiconsult Trondheim	Statens vegvesen Midt
SINTEF	Myre, Vesterålen	Multiconsult Trondheim	Kystverket Nord

## Vedlegg

- Vedlegg 1**    **Sammenstilling av forsøksresultater - eksempel**
- Vedlegg 2**    **Oversikt over utvalgte eksempler**
- Vedlegg 3**    **Notasjoner**



Oppdragsgiver: <b>SVV / NVE / JBV</b>		Oppdrag: <b>NIFS</b>	
Samleplott dreitrykksondering, CPTU og prøveserie		Legningens finnavn: <b>CPTU_411</b>	
CPTU id.: <b>MULTICONCONSULT AS</b>	411	Sonde: <b>4354</b>	Godkjent
Dato: <b>31.10.2012</b>	Tegnet: <b>ET</b>	Kontrollert:	Revisjon: <b>0</b>
Oppdrag nr.:	Tegning nr.:	25.02.2011	

**VEDLEGG 2**  
**NIFS DELPROSJEKT 6 DETEKTERING AV KVIKKLEIRE**  
**OVERSIKT OVER UTVALGTE EKSEMPLER**

OPPDRAK	STED	PROFIL	ENKELTBORING	BESKRIVELSE
<b>SPRØBRUDDSMATERIALE UNDER TYNT TOPPLAG</b>				
113251	Huseby, Lørenfallet, Romerike  Pdf-figurer i rapport 113251r3_dell	-	DT7/PR1    DT10/VB1    DT5/VB2    DT11/VB3	<p><b>DELVIS GODT SAMSVAR PR-DT.</b> Viser godt samsvar mellom dreietrykkprofil med negativ helning og klassifisert kvikkleire under ca. 7 m dybde. I leirlaget over viser dreietrykkprofillet vertikal strek, men ikke-sensitiv leire.</p> <p><b>DELVIS DÅRLIG SAMSVAR VD-DT.</b> Vingebor viser kvikkleire mellom 11,5 og 15,5 m. Dreietrykk viser delvis positiv stigning av kurve, kun 1 m intervall antyder kvikkleire.</p> <p><b>DÅRLIG SAMSVAR VB-DT.</b> Vingebor viser ikke-sensitiv siltig leire i hele profilet mellom 2 og 15 m. Dreietrykkprofillet viser vertikal, men noe uryddig strek mellom 5 og 16 m. Ville nok blitt tolket som kvikkleire.</p> <p><b>INTERESSANT TILFELLE VB-DT.</b> Vingebor viser kvikkleire mellom 7 og 10 m. Dettet kan også indikeres i dreietrykkprofillet, men profilet gir ikke noe spesielt tydelig informasjon om kvikkleire (høy motstand). Ville nok ikke blitt tolket som kvikkleire uten vingebormålingen.</p>
414622	Fallan, Melhus	Fallan 2-2	2	<p><b>MEGET GODT SAMSVAR PR-DT-CPTU.</b> Kvikkleire påvist i lab, dybdeintervall 6-23 m. Dreietrykk viser klar negativ helning i kvikkleirelagene mellom 5-25 m. CPTU viser</p>

413725	Råkvåg, Sør-Trøndelag	A-A 34	2	<p>høy <math>B_q</math> i kvikkleirelagene mellom 10 og 35 m. Netto spissmotstand og friksjonsforhold ikke entydig.</p> <p><b>GODT SAMSVAR PR-DT-CPTU.</b> Kvikkleire påvist i lab, fra ca. 2 m. Dreietrykk viser vertikal helning i kvikkleirelagene fra samme dybde, med meget liten motstand. CPTU viser ikke unormalt høy <math>B_q</math> i kvikkleirelagene. Netto spissmotstand viser vertikal strek, friksjonsforhold rundt 1 %.</p>
412380	Møllenberg, Trondheim	-	823	<p><b>GODT SAMSVAR PR-DT-CPTU.</b> Kvikkleire påvist i lab, fra ca. 5 m. Dreietrykk viser vertikal helning i kvikkleirelagene fra samme dybde, med meget liten motstand. CPTU viser ikke unormalt høy <math>B_q</math> i kvikkleirelagene, rundt 0,8. Netto spissmotstand viser vertikal strek, friksjonsforhold rundt 1 %.</p>
415436	Blaklia, Trondheim	100	4, TK554-44	<p><b>DÅRLIG SAMSVAR DR-PR-DT.</b> Kvikkleire påvist i lab ved ca. 5 m. Dreietrykksondering gir ingen god indikasjon på kvikkleire. Dreiesondering gir enkelte steder avtagende dreiemotstand i ikke-kvikkleire.</p>
413710	Holte – Minsås, Verdal	101	2, TK128-52	<p><b>GODT SAMSVAR DR-PR-DT.</b> Kvikkleire påvist i lab, fra ca. 12 m. Dreietrykk viser vertikal helning i kvikkleirelagene fra samme dybde. Dreiesondering gir avtagende dreiemotstand i kvikkleirelaget.</p>
		109	411	<p><b>GODT SAMSVAR PR-DT-CPTU.</b> Kvikkleire påvist i lab, fra ca. 6 m. Dreietrykk viser negativ helning i kvikkleirelagene fra samme dybde, med meget liten motstand. CPTU viser høy <math>B_q</math> (&gt;1,0) i kvikkleirelagene. Netto spissmotstand viser svakt økende strek, friksjonsforhold rundt 2 %.</p>
		111	120	<p><b>DÅRLIG SAMSVAR PR-DT, ikke CPTU.</b> Kvikkleire påvist i lab under 7 m. Totalsondering øker i gjennomsnitt lineært</p>

				med dybden, selv om det kan antydes vertikal strek mellom takskiftene.
<b>SPRØBRUDDSMATERIALE UNDER FAST, MEKTIG TOPPLAG</b>				
414653	Åfjord sentrum	104	4	<b>GODT SAMSVAR PR-TOT, DÅRLIG SAMSVAR CPTU.</b> Kvikkleire påvist i lab under 11 m. Dreietrykk viser vertikal helning i kvikkleirelagene mellom 9-16 m. CPTU viser kun middels høy $B_q$ i kvikkleirelagene mellom 9 og 13 m. Netto spissmotstand viser i gjennomsnitt vertikal strek, men er ikke entydig. Friksjonsforhold er ca. 1 % i kvikkleiren.
414532	E6 Hage-Gylland	970	146, tegning 116	<b>DÅRLIG SAMSVAR PR-TOT.</b> Sprøbruddsmateriale påvist i lab under 8 m. Totalsondering øker i gjennomsnitt lineært med dybden, selv om det kan være små partier som antyder sensitivt materiale.
<b>LAGDELT/VARVIG LEIRE</b>				
411544	Lauvli, Meråker	103	18	<b>VANSKELIG TOLKNING DT-PR.</b> Laboratoriedata viser kvikkleire mellom kote 93 og 94. Dreietrykkprofilen er veldig hakkete i dette intervallet, men viser nedadgående tendens. Ingen opplagt tolkning av kvikkleire fra sonderingsprofilen.
		100	20	<b>VANSKELIG TOLKNING DT-PR.</b> Laboratoriedata viser ikke kvikkleire i noen prøver. Dreietrykkprofilen er veldig hakkete i dette intervallet, men viser delvis nedadgående tendens som tilsvarer kvikkleire i BP18. Ingen store forskjeller i sonderingsprofil, men bare det ene profilen viser kvikkleire.
413692	Meråker sentrum	100	R11	<b>VANSKELIG TOLKNING DT-PR.</b> Laboratoriedata viser



413692	Meråker sentrum	104	R19	<p>kvikkleire under ca. 10 m. Dreietrykkprofilen viser ingen entydig indikasjon på dette. CPTU profilen er ikke ført så dypt.</p> <p><b>VANSKELIG TOLKNING DT-PR.</b> Laboratoriedata viser kvikkleire under ca. 17 m. Dreietrykkprofilen viser ingen entydig indikasjon på dette. CPTU profilen gir en viss indikasjon på dette, men er meget uryddig.</p>
<b>LEIRE MED ARTESISK PORETRYKK</b>				
412074	Spillumsstranda, Namsos	-260	510	<p><b>DÅRLIG SAMSVAR TOT-PR-CPTU.</b> Kvikkleire ikke påvist i lab. Totalsondering avtar eller er lineær i store deler av profilen. Tilnærmet vertikal netto spissmotstand, svært lav sidefriksjon, forholdsvis lavt <math>B_q</math>-forhold. Skyldes artesisk poretrykk, ca. 8-9 m over terreng.</p>
<b>SILT/SAND</b>				
SINTEF	Myre, Lofoten	-	410	<p><b>TOLKNING I SILT/SAND</b> Laboratoriedata viser silt og sandmasser i hele profilen. Totalsonderingsprofilen viser vertikal helning, som kan misforstås som kvikkleire. CPTU viser omtrent 0 poreovertrykk (<math>B_q \sim 0</math>), varierende sidefriksjon og svakt økende spissmotstand.</p>
414653	Åfjord sentrum	102	2	<p><b>SAMMENLIGNING TOLKNING SILT – KVIKLEIRE</b> Dreietrykkprofilen viser klar indikasjon på kvikk eller sensitiv siltig leire, mens laboratorieresultatene viser leirig, finsandig silt.</p>

## Notasjoner

### Greske symboler

Symbol		Enhet
$\varepsilon$	Tøyning	%
$\phi$	Friksjonsvinkel	°
$\gamma$	Tyngdetetthet	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_d$	Tørr tyngdetetthet	kN/m <sup>3</sup>
$\sigma_{h0}$	In situ horisontal effektiv spenning	kPa
$\sigma_{v0}$	In situ vertikal effektiv spenning	kPa
$\sigma_{v0}$	In situ vertikal totalspenning	kPa
$\sigma_{h0}$	In situ horisontal totalspenning	kPa
$\sigma_1$	Største hovedspenning	kPa
$\sigma_3$	Minste hovedspenning	kPa
$\sigma_c$	Prekonsolideringsspenning	kPa
$\tau$	Skjærspenning	kPa
$\tau_f$	Skjærspenning ved brudd	kPa

### Latinske symboler

Symbol		Enhet
a	Attraksjon	kPa
$B_q$	Poretrykkspenning $\Delta u / (q_t - \sigma_{v0})$	-
c	Kohesjon	kPa
g	Tyngdeaksellerasjon	m/s <sup>2</sup>
$I_L$	Flyteindeks	%
$I_p$	Plastisitet(sindeks)	%
m	Modultall	-
M	Ødometermodul	MPa
$p_f$	Sannsynlighetsfaktor	%
$s_f$	Omrørt skjærfasthet	kPa
$S_t$	Sensitivitet	-
$s_{uA}, s_{uD}, s_{uP}$	Udrenert skjærfasthet (A=aktiv, D=direkte, P=passiv)	kPa
$s_{ur}$	Omrørt skjærfasthet	kPa
$s_{uv}$	Udrenert skjærfasthet, vingebor	kPa
u	Poretrykk	kPa
$\Delta u$	Endring i poretrykk	kPa
w	Vanninnhold	%
$w_L$	Atterbergs flytegrense	%
$w_p$	Atterbergs plastisitetsgrense	%

### Forkortelser

CAUa	Anisotropt konsolidert, aktivt udrenert treaksialforsøk
CAUp	Anisotropt konsolidert, passivt udrenert treaksialforsøk

DSS	Direkte skjærforsøk
CPTU	Trykksondering med poretrykksmåling
GV	Grunnvannsstand
OCR	Overkonsolideringsgrad

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

## Utgitt i Rapportserien i 2012

- Nr. 1 Kvikkleireskred ved Esp, Byneset i Trondheim. Kari Øvrelid (20 s.)
- Nr. 2 Årsrapport for tilsyn 2011 (40 s.)
- Nr. 3 Første inntrykk etter ekstremværet Dagmar, julen 2011 (28 s.)
- Nr. 4 Energy consumption. Energy consumption in mainland Norway (59 s.)
- Nr. 5 Climate change impacts and uncertainties in flood risk management: Examples from the North Sea Region (62 s.)
- Nr. 6 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. 4. kvartal 2011. Finn Erik Ljåstad Pettersen (red.) (86 s.)
- Nr. 7 Statistikk over nettleie i regional- og distribusjonsnettene 2012. Inger Sætrang (53 s.)
- Nr. 8 Flomrisikoplan for Gaula ved Melhus. Et eksempel på en flomrisikoplan etter EUs flomdirektiv (78 s.)
- Nr. 9 Inntak Viddal – FoU-prosjekt på tilbakespyling. Sluttrapport. Jan Slapgård (31 s.)
- Nr. 10 Oversikt over vedtak og utvalgte saker. Tariffer og vilkår for overføring av kraft 2011 (15 s.)
- Nr. 11 Flomsonekart: Delprosjekt Ålen: Kjartan Orvedal, Julio Pereira
- Nr. 12 NVEs årsmelding 2011
- Nr. 13 Vannet vårt. Hydrologi i Norge 2011
- Nr. 14 Capacity building in Hydrological Services Course in Water Level recording and Data Processing at Ministry of Water and Energy 13th – 16th February 2012. Documentation (23 s.)
- Nr. 15 Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2011. Jonatan Haga og Per Alve Glad (40 s.)
- Nr. 16 Challenges in Flood Risk Management Planning. An example of a Flood Risk Management Plan for the Finnish-Norwegian River Tana. Eirin Annamo (59 s.)
- Nr. 17 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. 1. kvartal 2012. Finn Erik Ljåstad Pettersen (red.)
- Nr. 18 Eksempelsamling. Risiko- og sårbarhetsanalyser for kraftforsyningen
- Nr. 19 Annual Report 2011 The Norwegian Energy Regulator
- Nr. 20 Flomberegning for Levangselva. Lars-Evan Pettersson
- Nr. 21 Driften av kraftsystemet 2011. Karstein Brekke (red.)
- Nr. 22 Annual report 2009 The cooperation between the Norwegian Agency for Development Cooperation (Norad), the Ministry of Foreign Affairs (MFA) and the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)
- Nr. 23 Flaumsonekart. Delprosjekt Naustdal Siss-May Edvardsen, Camilla Meidell Roald
- Nr. 24 Årsrapport for utførte sikrings- og miljøtiltak 2011
- Nr. 25 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. 2. kvartal 2012. Finn Erik Ljåstad Pettersen (red.)
- Nr. 26 Glimt fra NVEs historie. Per Einar Faugli
- Nr. 27 Glimses form the history of NVE. Per Einar Faugli
- Nr. 28 Regiontjenesten 100 år. Per Einar Faugli
- Nr. 29 Flomsonekart. Delprosjekt Vigeland. Per Ludvig Bjerke og Julio Pereira
- Nr. 30 Energibruksrapporten 2012. Energibruk i husholdningene.
- Nr. 31 Flom og stor vannføring forårsaket av ekstremværet Frida august 2012
- Nr. 32 Bioressurser i skog – kartlegging av økonomisk potensial. Even Bergseng, Tron Eid, Per Kristian Rørstad og Erik Trømborg, UMB
- Nr. 33 Naturfareprosjektet: Kvikkleireworkshop. En nasjonal satsing på sikkerhet i kvikkleireområde. Teknologidagene, Trondheim, 2012
- Nr. 34 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Datarapport for Kvikkleireskred ved Esp i Byneset i januar 2012
- Nr. 35 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Datarapport for Kvikkleireskred ved Esp i Byneset i januar 2012  
Naturfareprosjektet: Skredvarsling, beredskap og sikring Erfaringer fra studietur til Ministry of Transportation (British Columbia) og Canadian Avalanche Center Teknologidagene, Trondheim, 2012
- Nr. 36 Tid for ny markedsdesign? Finn Erik Ljåstad Pettersen, Anne Sofie Ravndal Risnes

- Nr. 37 Flomberegning for Fagernes (012.LZ). Ingeborg Kleivane
- Nr. 38 Inventory of Norwegian glaciers. Liss M. Andreassen and Solveig H. Winsvold (Eds.)
- Nr. 39 Totalavløpet fra Norges vassdrag 1900-2010. Lars-Evan Pettersson
- Nr. 40 Naturfareprosjektet: Programplan 2012-2015 for etatsprogrammet "NATURFARE – infrastruktur, flom og skred (NIFS)"
- Nr. 41 Vinden som blåste i fjor. Hvor sterk var Dagmar?
- Nr. 42 Kartlegging av grunnvannsressurser. Dimakis Panagotis
- Nr. 43 Kvartalsrapport for kraftmarknaden 3. kvartal 2012. Finn Erik Ljåstad Pettersen (red.)
- Nr. 44 Isstorm. Ising på kraftforsyningsnettet. Roger Steen (red.)
- Nr. 45 Trær til besvær. Lærdommer om skogrydding i etterkant av ekstremværet Dagmar
- Nr. 46 Naturfareprosjektet: Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder



Norges  
vassdrags- og  
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstuen  
0301 Oslo

Telefon: 09575  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

